LAZER PROFİL KESİM MAKİNESİ İÇİN SÜRTÜNMELİ DELİK DELME ÜNİTESİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed ÇÜREN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER PROFİL KESİM MAKİNESİ İÇİN SÜRTÜNMELİ DELİK DELME ÜNİTESİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed ÇÜREN

0000-0002-6139-3130

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER PROFİL KESİM MAKİNESİ İÇİN SÜRTÜNMELİ DELİK DELME ÜNİTESİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed ÇÜREN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Bu çalışmada henüz çok yaygın olmayan sürtünmeli delme prosesi derinlemesine incelenerek proses parametre ve avantajlarının ortaya konması hedeflenmiştir. İnce et kalınlıklı sac ve profillerde sürtünmeli delme prosesinin, geleneksel kaynak somunu kaynatma, perçin somunu çakma gibi yöntemlere alternatif olabileceğini göstermek adına deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda sürtünmeli delme uygulanan ve projeksiyon somun kaynağı ile somun kaynatılan profil numunelere civatalar takılarak çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen kopma kuvvetleri karşılaştırılarak prosesin kabul edilebilirliği değerlendirilmiştir. M12 sürtünmeli delme prosesi Deform-3D yazılımında analiz edilerek elde edilen sonuçlar proje tasarımında veri olarak kullanılmıştır. Sürtünmeli delme prosesini lazer profil kesim makinesinde tam otomatik olarak uygulayabilecek ünite tasarımının yapılması hedeflenmiştir. Yapılan tasarımlardaki mekanik elemanlar analitik hesaplamalar doğrultusunda seçilmiştir. Hesaplamaların ve ürün seçimlerinin ilgili paket programlarda doğrulamaları yapılarak emniyetli sistem tasarımı amaçlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sürtünmeli delme, termal delme, lazer profil kesim makinesi, CNC

2021, xi + 126 sayfa.

ABSTRACT

MScThesis

DEVELOPMENT OF FRICTION DRILLING UNIT FOR LASER PROFILE CUTTING MACHINE

Muhammed ÇÜREN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of MechanicalEngineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

In this study, it is aimed to reveal the process parameters and advantages by examining the friction drilling process, which is not very common yet. Experimental studies have been carried out to show that the friction drilling process in thin-walled sheet metal and profiles can be an alternative to traditional methods such as welding nut welding and installing rivet nut. In the experimental studies, tensile tests were carried out by attaching bolts to profile samples that were applied friction drilling and nut welded with projection nut welding. The acceptability of the process was evaluated by comparing the obtained breaking forces. The results obtained by analyzing the M12 friction drilling process in Deform-3D software were used as data in the project design. It is aimed to design a unit that can apply the friction drilling process fully automatically on the laser profile cutting machine. The mechanical elements in the designs were selected by analytical calculations. Safe system design is aimed by ensuring that the calculations and product selections are verified in the relevant package programs.

Keywords: Friction drilling, thermal drilling, laser profile cutting machine, CNC

2021, xi + 126 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde ve tez çalışması süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Nurettin YAVUZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım kapsamında desteklerinden dolayı Durmazlar Makine A.Ş.'ye ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi her zaman destekçim olan aileme ve eşime teşekkürü borç bilirim.

Muhammed ÇÜREN

23/09/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……i
ABSTRACT…… ii
TEŞEKKÜR……... iii
SİMGELER DİZİNİ.....v
ŞEKİLLER DİZİNİ……...viii
ÇİZELGELER DİZİNİ…….. xi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
3. MATERYAL VE YÖNTEM 15
3.1. Lazer Teknolojisi 15
3.1.1. Lazer Boru-Profil Kesim Makinesi ve Kullanım Alanları 16
3.2. Sürtünmeli Delik Delme Yöntemi 20
3.2.1. Sürtünmeli Delik Delme Yönteminin Avantajları 22
3.2.2. Sürtünmeli Delik Delme Takım Geometrisi 22
3.2.3. Sürtünmeli Delik Delme Parametreleri 24
3.3. Deneysel Çalışmalar 24
3.3.1. Çekme Testi Numunelerinin Lazer Profil Kesim Makinesinde Hazırlanması . 24
3.3.2. Sürtünmeli Delme Yöntemi ile Numunelerin Delinmesi 26
3.3.3. Projeksiyon Kaynağı İle Numunelere Somunların Kaynatılması..... 29
3.3.4. Çekme Testi 32
3.4. Sürtünmeli Delme Prosesinin Sonlu Elemanlar İle Analizi..... 35
3.5. Lazer Profil Kesim Makinesi İçin Sürtünmeli Delme Ünitesi Tasarımı 44
3.5.1. Sürtünmeli Delme Ünitesi Spindle Motor ve İlgili Ekipmanlarının Seçimi 47
3.5.2. Sürtünmeli Delme Ünitesi (Z1 Eksen) Vidalı Mil Seçimi 53
3.5.3. Sürtünmeli Delme Ünitesi (Z1 Eksen) Lineer Kızak ve Araba Seçimi..... 61
3.5.4. Sürtünmeli Delme Ünitesi Motor ve Diğer Mekanik Elemanların Seçimi 71
3.5.5. Y-Z Eksen Grubu Lineer Kızak ve Araba Seçimi 80
3.5.6. Y-Z Eksen Grubu Motor ve Diğer Mekanik Elemanların Seçimi..... 85
3.5.7. Lazer Kesim (Z2 Eksen) Ünitesinin Tasarımı 91
3.5.8. Y-Z Eksen Gövdesi Maksimum Yükteki Statik Analizi 94
4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 98
4.1. Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... 98
4.2. M12 Sürtünmeli Delme Proses Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... 104
4.3. Sürtünmeli Delme Ünitesi Motor Seçiminin Doğrulanması 108
4.4. Y Eksen Motor Seçiminin Doğrulanması..... 112
4.5. Y-Z Eksen Gövdesi Statik Analizi Sonuçları 115
5. SONUÇ 119
KAYNAKLAR 119
ÖZGEÇMİŞ 119

SİMGELER DİZİNİ

SİMGELER	AÇIKLAMA
2D	2 boyutlu koordinat sistesi
3D	3 boyutlu koordinat sistemi
X	X yönündeki hareket ekseni
Y	Y yönündeki hareket ekseni
Z	Z yönündeki hareket ekseni
σy	Akma gerilmesi (Mpa)
ε	Etkin şekil değiştirme
AF	Eksenel kuvvet
T	Etkin şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}$	Sıcaklık
RF	Radyal kuvvet
DE	Delikteki ölçüsel hata
RE	Delikteki yuvarlaklık hatası
BL	Kovan yüksekliği
h_c	Konik uç
h_n	Konik kısım
h_1	Silindirik kısım
T	Boyun bölgesi
$ØD_1$	Boyun bölgesi çapı (mm)
d_1	Silindirik bölge Çapı (mm)
α	Takım uç açısı (^{0})
β	Koniklik açısı (^{0})
F	Kuvvet (N)
n	Dönme hızı (rpm)
L_m	Matkap boyu (mm)
V_p	İlerleme hızı (mm / s^2)
V_c	Kesme hızı (m / dak)
D	Takım Çapı (mm)
p_v	Vidalı mil adımı (mm)
F_i	Kılavuzun ilerleme hızı (mm /dak)
p	Kılavuz hatvesi (mm)
F_c	Diş başına kesme /ezme kuvveti (N)
d_1	Takımın nominal çapı (mm)
f_o	Kılavuzun dönüş başına ilerlemesi (mm)
k_c	İş parçası malzemesinin özgül direnci (Mpa)
N	Kılavuzun kesme ağzı sayısı
F_g	Ağırlık kuvveti (N)
i	Çevrim oranı
n_m	Ortalama hız (rpm)
F_m	Ortalama yük (N)
L	Devir cinsinden vidalı mil ömrü (rpm)
L_H	Saat cinsinden vidalı mil ömrü (sa)
C	Dinamik yük (N)
n_k	kritik hız (rpm)

n_{kzul}	İzin verilen operasyon hızı (rpm)
f_{nk}	Uç yataklama rulman tipine göre düzeltme faktörü
l_n	Vidalı mil uzunluğu (mm)
d_2	Vidalı mil çapı (mm)
q	Proses süresinin çevrim süresine oranı (%)
t_p	Proses süresi (s)
m	Kütle (kg)
L_w	Lineer kızak arabaları arası mesafe (mm)
L_S	Lineer kızaklar arası mesafe (mm)
L_y	Tahrik vidalı milinin y yönündeki konumu (mm)
L_z	Tahrik vidalı milinin z yönündeki konumu (mm)
x_S	Sistem ağırlık merkezinin x yönündeki konumu (mm)
y_S	Sistem ağırlık merkezinin y yönündeki konumu (mm)
z_S	Sistem ağırlık merkezinin z yönündeki konumu (mm)
x_p	Proses kuvveti noktasının x yönündeki konumu (mm)
y_p	Proses kuvveti noktasının y yönündeki konumu (mm)
z_p	Proses kuvveti noktasının z yönündeki konumu (mm)
F_a	İvmelenme kuvveti (N)
F_p	Proses kuvveti (N)
$F_{comb\ n\ i}$	Birleşik eşdeğer yük (N)
F_{Pr}	Ön yük nedeniyle arabadaki dahili eksenel yük (N)
X_{Pr}	Ön yükleme faktörü
F_{lim}	Kaldırma kuvveti (N)
F_{eff}	Ön yüklemeli etkin eşdeğer yük (N)
S_0	Statik yük faktörü
C_0	Statik yük (N)
M_t	Toplam moment (Nm)
M_{ta}	Tahrik momenti (Nm)
M_s	Sürtünme momenti (Nm)
M_i	İvmelenme momenti (Nm)
F_L	Eksenel kuvvet (N)
η	Verim (%)
η_1	Mekanik verim (%)
η_2	Planet redüktör verimi (%)
M_s	Sürtünme momenti (Nm)
$M_Ç$	Sistem çıkış torku (Nm)
F_z	Z ekseni yönündeki kuvvet (N)
F_y	Yekseni yönündeki kuvvet (N)
F_x	X ekseni yönündeki kuvvet (N)
a	İvme (m/s^2)
T	Tork (Nm)
P	Güç (kW)
d	Pinyon Çapı (mm)
z	Diş sayısı
m	Modül
σ_{Flim}	Diş dibi gerilmesi (Mpa)
d_0	Taksimat çapı (mm)
b	Diş genişliği (mm)
μ	Sürtünme katsayısı

J	Atalet ($kg.m^2$)
M_b	Atalet momenti (Nm)
$F_{bileşke}$	Bileşke sürtünme kuvveti (N)
g	Yerçekimi ivmesi (m / s^2)
e	Sac kalınlığı (mm)

KISALTMALAR	**AÇIKLAMA**
CNC	Bilgisayar sayımlı kontrol
WC	Tungsten Karbür
HSS	Yüksek Hız Çeliği
FCAR	Sürtünme temas alanı oranı
CMM	Koordinat ölçüm makineleri
CAD	Bilgisayar destekli tasarım

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. CO2 lazer kesim proses şeması 15
Şekil 3.2. Fiber lazer kesim proses şeması..... 16
Şekil 3.3. BLM Grup firması lazer profil kesim makinası..... 17
Şekil 3.4. TRUMPF firması lazer profil kesim makinası 17
Şekil 3.5. Durmazlar firması lazer profil kesim makinası 17
Şekil 3.6. Lazer profil kesim makinesi kullanım alanları 19
Şekil 3.7. Lazer profil kesim makinesi kesilen parça örnekleri 20
Şekil 3.8. Sürtünmeli delme prosesinin uygulanması 21
Şekil 3.9. Sürtünmeli delme takım ucu geometrisi 23
Şekil 3.10. Numune profillerinin lazer profil makinesinde kesim işlemi 25
Şekil 3.11. Kesilen numune profilleri 25
Şekil 3.12. Sürtünmeli delme prosesinin uygulandığı freze tezgahı 27
Şekil 3.13. Sürtünmeli delme işleminin numuneler üzerinde uygulanması 28
Şekil 3.14. Sürtünmeli delme prosesinin uygulandığı numuneler 29
Şekil 3.15. Kaynatma parametrelerinin belirlenmesi için yapılan ön çalışma..... 30
Şekil 3.16. Projeksiyon kaynağının uygulandığı kaynak makinesi..... 31
Şekil 3.17. Projeksiyon kaynak makinesinde somunların numunelere kaynatılması 32
Şekil 3.18. Projeksiyon kaynağı ile hazırlanan kaynak somunlu numuneler..... 32
Şekil 3.19. Çekme testinde hazırlanmış numuneler..... 33
Şekil 3.20. Çekme testinin uygulandığı test cihazı 34
Şekil 3.21. Numunelerde çekme testinin uygulanması 35
Şekil 3.22. Sürtünmeli delme için hazırlanan sonlu elemenlar analiz modeli 36
Şekil 3.23. İş parçası malzemesi AISI 1045 için sabit sıcaklıkta, şekil değiştirme hızına bağlı bağlı akma gerilmesi 38
Şekil 3.24. İş parçası malzemesi AISI 1045 için sabit şekil değiştirme hızında, sıcaklığa bağlı akma gerilmesi..... 39
Şekil 3.25. AISI 1045 için girilen yayınırlık katsayısı..... 40
Şekil 3.26. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik grafiği 40
Şekil 3.27. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı ısı kapasitesi grafiği 41
Şekil 3.28. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan proses parametreleri 41
Şekil 3.29. AISI 1045 çeliği deneysel ölçüm parametreleri ve sürtünme katsayısı sonuçları…….42
Şekil 3.30. Deform-3D sürtünmeli delme analiz özet bilgileri 43
Şekil 3.31. Takım ucu ağ yapısı modeli…… 43
Şekil 3.32. İş parçası ağ yapısı modeli……44
Şekil 3.33.Lazer profil kesim makinesi sürtünmeli delik delme üniteli Y-Z eksen grubu tasarımı ve makine eksen gösterimi 46
Şekil 3.34. Takım uçları için proses katalog değerleri..... 47
Şekil 3.35. Spindle motor teknik özellikleri ve hız-tork grafiği 50
Şekil 3.36. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan spindle motor 51
Şekil 3.37. Soğutucu ekipmanı 52
Şekil 3.38. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan takım tucular 52
Şekil 3.39. Sürtünmeli delme ünitesi M12 delme-diş proses çevrimine ait kuvvet-zaman grafiği 55

Şekil 3.40. Sürtünmeli delme ünitesi M12 delme- diş çekme proses çevrimine ait vidalı mil dönme hızı-zaman grafiği 56
Şekil 3.41. Rexroth marka flanşlı tek somunlu FEM-E-B tipi vidalı mil kataloğu ... 58
Şekil 3.42. Rexroth kataloğu vidalı mil kritik hız grafiği 59
Şekil 3.43. Rexroth kataloğu vidalı mil izin verilen eksenel yük grafiği…….. .60
Şekil 3.44. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan (Z1 Eksen) lineer kızak ve arabaların pozisyonu 61
Şekil 3.45. 2 lineer kızaklı, 4 lineer kızak arabalı vidalı mil tahrikli sistem modeli. 62
Şekil 3.46. Sistemdeki arabalarda oluşacak kuvvet ve moment bilgileri..... 63
Şekil 3.47. 4 arabalı lineer sistemdeki kuvvetler ve kuvvet uygulama noktaları gösterimi..... 63
Şekil 3.48. Sürtünmeli delme ünitesindeki kuvvet noktaları 64
Şekil 3.49. Lineer kızak arabalarına z eksen yönünde etki eden kuvvet gösterimi ... 65
Şekil 3.50. Z Eksen yönünde arabalara gelen kuvvet formülasyonu 65
Şekil 3.51. Lineer kızak arabalarına y eksen yönündeki etki eden kuvvet gösterimi 66
Şekil 3.52. Y Eksen yönünde arabalara gelen kuvvet formülasyonu……..... 66
Şekil 3.53. Lineer kızak arabasına gelen kuvvet gösterimi..... 69
Şekil 3.54. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan lineer kızak arabası 70
Şekil 3.55. Sürtünmeli delme ünitesi Z1 eksen yönü tahrik sistemi gösterimi 72
Şekil 3.56. Vidalı milde hesaba katılması gereken ön yükleme ve sürtünme momenti tablosu 73
Şekil 3.57. Servo motor-planet redüktör hareket iletim sistemi 74
Şekil 3.58. Sürtünmeli delme ünitesi dişli-kayış kasnak gösterimi 76
Şekil 3.59. Seçilen zaman kayışı kataloğu güç tablosu..... 77
Şekil 3.60. Sistemde kullanılan zaman kayışı uzunluğu 78
Şekil 3.61. Seçilen zaman kayışı kataloğu uzunluk tablosu..... 78
Şekil 3.62. Aktarma kasnaklarındaki konik sıkmalı kaplin tipi 79
Şekil 3.63. Aktarma kasnaklarındaki konik sıkmalı kaplin kataloğu..... 79
Şekil 3.64. Sistemdeki hareket iletim elemanları ve konik sıkmalı kaplin kullanımı kesit görünümü 80
Şekil 3.65. Y-Z eksen grubu ağırlık merkezi ve arabalara etki eden kuvvetler 81
Şekil 3.66. Y-Z eksen hareket iletim sistemi gösterimi 86
Şekil 3.67. Y eksen tahrik sistemi şematik gösterimi 87
Şekil 3.68. Lineer sistem sürtünme katsayıları 88
Şekil 3.69. Y eksen pinyon ve kremayer dişli gösterimi 91
Şekil 3.70. Y eksen yağlama pinyonu ve yağlama bloğu gösterimi 91
Şekil 3.71. Lazer kesim ünitesi (Z2 Eksen) gösterimi 92
Şekil 3.72. Lazer kesim ünitesi seçilen vidalı mil..... 93
Şekil 3.73. Y eksen gövde gösterimi..... 95
Şekil 3.74. Y eksen gövdesi statik analizi için oluşturulan mesh yapısı 95
Şekil 3.75. Statik analiz için belirlenen sınır koşulları arka görünüş 96
Şekil 3.76. Statik analiz için belirlenen sınır koşulları ön görünüş 97
Şekil 4.1. M6 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği .. 99
Şekil 4.2. M6 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 99
Şekil 4.3. M8 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 100
Şekil 4.4. M8 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 100

Şekil 4.5. M10 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 101
Şekil 4.6. M10 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği..... 101
Şekil 4.7. M12 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 102
Şekil 4.8. M12 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği 102
Şekil 4. 9. Sürtünmeli delme analizi sonucu oluşan kovan (burç) yapısı 104
Şekil 4.10. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası sıcaklık dağılımı 105
Şekil 4.11. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası gerilme dağılımı 106
Şekil 4.12. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası gerinim dağılımı 106
Şekil 4.13. Sürtünmeli delme analizi sonucu oluşan eksenel yük grafiği 107
Şekil 4.14. Sürtünmeli delme ünitesine ait mekanik girdi sayfası 108
Şekil 4.15. Sürtünmeli delme ünitesi hareket profili sayfası 109
Şekil 4.16. Sürtünmeli delme ünitesi planet redüktör veri girdisi ve mekanik sistem sonuç sayfası 110
Şekil 4.17. Sürtünmeli delme ünitesi motorunun çevrim boyunca moment ve hız verisi sayfası..... 111
Şekil 4.18. Sürtünmeli delme ünitesi motor seçimi sonuç sayfası..... 111
Şekil 4.19. Y-Z eksen grubuna ait mekanik girdi sayfası 113
Şekil 4.20. Y eksendeki hareket profili sayfası. 113
Şekil 4.21. Y eksen grubu planet redüktör veri girdisi ve mekanik sistem sonuç sayfası 114
Şekil 4.22. Y eksen motorunun çevrim boyunca moment ve hız verisi sayfası..... 114
Şekil 4.23. Y eksen grubu motor seçimi sonuç sayfası……... 115
Şekil 4.24. AlMg3 malzeme tanımlanan Y eksen gövdesinde oluşan sehim…….. 116
Şekil 4.25. St 44 malzeme tanımlanan Y eksen gövdesinde oluşan sehim……..117
Şekil 4.26. Y eksen gövdesi gerilme sonuçları 118

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. St 37 kutu profil numuneleri kimyasal bileşimi..... 26
Çizelge 3.2. St 37 kutu profil numuneleri mekanik ve fiziksel özellikleri 26
Çizelge 3.3 Sürtünmeli delme proses parametreleri 27
Çizelge 3.4.Prosesin uygulandığı freze tezgahının özellikleri..... 28
Çizelge 3.5.Numunelere kaynak somunu kaynatma parametreleri 30
Çizelge 3.6. Projeksiyon kaynak makinesi teknik özellikleri 31
Çizelge 3.7. Çekme testlerinde kullanılan test cihazı özellikleri 34
Çizelge 3.8. Takım ucu malzemesi(tungsten karbür) mekanik ve fiziksel özellikleri 37
Çizelge 3.9. İş Parçası Malzemesi AISI 1045 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi 37
Çizelge 3.10. Sürtünmeli delme prosesi için yaklaşık devir ve tork değerleri..... 48
Çizelge 3.11.Fanar marka ovalama kılavuzları ile ST37 malzemeye diş çekme için verilen ortalama devir ve tork değerleri. 49
Çizelge 3.12. Spindle motor teknik verileri 51
Çizelge 3.13. M12 delik delme proses çevrimi veri özet tablosu 55
Çizelge 3.14.Lineer kızak ve araba sistem modeli parametre detayları 62
Çizelge 3.15. Sistemde oluşan kuvvet detayları..... 64
Çizelge 3.16. Sistemdeki parametre değerleri 67
Çizelge 3.17.Sürtünmeli delme ünitesi planet redüktör teknik özellikleri..... 75
Çizelge 3.18. Sürtünmeli delme ünitesi servo motor teknik özellikleri..... 75
Çizelge 3.19. Y-Z eksen grubu malzeme listesi ve ağırlıkları 80
Çizelge 3.20. Tanımlanan koordinat sistemindeki parametre değerleri 82
Çizelge 3.21. Motor hesabında gerekli parametreler 87
Çizelge 3.22. Y-Z eksen grubu planet redüktör teknik özellikleri..... 89
Çizelge 3.23. Y-Z eksen grubu servo motor teknik özellikleri..... 89
Çizelge 4.1. Numunelere ait çekme testi sonuçları..... 98
Çizelge 4.2. Bir otomotiv üreticisinin kaynak somunlu parçaların çekme testinde istediği dayanım tablosu 103
Çizelge 4.3. Sürtünmeli delme için örnek hareket çevrim tablosu 109

1. GİRİŞ

Modern teknoloji çağında değişken müşteri taleplerini karşılayabilmek ve rekabet edilebilirliği sürdürülebilir hale getirmek büyük önem arz etmektedir. Bu durum tüm sektörlerde olduğu gibi sac işleme makineleri sektöründe de gelişime ve arge çalışmalarına daha fazla önem vermeyi gerektirmektedir. Sac işleme makinelerinden olan lazer kesim makinelerinin de son yıllardaki gelişimi hızla devam etmekte ve bu da lazer makinelerinin kullanım alanlarını arttırmaktadır.

Lazer teknolojisinin uygulandığı bir makine tipi olan lazer profil makineleri günümüze kadar ülkemizde yaygın olarak üretilmemekle birlikte son 5-6 yıllık süreçte sektörde yerini almaya başlamıştır. Lazer profil makinelerinin üretim maliyetlerini ciddi oranda düşürmesi ve yüksek hassasiyette kesimlerin yapılabilmesi en önemli avantajlarını oluşturmaktadır. Bu avantajlar seri üretimde ciddi kazançların elde edilmesine imkan tanımakta ve son yıllarda farklı sektörlerde tercih edilmektedir.

Lazer profil kesim makineleri boru, kare, dikdörtgen, eliptik, H ve U kesitli profillerin otomatik yüklenip otomatik olarak tahliye edildiği 2D ve 3D kesim yapabilen yüksek hızlı lazer kesim tezgahlarıdır. Dünyadaki üretici firmalar incelendiğinde genellikle Ø20 mm ve Ø300 mm ölçü aralığında kesim kapasiteleri mevcuttur. 3-4 kW'a kadar lazer kesim gücü kullanarak 1 mm ve 10 mm arası kalınlıklarda profil kesimleri CNC kontrollü olarak yapılmaktadır. Çelik, paslanmaz çelik, alüminyum bakır ve pirinç malzemeli profillerin, makinenin sahip olduğu lazer kesim gücüne göre belirtilen kalınlık aralıklarında hassas olarak kesimi yapılabilmektedir.

Lazer profil kesim makineleri genel olarak 5 adet ana grup, 1 adet merkezleme aynası, 1 adet hareketli profil sürücü ayna ve standart toz toplama filtresi, güç kaynağı, soğutucu ürünlerinden oluşmaktadır. Ana gruplar ; otomatik yükleme ünitesi, hareketli ayna alt eksen grubu, kesim kabini gövdesi, Y-Z eksen grubu ve otomatik boşaltma gruplarıdır. İç ve dış pazar sanayisindeki rekabet noktasında müşteri beklentilerinin karşılanması çok önemlidir. Bu yüzden makinenin belirtilen ana grupları dışında, değişken müşteri

ihtiyaç ve talepleri sonucunda geliştirilen çeşitli sistemler opsiyon olarak lazer profil kesim makinelerinde sunulmaktadır.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında ele alınan konu lazer profil kesim makinesinde sürtünmeli delik delme prosesinin CNC kontrollü olarak uygulanacağı ünitenin tasarlanması ve kesim gövdesine adaptasyonudur. Tez çalışması sonucu elde edilen çıktı ile lazer profil makinesi için yüksek katma değerli bir opsiyon tasarımı ortaya konacaktır. İç piyasadaki lazer profil kesim makinesi üreticilerinde mevcut olmayan bir opsiyon olması üretici firmalara rekabet gücünü arttırma anlamında da avantaj sağlayacaktır.

Sürtünmeli delme, konik bir takım ile iş parçasının temas bölgesinde sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle yumuşamış iş parçasına takımın dalması ve deliğin delinmesi şeklinde meydana gelen, talaşsız, temiz ve geleneksel olmayan, form delme, akıcı delme ve sürtünmeli karıştırmalı delme olarak da adlandırılan, geleneksel olmayan bir delme yöntemidir. Bu imalat yönteminin amacı, ince cidarlı malzemelerde işlem sonunda oluşan kovan ile bağlantı uzunluğunun arttırılmasıdır. İşlemde sürtünme etkisi ile iş parçasının sıcaklığı yükselir ve iş parçası yumuşar, yumuşamış iş parçasına takım dalar ve delik oluşur. Malzemeye dalan takım yumuşamış malzemeyi ilerleme hareketi doğrultusunda iterek deliğin alt kısmında bağlantı uzunluğunu arttıran kovan olarak adlandırılan yapıyı oluşturur. Malzemenin bir kısmı yukarıya akarken diğer bir kısmı da, takımın dönme hızı ve ilerleme hareketinin etkisi ile çevreye yayılır (Miller ve Shih 2006a).

Sürtünmeli delme yönteminin dışında ince et kalınlıklı profillerde rijit bağlantı noktaları elde edilmesi için uygulanan geleneksel yöntemler somun kaynatma ve perçin somunu çakma vb. gibi yöntemlerdir. Sürtünmeli delik delme prosesi bu yöntemlere göre malzeme ve işçilik maliyetleri açısından avantaj oluşturabilecek bir yöntemdir. Proje sonucu ortaya konacak olan sürtünmeli delme ünitesi lazer profil makinesinde tamamen otomatik olarak çalışacağı için ayrıca zaman maliyeti açısından da müşteriye kazanç sağlayacaktır.

Proje kapsamında geleneksel olmayan delik yöntemi olan sürtünmeli delik delme prosesi ve karakteristikleri derinlemesine incelenerek ve tasarım aşamasında gerekli olacak olan girdiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Tasarlanacak olan sürtünmeli delme ünitesiyle delinecek delik kapasitesi M6, M8, M10 ve M12 olarak belirlenmiştir. Tasarım öncesinde maksimum delik kapasitesi olan M12 için prosesin Deform-3D yazılımında analizi yapılarak, iş parçasında oluşan sıcaklık ve deformasyon bölgeleri incelenmiştir. Analiz sonucu tespit edilen veriler ve parametreler literatürde yapılan deneysel çalışmalarla kıyaslanarak optimum değerler kullanılarak ve komponent, takım seçimlerinde kullanımı amaçlanmıştır.

Tasarım öncesinde 60x60 kesitlerinde ve 2 mm kalınlığında St 37 malzemeye sahip kutu profilden deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere M6, M8, M10 ve M12 sürtünmeli delik delme yöntemi ile delikler delinecek ve diğer numunelere de otomotivde yaygın olarak kullanılan projeksiyon kaynak prosesi ile M6, M8, M10 ve M12 kaynak somunları kaynatılmıştır. Hazırlanan numunelere altı köşe civatalar takılarak çekme cihazında çekme testleri yapılmıştır. Sürtünmeli delme prosesi kopma mukavemet değerlerinin, projeksiyon somun kaynağı prosesine kıyasla yeterliliğinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Girdilerin belirlenmesi ve deneysel testlerin yapılması sonrasında sistem tasarımı Solidworks yazılımında yapılmıştır. Sürtünmeli delme ünitesini ve lazer kesim ünitesini barındıran ortak bir Y eksen tasarımı yapılmıştır. Hazır komponentlerin seçimi belirlenen girdiler doğrultusunda gerekli analitik hesaplamalarla ve yazılımlarla desteklenerek yapılmıştır. Y eksen gövdesine maksimum proses kuvvetine maruz kaldığı durum için statik analiz yapılarak, gövde malzemesi seçiminin doğrulanması amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu alanda prosesin anlaşılması ve avantajlarının ortaya konması adına sürtünmeli delme prosesiyle alakalı yapılan analiz ve deneysel çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca prosesi uygulayacak ve 3 adet lineer eksen hareketine sahip olacak sistem tasarımında, yardımcı olarak kullanılan literatür çalışmaları özetlenmiştir.

El-Bahloul ve ark. (2013) tarafından yapılan derlemede sürtünmeli delme yönteminin farklı uygulamalardaki örnekleri ve yapılan çalışmalar araştırılarak yöntemin avantajları ve limitleri ortaya konulmuştur. Prosesin ince et kalınlıklı sac malzemelerde delik açmak için hızlı, ekonomik ve devrimci bir teknik olduğunu vurgulamışlardır. Yapılan derleme sonucunda, sürtünmeli delme proses parametrelerinin optimizasyonu, sürtünmeli delme sırasında oluşan sıcaklık ve gerilimlerin sonlu elemanlar yöntemiyle tespit edilerek takım geometri tasarımının ve malzemesinin geliştirilmesi, yöntemin uygulandığı gevrek dökme metal malzemeler için daha kaliteli bağlantı yüzeyi oluşması adına yeni tekniklerin geliştirilmesi gibi konularda gelecekte yapılacak çalışmalara ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Sözügüzel (2007) yaptığı çalışmada otobüs iskeleti üzerinde sürtünmeli delik delme prosesinin uygulandığı 3 mm et kalınlıklı CM22NBK malzemeli profil parçalarda alternatif olarak 2 mm et kalınlıklı St37-2 ve S460MC malzemelerinin kullanılabilirliğini incelemiştir. Bu malzemelerdeki numunelere proses uygulanarak delikleri delinip diş açma işlemleri sonrasında ortaya çıkabilecek problemler analiz edilmiştir. Diş çekme sonrası çatlak testi yapılmış, delik etrafındaki sertlik ölçümleri kontrol edilmiş ve çekme test cihazında mukavemet değerleri incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan test çalışmaları sonrasında 2 mm kalınlığındaki S460MC malzemesi önerilerek iskelette oluşan ağırlık ve maliyet kazancı ortaya konulmuştur. Ayrıca otobüs iskeleti üzerinde sürtünmeli delik yönteminin dışında somun veya lama kaynatılarak delik elde edilen parçalar tespit edilmiştir. Bu parçalarda sürtünmeli delik delme prosesi uygulandığında elde edilecek olan maliyet kazançları ortaya konulmuştur.

Miller (2006b) yaptığı doktora çalışmasında sürtünmeli delme prosesini deneysel uygulamalar ve nümerik analizler yaparak derinlemesine incelemiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için rehber olmuştur. Çalışmasını 5 ana başlık altında detaylandırmıştır. İlk olarak 1,19 mm kalınlığa sahip AISI 1020 karbon çeliğine sabit 4000 rpm devir hızı ve 165 mm/dak ilerleme hızlarında Ø7,3 mm delik ölçüsünde prosesi uygulamış ve oluşan itme kuvveti, tork ve sıcaklık değerlerini incelemiştir. Takımın ilk değdiği nokta olarak adlandırılan merkez bölgede ve temas yüzeyinden 2,5 mm mesafede maksimum itme kuvveti 700 N, konik bölgede temas yüzeyinden 9,8 mm mesafede maksimum tork 2 Nm ve temas yüzeyinden 3,2 s sonra maksimum sıcaklık 760 °C olarak ölçülmüştür. Proses sırasında ölçülen tork-ilerleme ve itme kuvveti-ilerleme ve sıcaklık-zaman grafikleri sunulmuştur. İkinci başlık altında AISI 1020 ve 4130 çeliği, Al 5052, saf titanyum (CP) gibi farklı malzeme özelliklerine sahip numunelere sürtünmeli delme prosesi uygun parametreler ile uygulanmıştır. Numunelerde oluşan mikroyapı değişiklikleri, mikro sertlik değerleri, delikteki ölçüsel hatalar, oluşan kovan yükseklikleri gibi değerler tespit edilerek prosesin farklı malzemelerde uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. En düzgün deliklerin çelik malzemeli numunelerde oluştuğu belirtilmiş, alüminyum ve titanyumdaki delik yüzeylerinde birtakım çatlak ve hasarlar olduğu tespit edilmiştir. Tüm numunelerde delik çevresinde tane boyutu küçülmesi ve gerilme sertleşmesi sebebiyle delik bölgesindeki sertliği arttığı ortaya konmuştur. Bu durum sürtünmeli delme ile elde edilen deliklerde daha rijit bağlantı noktalarının oluşturulabileceği belirtilmiştir. Üçüncü ana başlık altında otomotivde yaygın olarak kullanılan dökme metallerden olan 4mm kalınlığında Al380 döküm alüminyum alaşımı ve MgAZ91D magnezyum alaşımına ön ısıtma uygulayarak proses uygulanmıştır. Bu çalışmada kırılgan malzemelerde çatlamayı engellemek ve kovan oluşumunu sağlamak için numuneye ön ısıtma yapılmasının önemi ortaya konmuştur. Numunelere uygulanan ön ısıtma ve yüksek devir hızları proses için gerekli itme kuvveti, tork ve gücün azaltılmasına da katkı sağlamıştır. Dördüncü ana başlık altında Formdrill firmasına ait tungsten karbür ve titanyum karbür malzeme kombinasyonlarından oluşan takım kullanılarak proses yumuşak çeliğie uygulanmış ve takımdaki aşınma durumu incelenmiştir. Sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 ve sonrasındaki her 1000 delik delinmesi sonrasında itme kuvveti, tork, takım ağırlığı ve takım geometrisi ölçümleri yapılmıştır. Belirtilen

takım için 11000 deliğe kadar takımdaki aşınmanın minimum ve kabul edilebilir değerlerde olduğu belirtilmiştir. Takım aşınmasının birçok farklı parametreye bağlı olması sebebiyle bu konuda daha fazla araştırma ve çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Beşinci ana başlık altında proses sonlu elemanlar metodu ile ABAQUS Explicit yazılımında simüle edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen itme kuvveti, tork ve sıcaklık değerleri deneysel çalışmalar ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneysel olarak ölçümü çok zor olan gerilme, deformasyon ve sıcaklık dağılımlarını sonlu elemanlar analizi ile görmek, prosesi anlamak adına önemli bir avantaj olduğu belirtilmiştir. Analizle elde edilen itme kuvveti, sıcaklık ve tork değerlerinin deneysel ölçümlerle yakın değerlerde olduğu ortaya konmuştur.

Demir (2012) çalışmasında havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan A7075-T651 alüminyum alaşımı ve St37 çelik malzemeden hazırladığı 2 mm, 4 mm ve 6 mm kalınlıklarındaki numunelere sürtünmeli delik delme prosesini uygulamıştır. Numuneler Ø8 mm, Ø10 mm ve Ø12 mm ölçülerinde delinirken deneysel parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, kovan yüksekliği (ergiyen metalin sıvanması sonrasında oluşan malzeme yüksekliği), kovan dış çapı, kovan ve pul biçimleri, mikro sertlik ve mikro yapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Proses uygulanırken 2400 rpm, 3600 rpm ve 4800 rpm devir hızları, 50 mm/dak,75 mm/dak ve 100 mm/dak ilerleme hızları, 24°, 36° ve 48° takım koniklik açıları, yüksek hız çeliği (HSS) ve tungsten karbür (WC) malzemeye sahip takımlar gibi değişken parametreler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda A7075-T651 alaşımı için yüzey pürüzlülüğü kriterine göre, en uygun parametreler 50 mm/dak ilerleme hızı, 4800 rpm devir hızı, 36 ° takım koniklik açısı, kovan biçimi kriterine göre 100 mm/dak ilerleme hızı, 2400 rpm devir hızı, 36° takım koniklik açısının uygun olduğu tespit edilmiştir. St 37 malzemeli sac numunelerde 2400 rpm dönme hızında 50mm/dak ilerleme hızı, 3600 rpm dönme hızında 75 mm/dak ve 4800 rpm dönme hızında 100 mm/dak ilerleme hızı, kombinasyon parametrelerinin tüm kriterler için uygun olduğu tespit edilmiştir. A7075-T651 alaşımında maksimum mikro sertlik değerinin delik yüzeyinden 70 μm uzaklıkta, St37 çelik malzemede ise mikro sertlik değerinin fazla değişmediği tespit edilmiştir.

Kaya ve ark. (2014) St12 malzemesinin sürtünmeli delinmesinde ilerleme hızı, iş mili dönme hızı, sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı (FCAR) gibi önemli proses parametrelerinin oluşan yüzey sıcaklığı, itme kuvveti ve tork üzerindeki etkilerini araştırmıştır. TİN alaşım kaplı tungsten karbür takım uçlarıyla numune delme işlemleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda tork ve itme kuvvetinin artan ilerleme hızı, sürtünme açısı ve sürtünme temas alanı oranı parametreleriyle birlikte artarken, artan iş mili dönme hızı ile azaldığı tespit edilmiştir. Sürtünme açısı ve sürtünme temas alanı oranı (FCAR) parametrelerinin artması yüzey sıcaklığına etkisinin çok düşük olduğu ve ilerleme hızının artmasıyla iş parçasının yüzey sıcaklığının arttığı ortaya çıkmıştır. Delik yüzey pürüzlülüğünün artan ilerleme hızları ile arttığı ifade edilirken, artan ilerleme hızının oluşan kovan uzunluğuna negatif etkisi gözlemlenmiştir.

Prabhu ve ark. (2014) alüminyum ve bakır alaşımlı malzemelerin sürtünmeli delinmesi konusunda deneysel çalışmalar yaparak proses karakteristiklerini değerlendirmiştir. Çalışmaları sonucunda farklı kimyasal bileşime ve termal özelliklere sahip malzemelerde proses karakteristiklerinin farklı olduğunu belirtmiştir. Sürtünmeli delme yönteminde matkap ile delik delmeye kıyasla takım açınmasının çok daha az olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sürtünmeli delme sonrası delik yüzeyindeki oluşan tane yapısının, klasik delmeye göre daha güçlü bağlantı yüzeyi oluşumuna neden olduğunu ortaya konmuştur. Yöntemin en büyük riskinin yüksek itme kuvvetleri ve yüksek sıcaklıklar olduğunu belirtmiştir.

Krasauskas (2011) sıcak haddelenmiş S235 çeliği, AISI 4301 paslanmaz çeliği ve Al 5652 alüminyum alaşımı için termo mekanik sürtünme yöntemini uygulamıştır. S235 çeliği için 2 mm, AISI 4301 paslanmaz çeliği için 2 mm ve 1,5 mm, Al 5652 alüminyum alaşımı için 1,5 mm et kalınlığında numunelere Ø5,4 mm delme çapına sahip tunsten karbür karbür takım ile proses uygulanmıştır. 2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm devir hızlarının tümü için 60 mm/dak, 100 mm/dak, 140 mm/dak ilerleme hızı parametrelerinde delikler delinmiştir. Çalışmada prosesin en önemli parametreleri olan kalınlık, devir hızı ve ilerleme hızlarının maksimum itme kuvveti ve tork değişimine etkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak dönme hızı S, ilerleme hızı FR, sac kalınlığı t, malzeme mekanik özelliğini ifade eden σy (yield strength) ve σu

(ultimate strength) parametrelerinin maksimum itme kuvveti (Fmax) ve maksimum tork (Tmax) değerlerine etkisini incelemek için istatistiksel 5 değişkenli varyans analiz modeli (ANOVA) oluşturulmuştur. Oluşturulan istatistiksel analiz model ile sürtünmeli delik delmede sac kalınlığı (t), ilerleme hızı (FR) ve akma sınırı (σy) parametrelerinin maksimum itme kuvveti (Fmax) ve maksimum tork (Tmax) üzerinde büyük etkiye sahip olurken dönme hızının en az etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

Rao ve ark. (2017) sürtünmeli delme yönteminde delik bölgesinde oluşan yapısal deformasyon ve gerilmeleri incelemiştir. Sürtünmeli delmede en iyi kalitede kovan yapısı elde etmek için gerilme bölgesindeki gerilmelerin minimum ve deformasyonun maksimum olması gerektiği belirtmişlerdir. Buna istinaden takım koniklik açısı, dönme hızı, ilerleme hızı ve takım malzemesi parametre kombinasyonları kullanılarak prosesin Ansys Workbench yazılımında dinamik analiz (explicit dynamic) metoduyla modelleri oluşturulmuştur. Analiz sonucu elde edilen toplam deformasyon, stres ve uzama değerleri tablo olarak sunulmuştur. Proseste kullanılan bu parametrelerin kombinasyon optimizasyonu Taguchi yöntemi uygulanarak yapılmıştır. 4 parametre değişkenli Taguchi yöntem analizi sonucunda tungsten karbür malzemeli takım, 30 ° takım koniklik açısı, 40 m/s ilerleme hızı ve 4000 rpm spindle dövme hızı parametreleri birlikte kullanıldığında düşük gerilme ve maksimum deformasyon elde edildiği tespit edilmiştir.

Boopathi ve ark. (2013) 1,5 mm kalınlığında pirinç, alüminyum ve paslanmaz çelikten hazırladıkları numunelere prosesi uygulamıştır. Numunelerin ayrı ayrı 2500, 3000, ve 3500 rpm dönme hızlarında, 80, 100 ve 120 mm/dk ilerleme hızlarındaki delme işlemleri ile oluşan itme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Takımın konik olduğu ve penetrasyonun gerçekleştiği kısımda maksimum itme kuvvetlerinin oluştuğu ve silindirik kısımda minimum itme kuvvetlerinin gözlemlendiği belirtilmiştir. Deneysel veriler sonucu elde edilen grafiklere göre sabit ilerleme hızlarında dönme hızının artmasıyla gerekli itme kuvveti azalmıştır. Sabit dönme hızlarında ilerleme hızının artmasıyla daha yüksek itme kuvvetlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Delme işlemi sırasında oluşan maksimum itme kuvveti değerleri Alüminyum numune için 1512 N, pirinç için 1798 N, paslanmaz çelik için 2745 N olarak ölçülmüştür. Buna göre

malzemenin sertlik değerine göre gerekli olan itme kuvvetlerinin arttığı belirtilmiştir. Numunelerde delik bölgelerindeki sertlik değerleri ölçülmüş ve delik delme prosesinde yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerde malzeme sertliğinin arttığı belirtilmiştir. Paslanmaz çeliğin sürtünmeli delinmesi ile alüminyum ve pirince göre daha düzgün kovan yapısının oluştuğu belirtilmiştir.

Pantawane ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada AISI 1015 malzemeden oluşan 36x36x1mm ölçülerinde profil üzerinde sürtünmeli delme yöntemini uygulamıştır. Çalışmada dönme hızı, ilerleme hızı ve takım çapı giriş parametrelerinin proses sonucu elde edilen delikteki ölçüsel hata ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Proseste M8 (Ø7,3 mm) ve M10 (9,2 mm) standart tungsten karbür takım kullanılmıştır. Bu çaplarda farklı devir ve ilerleme hızlarında 26 farklı durum için proses uygulanmış, her numune için deliklerdeki ölçü kaçıklıkları ve yüzey pürüzlülüğü değerleri 3D CMM cihazında ölçülmüştür. Bu iki sonuç değeri ve elde edildiği proses parametreleri tablo olarak sunulmuştur. Optimizasyon için istatistiksel yanıt yüzeyi yöntemi (response surface metod) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılarak analitik modeller ve tablolar oluşturulmuştur. Elde edilen istatiksel analiz sonuçlarına göre dönme hızının ölçüsel kaçıklığa etkisi olmadığı fakat yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Dönme hızı 2500 rpm'den 4500 rpm'e çıktığında yüzey pürüzlülüğünün 0,536 μ m'den 0,341 μ m'ye düşmüştür. İlerleme hızı 71,36 mm/dak'dan 198,64 mm/dak'ya çıkarıldığında ölçüsel kaçıklık 452 μ m 'den 497 μ m'ye, yüzey pürüzlüğünün de 0,342 μ m'den 0,446 μ m'ye arttığı gözlemlenmiştir. Takım çapındaki artışın da yüzey pürüzlülüğü ve delik kaçıklığını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda optimum parametreler 4500 rpm dönme hızı, 71,36 mm/dak ilerleme hızı ve Ø7,3 mm takım çapı olarak belirlenmiştir.

Raju ve ark. (2012) sürtünmeli delme prosesini sonlu elemanlar metoduyla Deform-3D yazılımını kullanarak simüle etmiştir. İş parçası malzemesi 6061 Al alaşımı ve takım malzemesi tungsten karbür (WC) olarak tanımlanmıştır. 3000, 3500 ve 4000 rpm dönme hızları ile 2,54 mm/s, 4,23 mm/s ve 5,93 mm/s ilerleme hızlarında proses analiz edilmiştir. Dönme hızı ve ilerleme hızı değişken parametrelerine göre elde edilen efektif gerilme (stress) ve efektif şekil değiştirme (strain) değerleri elde edilmiş ve

karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda ilerleme hızı ve dönme hızının artışıyla gerilme değerlerinin azaldığı ve şekil değiştirme değerlerinin arttığı ortaya konmuştur. Yapılan çalışma sonrasında sonlu elemanlar modelleme yöntemiyle proses sırasında oluşan sıcaklık ve gerilme değerlerinin simüle edilmesi ve bu sayede uzun ömürlü takım geometri tasarımı ve malzeme seçimi konularında yapılacak çalışmalara ihtiyaç olduğuna dikkat çekilmiştir.

Ozek ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada 4 farklı alüminyum alaşımı üzerinde sürtünmeli delik delme prosesini uygulamıştır. Dönme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin yanında malzemenin termal iletkenlik özelliğinin proses sonrası oluşan sıcaklık, delik yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüksekliğine etkileri incelenmiştir. 1200 rpm, 1800 rpm, 2400 rpm, 3000 rpm, 3600 rpm ve 4200 rpm dönme hızıları, 25 mm/dak, 50 mm/dak, 75 mm/dak ve 100 mm/dak ilerleme hızlarında HSS takım ile farklı ısıl iletkenlik özelliğine sahip A1050, A6061, A5083 ve A7075-T651 alüminyum alaşımlarından oluşan 4 mm kalınlıklı numuneler üzerinde Ø8 mm ölçüsünde delikler delinmiştir. Çalışma sonunda termal iletkenlik katsayısı arttıkça yeterli sürtünme ısısının oluşabilmesi için yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızlarının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca düşük dönme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında daha yüksek kovan yüksekliğinin elde edildiği ortaya konmuştur. A6061, A5083 ve A7075-T651 alaşımlarının sürtünmeli delme işleminde optimum yüzey pürüzlülüğü 2400 rpm dönme hızında elde edilmiş ve tüm besleme hızlarında optimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. A1050 alaşımının sahip olduğu yüksek ısıl iletkenlik katsayısı sayesinde optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri, 25 mm/dak ilerleme ve 2400 rpm dönme hızı, 50 mm/dak ilerleme ve 3000 rpm dönme hızı, 75 mm/dak ve 3600rpm dönme hızı, 100 mm/dak ve 4200 rpm dönme hızı kombinasyonlarında elde edilmiştir.

El-Bahloul ve ark. (2015) AISI 304 paslanmaz çeliğinin sürtünmeli delinmesinde optimum proses parametrelerini ortaya koymayı hedeflemiştir. Prosesin uygulanmasında Ø 5,4 mm, Ø 7,3 mm ve Ø 9,2 mm delik çapları, 30°, 45° ve 60° takım koniklik açıları, % 50, % 75 ve % 100 FCAR değerleri (Sürtünme temas alanı oranları), 1 mm, 2 mm ve 3 mm sac kalınlıkları, 60 mm/dak, 100 mm/dak ve 160mm/dak ilerleme oranları, 1500 rpm, 2500 rpm ve 3500 rpm dönme hızları kullanılmıştır. 18 adet farklı

kombinasyonlarda bu parametre değerleri ile proses uygulanmıştır. Proses sonucunda oluşan eksenel kuvvet (AF), radyal kuvvet (RF), delikteki ölçüsel hata (DE), delikteki yuvarlaklık hatası (RE) ve oluşan kovan yüksekliği (BL) değerleri ölçülmüştür. Optimum proses parametrelerinin elde edilmesi için bu AF, RF, DE ve RE değerlerinin minimum olması gerektiği belirtilmiştir. Elde edilen verilerin optimizasyonu için istatiksel Taguchi, fuzzl logic teknikleri ve varyans analiz grafikleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda malzeme kalınlığı ve dönme hızının proseste AF, RF, DE, RE ve BL değerlerini etkileyen en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan deneysel çalışma için optimum proses parametreleri Ø7,3 mm delik, 45° koniklik açısı, %50 FCAR, 1mm sac kalınlığı, 100mm/dak ilerleme hızı ve 3500rpm devir hızı olarak ortaya konulmuştur. Çelik, paslanmaz çelik, bakır, pirinç ve alüminyum malzemelerinde sürtünmeli delinmesindeki diğer çalışmalarda optimum parametrelerin aynı mantıkla elde edilebileceği önerilmiştir.

Doğru (2010) yaptığı tez çalışmasında AISI 1010 çelik malzemeli kutu profillerin 30°, 45° ve 60° sürtünme açıları olan sinterlenmiş karbür takımlar ile sürtünmeli delme yöntemiyle delinerek parametrelerin prosese olan etkisi incelenmiştir. Farklı parametrelerin kovan ve pul şeklini, yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğini karşılaştırmak amaçlanmıştır. Deney sonuçlarına göre ilerleme ve kesme hızı parametrelerinin bu özellikleri oldukça etkilediği tespit edilmiştir. İlerlemenin artması kovan ve pul yapısını bozduğunu ve yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşturduğunu göstermiştir. Kesme hızı parametresinin ise tam tersine etki ettiği görülmüştür. Sonuç olarak ince kesitli parçaların sürtünmeli delinmesinde kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin uygun seçilmesine dikkat çekilmiştir.

Demir ve ark. (2013) A7075-T651 ve St37 2,4,6 mm kalınlıklara sahip numuneler üzerinde farklı devir, ilerleme hızı ve farklı koniklik açılara sahip takım uçlar ile Ø10mm ölçüsünde sürtünmeli delme ile delik delinmiştir. Delinen deliklere M12 kılavuz ile diş çekilmiştir. Bu çalışma ile numunelerde oluşan kovan yüksekliği ve çeper kalınlığı özelliklerinin sıyırma kuvvetine nasıl etki ettiği incelenmiştir. Numunelere M12 civatalar takılarak 50 kN kapasiteli çekme cihazında 5 mm/dak çekme hızında çekme işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde çeper kalınlığı ve kovan

yüksekliği fazla olan numunelerde vida sıyırma kuvvetinin yüksek olduğu görülmüştür. Malzeme kalınlığının artması, kovan yüksekliğini ve çeper kalınlığını arttırdığı için sıyırma kuvvetini de arttırmıştır. Yüksek dönme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında maksimum kovan yüksekliği oluştuğu için dönme hızının sıyırma kuvvetine pozitif, ilerleme hızının negatif yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Numunelerde 50 mm/dak ilerleme hızı, 3600 d/dak ve 4800 d/dak dönme hızlarında maksimum kovan yüksekliği oluşmuş ve çekme deneyi sonrasında maksimum vida sıyırma kuvvetinin bu numunelerde olduğu görülmüştür. Sürtünmeli delme prosesinde oluşan kovan yapısıyla malzeme kalınlığı arttırıldığından geleneksel delme yöntemine göre delinen deliklere göre yüksek sıyrılma kuvvetlerinin elde edildiğine dikkat çekilmiştir.

Miller ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada büyük plastik deformasyon ve yüksek sıcaklıkların oluştuğu sürtünmeli delme prosesinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesini incelemiş ve deneysel çalışmalarla elde edilen veriler karşılaştırmıştır. Çalışmada bu termo mekanik davranışı simüle etmek amacıyla Abaqus Explicit yazılımı kullanılmıştır. Yöntem 1,6 mm kalınlığa sahip Al 6061-T6 alaşımında uygulanmıştır. Oluşturulan 3D analiz modeli ile iş parçasındaki bölgesel deformasyonun ve sıcaklık dağılımının ortaya konabilmesi büyük bir avantajdır. Sonlu elemanlar analizi ile deneysel olarak ölçülmesi zor olan ayrıntılı veriler elde edilebilmektedir. Analiz ile elde edilen itme kuvveti, tork ve sıcaklık değerleri deneysel çalışma ölçümleriyle kıyaslandığında makul yakınlıkta olduğu vurgulanmıştır. Proses süresince değişen itme kuvveti, tork ve sıcaklık parametreleri, sürtünme katsayısının da değiştiğini göstermektedir. Bu parametrelere bağlı olarak değişen sürtünme katsayısının nasıl değiştiğiyle alakalı yapılmış bir çalışma olmadığı vurgulanarak gelecekte yapılabilecek bir çalışma konusu olarak belirtilmiştir. Sürtünmeli delme için yapılacak farklı çalışmalarda daha kapsamlı analizler ile daha hassas sonuçlar elde edilebileceği ve iş malzemesi üzerindeki artık gerilmelerin ve oluşan plastik deformasyon dağılımın daha iyi tahmin edilmesinin sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Yuce ve ark. (2017) lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı AA5182 alüminyum alaşımının kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lazer gücü, kaynak hızı ve odak noktası konumunun bağlantılatın mekanik ve mikrosertlik özellikleri üzerindeki etkileri

deneysel çalışmalarda karşılaştırılmıştır. Mekanik özellikler çekme testleri yapılarak değerlendirilmiştir. Optimize edilmiş parametrelerde kaynaklı bağlantıların yeterli bir çekme yüküne sahip olduğu görülmüştür.

Krasauskas ve ark. (2014) AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinden oluşan 1,5mm kalınlıkta saca sürtünmeli delme prosesini uygulamıştır. Deneylerde optimum proses parametrelerin parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Prosesin Abaqus Explicit sonlu elemanlar analiz yazılımında simülasyonu yapılarak deney sonuçlarla elde edilen verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda maksimum eksenel kuvvet 1480 N, maksimum tork değeri 2,5 Nm ve iş parçası üzerindeki maksimum sıcaklık 569 °C olarak ölçülmüştür. Analizde iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımının deneysel çalışmayla elde edilen sıcaklık değerlerine çok yakın olduğu grafik verileriyle belirtilmiştir. Analiz ve deneylerde elde edilen eksenel kuvvet ve tork değerlerinin de birbirine yakın olduğu grafiksel verilerle belirtilmiştir. Yapılan çalışma sürtünmeli delme prosesinin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen tahminlerinin doğruluğunu ortaya koymuştur. Proses için gerekli itme kuvvetlerini düşürmek ve takım aşınmasını azaltmak için sonlu elemanlar metodunun kullanımı ile yapılabilecek çalışmaların önemine dikkat çekilmiştir.

Bal (2020) yaptığı deneysel çalışmalarda 2, 4, 6, 8, 10mm et kalınlığındaki malzemelere Ø5, Ø10, Ø20mm çaplarında, 1120 rpm devir ve 25 mm / dev ilerleme hızlarında prosesi uygulamıştır. Deney numunelerinin malzemesi olarak St37 çeliği ve A7075-T651 alaşımı tercih etmiştir. Sürtünmeli delme prosesiyle delinen deliklerde oluşan kovan yapısının uzunluğu ve çeper kalınlığı delik bölgesinin mukavemetini belirleyen en önemli parametreler olduğunu belirtmiştir. Bu yüzden çalışmada farklı bir çok kombinasyonda proses uygulanarak malzeme kalınlığı ve delik çaplarının kovan yüksekliğine ve çeper kalınlığına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda genel olarak takım çapını arttırmanın, malzeme kalınlığına kıyasla kovan yüksekliğinin ve çeper kalınlığının daha etkili olduğu sonucunu ortaya konmuştur.

Yuce ve ark. (2016) çalışmalarında fiber lazer kaynaklı, farklı mukavemetlere sahip düşük alaşımlı çelik ile martenzitik çeliğin proses parametrelerinin Tahuchi yaklaşımı

kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Lazer gücü, kaynak hızı ve odak konumu parametrelerinin mekanik ve mikroyapısal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Maksimum çekme yükü ve minimum ısı parametreleri tespit edilerek ANOVA sonuçlarıyla değerlendirilmiştir.

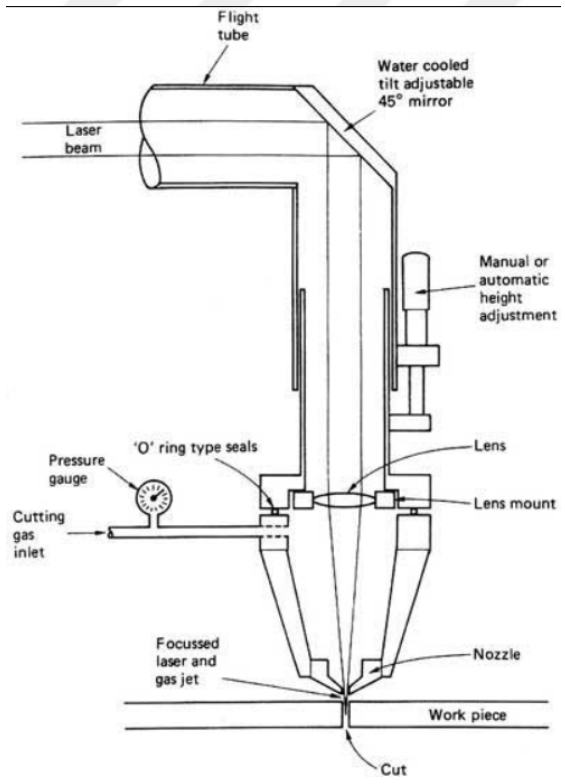
Büyükşahin (2005) yaptığı "3 eksenli CNC tezgah tasarımı ve uygulaması" isimli tez çalışmasında sabit konstrüksiyon, hareketli köprü gövdesi, hareketli Y ve Z eksen gövdelerinin tasarımı 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve Visual Nastran yazılımında gerilme ve sehim analizleri yapılmıştır. Analizler analitik hesaplamalar ile de karşılaştırılarak tasarımın güvenilirliği kontrol edilmiştir. Kesme sırasında eksenlere gelen maksimum yükler ve eksenlerde kullanılan vidalı mil mekanizmaları, lineer kızak ve lineer arabalara gelen kuvvet, moment ve çalışma ömürleri hesaplanmıştır. Mekanizma komponentlerinin hesaplanan çalışma ömürleri ile tezgah için hedeflenen tahmini çalışma süreleri karşılaştırılarak zayıf olanların değiştirilmesi amaçlanmıştır. Eksen hareketleri için gerekli servo motor güçleri hesaplanarak motor seçimleri yapılmıştır. Tasarımın güvenilirliği sağlanması sonrasında makinenin imal edilmesi sağlanmış ve makinenin imalat maliyetleri belirtilmiştir.

Özdemir (2021) standart takım tezgahlarının küçük ürünlerin hassas işlenmesi konusunda etkin olarak kullanılamadığını ifade etmiştir. Küçük ebatlı endüstriyel ürünlerin çeşitliliğin artışıyla yaygın kullanımların oluştuğunu ve bu sebeple özel ebatlara sahip, küçük parçaların işlenmesine yönelik takım tezgahlarının geliştirilmesi gerektiğini savunmuştur. Tez çalışması kapsamında küçük ebatlı parçaların işlemleri için mikro CNC freze tasarımı yapılmıştır. Tasarımdaki yük gelen gövde parçalarına, destek mili, vidalı mil ve vidalı mil yataklarına sonlu elemanlar yöntemi ile statik yükleme koşullarında analizler yapmıştır. Uygulanan kuvvet ve sınır şartlarında sehime etki etmeyen plakalardaki yerlere pahlar vererek gövde parça tasarımlarında optimizasyonlar yapmıştır. Optimizasyonlar sonrası vidalı mil ve destek millerinde sırasıyla 0,009 mm ve 0,007 mm, vidalı mil yatağında 0,12 mm deformasyon olduğu tespit edilerek analiz sonuçlarının bu işi yapacak tezgah için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

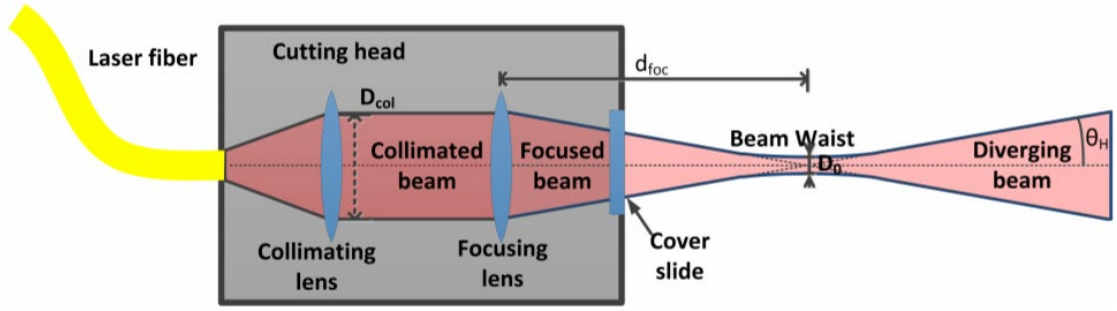
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Lazer Teknolojisi

Lazer ışını bildiğimiz ışıktan farklılık gösterir; belirli bir frekans, dalga boyu ve faza sahip fotonları vardır. Bu nedenle lazer ışınları sıradan ışığın aksine, çok yönlü, yüksek güç yoğunluğunda ve daha iyi odaklanma özelliğine sahip olabilirler. Lazer ışını yüksek yoğunluklu bir ışık olup 0,1 - 0,2 mm gibi dar bir alana odaklanabilir. Böylece lazer ışınının enerjisi çok küçük bir alana indirgenerek malzeme işleme için gerekli olan güç yoğunluğuna ulaşılabilir. Malzeme saniyeden kısa sürede ergitilebilir. Kesme işlemi lazer ışınına paralel gönderilen bir gaz ile de desteklenir. Metallerin kesilmesinde destek gazı olarak; nitrojen, hava veya oksijen kullanılır. Basınçlı gaz kesilen bölgeyi soğutarak aşırı ısınmış bölgenin sınırlandırılmasını da sağlar ve kesme işlemi sonrası ortaya çıkan cürufu da bölgeden uzaklaştırır. İstenilen kesme profili lazer ışını ile takip edilerek kesme işlemi yapılır. Lazer ışını ve tezgâhın birbirine uygun hareketleri CNC kontrollü bir sistem ile sağlanır (Çavdar ve Tanrısever 2013).



Şekil 3.1. CO_2 lazer kesim proses şeması (Anonim 2014)



Şekil 3.2. Fiber lazer kesim proses şeması (Villumsen 2016)

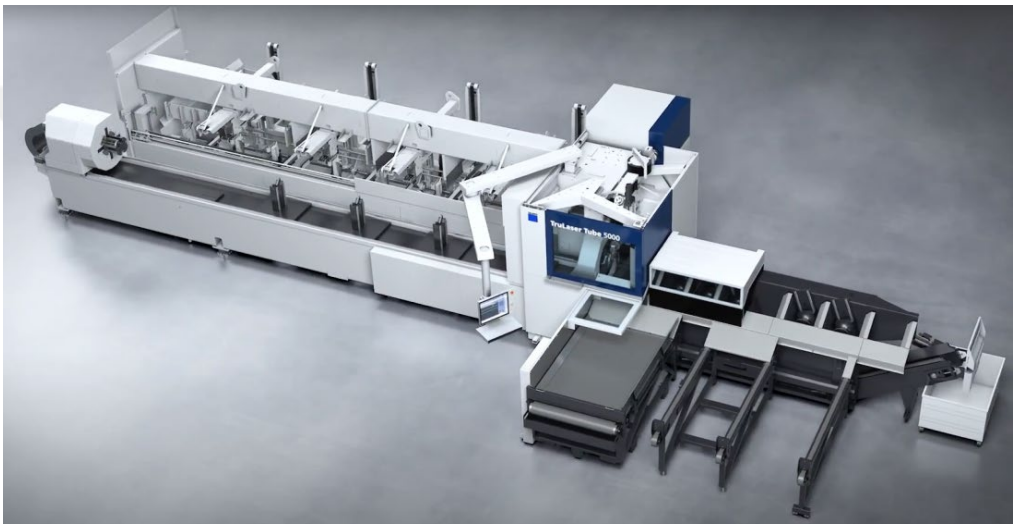
Lazer kesim teknolojisinde yaygın olarak CO_2 lazer kesme ve fiber lazer kesim metotları kullanılır. CO_2 lazer yönteminde güç kaynağı yardımıyla üretilen lazer ışını kesim kafasındaki aynalar ile yönlendirilerek odak lensine gönderilirken, fiber lazer metodunda güç kaynağında üretilen lazer ışını özel fiber kablolar ile taşınır ve dağınık ışın demeti kolimatör lensinde toparlanarak odak lensine ulaştırılır. Fiber lazer yönteminin en büyük avantajı yüksek enerji dönüşüm oranına sahip olmasıdır. Alınan gücün yaklaşık %75 ini lazer ışınına dönüştürülürken CO_2 lazer metodunun verimliliği yaklaşık %20 dir.

3.1.1. Lazer Boru-Profil Kesim Makinesi ve Kullanım Alanları

Lazer boru-profil kesim makineleri yüksek teknolojiye sahip lazer kesim kafaları ile yüksek kesim kalitesi ve hassasiyetinde CNC kontrollü olarak kesim gerçekleştirilen tezgahlardır. Lazer kesim makinelerinde herhangi bir mekanik zorlanma söz konusu olmadığı için rijit gövde tasarımları ile titreşim minimize edilerek yüksek hız ve hassasiyet elde etmek mümkündür. Ayrıca lazer teknolojisi ile kesilen parçada malzeme minimum deformasyonla çapaksız ve temiz kesimler sağlanabilmektedir. Lazer boru ve profil kesim makinesinde farklı profil çaplarında ve kalınlıklarda çelik, alüminyum, paslanmaz, bakır ve pirinç malzemeli profiller kesilebilmektedir. İnsan gücü ihtiyacının minimize edildiği seri üretime uygun olarak tasarlanmış tezgahlardır.



Şekil 3.3. BLM Grup firması lazer kesim makinası (Anonim 2016)



Şekil 3.4. TRUMPF firması lazer kesim makinası (Anonim 2016)



Şekil 3.5. Durmazlar firması lazer kesim makinası (Anonim 2019)

Lazer profil kesim makinesinin bazı avantajları şunlardır:

- Farklı tipteki malzemelerin kesimi mümkündür.
- Profillerin hassas boy kesiminin yanında delik delme, çevre kesim ve boşaltma açma işlemleri tek seferde yapılarak, kesim sonrasında taşlama, kumlama, frezeleme gibi operasyonları ortadan kaldırmaktadır.
- Profil yükleme, boy ölçme, profil sürme ve kesilen profili otomatik olarak istifleme gibi operasyonların tamamı otomatik olarak yapılabilmektedir.
- Birçok operasyonun otomatik olarak yapılabilmesi işletmelerdeki işçi, zaman ve malzeme maliyetlerinin azaltılmasına imkan tanır.
- Yüksek hızlarda yüksek hassasiyette kesim yapma imkanı sağlar.
- İmalattaki operatör kaynaklı kişisel hataların minimize edilmesine olanak sağlar.
- Lazer kesimi sırasında ortaya çıkan tozlar ve dumanlar otomatik olarak vakumlanarak toz toplama filtresi tarafından emilir.
- Kullanıldığı sektörün ihtiyacına ve kesilecek profil tipine göre özel çözümler uygulanabilmesi mümkündür. Açılı kesim istendiği durumda özel 2.5 lazer kesim kafası opsiyonu, kesilen profillerin iç yüzeyinin temizliğinin önem arz ettiği durumlar için çapak önleme sistemi opsiyonu, profil üzerinde kesilecek iç boşaltmaların konumlarının önem arz ettiği durum için profilin ebat ve şekilsel uygusuzluğun istenen noktada olmasını sağlamak için lazer merkezleme opsiyonu, profil üzerindeki kaynak dikişinin algılanıp operatöre profili istediği yüzeye çevirme imkanı tanıyan kaynak dikişi algılama sistemi opsiyonları tezgahlara adapte edilebilen bazı özelliklerdir. Tez konusu olan sürtünmeli delme ünitesinin tasarımı sonrasında lazer profil kesim makinesine yeni bir opsiyon olarak ticarileştirilmesi hedeflenmektedir.

Lazer profil kesim makinesinin bazı dezavantajları şunlardır:

- Yatırım maliyeti yüksek olan tezgahlardır.
- Konvansiyonel tezgahlara göre daha hassas ve detaylı bakım gerektirir.
- Bakımı makine eğitimini almış uzman kişiler tarafından düzenli olarak yapılmalıdır.
- Kesim sırasında destek gazı olarak kullanılan hava,oksijen ve azot işletme maliyetini arttıran sarf malzemelerdir.

Avantajlarıyla öne çıkan lazer profil kesim makineleri özellikle tarım sektörüyle birlikte makine,inşaat, otomotiv, enerji, mobilya, raf sistemleri ve vinç sistemleri gibi bir çok sektör işinde tercih edilmektedir. Lazer profil kesim makinesinde kesilen bazı parçalar görsellerde belirtilmiştir.



Şekil 3.6. Lazer profil kesim makinesi kullanım alanları (Dönmez 2019)



Şekil 3.7. Lazer profil kesim makinesi kesilen parça örnekleri (Anonim 2014)

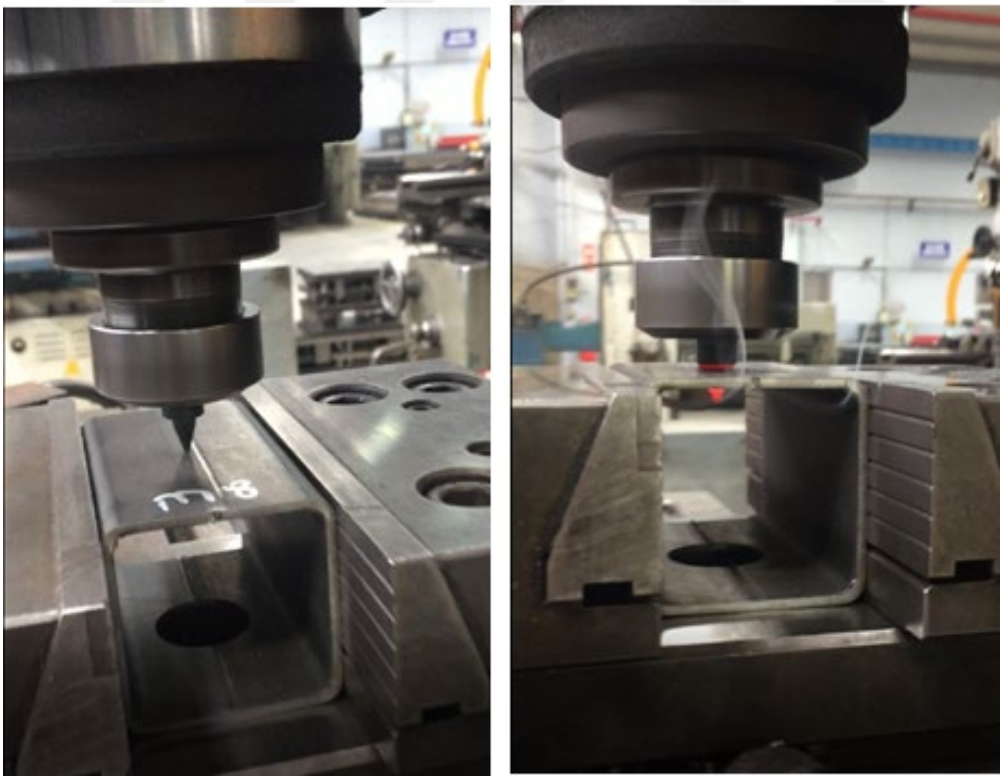
3.2. Sürtünmeli Delik Delme Yöntemi

Sürtünmeli delik delme prosesi, dönen konik uçlu bir takımın malzeme ile arasındaki sürtünme sonucu oluşan yüksek ısı ve ergime işlemleri sonrasında ergiyen malzemeyi aşağıya doğru sıvayarak, kovan olarak adlandıran yapının oluştuğu talaşsız delik delme yöntemidir. Termal sürtünme temeline dayanan bu yöntem uzun takım ömrüne sahip olup kısa proses sürelerinde delik delmeye imkan tanır.

Yöntemde kullanılan konik takım uçları yüksek sertliğe sahiptir. Proses sırasında yüksek eksenel kuvvet uygulanarak malzeme yüzeyine batırılan sert takım ucu yüksek devirlerde dönerken ergiyen metali plastik şekil değişimine zorlar ve iş malzemesinde ilerlemesi ile delik işlemi gerçekleşir. Delik delme işlemi sonrasında iş malzemesi altında oluşan kovan yapısı iş parçası kalınlığının 3 ila 5 katı yüksekliğe sahip

olabilmektedir. Proseste takımın ilerlemesi sırasında erimiş malzemenin bir kısmı da yukarıya doğru yönlenerek delik girişinde doğal bir pul oluşumunu sağlar. Oluşan pul yapısı ile delik girişinde aynı zamanda bir sızdırmazlık oluşturmuş olur. Bu yöntem ile elde edilen deliğe diş çekilerek istenilen vidalı bağlantı noktası elde edilir. (Doğru 2010).

Gelişen teknoloji ile birlikte geleneksel talaşlı delik delme, somun kaynatma, perçin somunu çakma gibi yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkan sürtünmeli delik delme yöntemi modern ve yeni sayılabilecek bir proses olarak karşımıza çıkmaktadır. İş malzemesi cinsi, malzeme kalınlığı ve kullanım yeri bu yöntemin uygulanması adına en önemli faktörlerdir. Özellikle iş malzemesinin ince cidarlı olduğu uygulamalarda, vidalı bağlantı noktaları ihtiyacında alternatif yöntemlere (kaynak somunu kaynatma, perçin somunu çakma vb.) kıyasla avantajlı bir proses olarak karşımıza çıkmakta fakat sektörlerde henüz yaygın olarak kullanılmayan ve çok bilinmeyen bir yöntemdir. (Sözügüzel 2007)



Şekil 3.8. Sürtünmeli delme prosesinin uygulanması

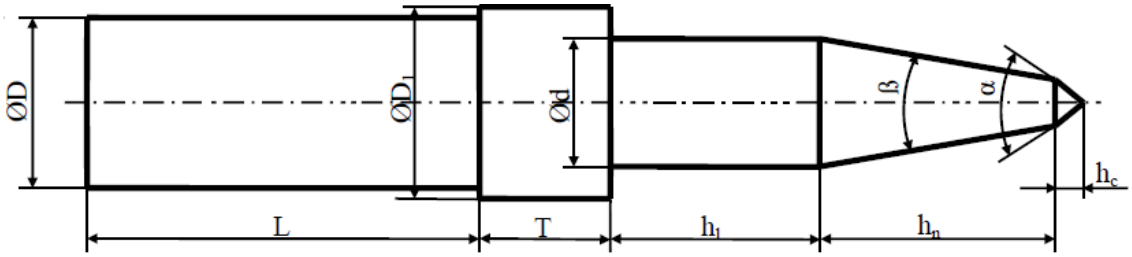
3.2.1. Sürtünmeli Delik Delme Yönteminin Avantajları

Kullanımı henüz çok yaygın olmamasına rağmen ince kalınlıktaki malzemelerde avantajlarıyla ön plana çıkan bir delik delme prosesidir. En önemli sayılabilecek avantajları şunlardır:

1. İnce malzemelerde bağlantı noktaları oluşturmak için yaygın olarak kullanılan kaynak somunu kaynatma, perçin somunu çakma vb. yöntemlerde ilave malzeme maliyeti söz konusu olduğundan dolayı, imalat maliyetleri daha uygundur.
2. Delik bölgesinde sızdırmazlık gereken uygulamalarda doğal olarak oluşan pul yapısı bu açıdan avantaj olarak kullanılabilmektedir.
3. Klasik talaşlı delme yönteminde soğutma sıvısı kullanılırken bu yöntemde delme işlemi ısı kullanılarak yapıldığı için soğutma sıvısı ihtiyacı yoktur.
4. Proseste kullanılan takımlar mukavemeti yüksek malzemelerden özel olarak imal edildiğinden dolayı takım ömrü uzundur.
5. Sürtünmeli delme ile delinen ve diş çekilen bölgelerde geleneksel yöntemlere yakın ve yeterli mukavemet sonuçları elde edilebilmektedir.
6. Yüksek hızlarda delik delme işlemleri gerçekleştiğinden proses süreleri diğer yöntemlere göre daha kısadır, zaman maliyeti açısından tasarruflu bir yöntemdir.

3.2.2. Sürtünmeli Delik Delme Takım Geometrisi

Proseste kullanılan takım uçları metal iş parçasına değdiği anda yüksek itme kuvveti ve dönme hızına sahiptir. Bu sebepten dolayı kullanılacak olan takım ucu geometrisi ve malzemesi oluşacak delik kalitesini yüksek derecede etkileyen faktörlerdir. Bu proses için kullanılan takım uçları yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek aşınma direnci ve mukavemete sahip özel malzemelerden üretilmektedir. Literatürde yer alan deneysel çalışmalardaki ve piyasadaki takım uçlarının imalatında yüksek hız çelikleri (HSS) ve genellikle tungsten karbür (WC) malzemelerinin kullanıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.9. Sürtünmeli delme takım ucu geometrisi (Demir 2012)

Proseste kullanılan takım geometrisi 5 farklı bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.9);

1. Konik Uç (h_c): Sürtünmeli delik delme işlemi başlangıcında iş parçasına takımın değdiği ve sürtünmenin gerçekleştiği ilk bölgedir. İtme kuvvetinin maksimum olduğu bu bölgede iş parçasında deformasyon başlar. Konik uç aynı zamanda delinecek deliğin ekseninde takımın kılavuzlandığı bölgedir. Bölge yüksekliği h_c ve açısı α ile ifade edilmektedir (Şekil 3.9).
2. Konik Kısım (h_n): Sürtünmenin maksimum olduğu ve ilerleme ekseninde iş parçasının alt bölgesinde kovan oluşumunun başladığı bölgedir. Bölge yüksekliği h_n ve açısı β ile ifade edilmektedir (Şekil 3.9).
3. Silindirik Kısım (h_1): Bölgedeki takımın çapı d, yüksekliği ise h_1 ile ifade edilmektedir (Şekil 3.9). h_1 yüksekliği iş parçasının et kalınlığına göre belirlenir ve et kalınlığının 3-5 katı büyük seçilmelidir. Delik bölgesinde ergiyen metalin aşağıya doğru sıvanmasıyla deliğin ve kovan yapısının oluşumu bu bölgede tamamlanır.
4. Boyun Bölgesi (T): Takımın delik ekseninde aşağı yönde hareket etmesi sırasında aşağıya doğru sıvanan metalin dışında ergiyen malzemenin bir kısmı yukarı yönde hareket eder. Boyun bölgesi çapı $ØD_1$ delik çapından daha büyük seçilir. $ØD_1$ çapa sahip boyun bölgesi yukarı yönde ergiyen metali iş parça yüzeyine doğru itilmesiyle delik girişinde pul yapısı şeklinde sızdırmazlık halkasını oluşturur. Uygulamanın yerine göre bu bir avantaj olarak kullanılabilirken, bu yapının oluşumu istenmeyen uygulamalarda boyun bölgesi çapı ($ØD_1$), silindirik bölge çapıyla (h_1) aynı seçilebilir.
5. Bağlama Sapı (D): Takımın tezgah tutucusuna bağlandığı kısımdır. Çapı ØD ve yüksekliği L ile ifade edilir. L ölçüsü tezgah tutucusuna bağlanabilecek yükseklikte seçilir.

3.2.3. Sürtünmeli Delik Delme Parametreleri

Proses sonrası oluşan kovan yapısı kalitesini yani delik kalitesini etkileyen önemli parametreler şunlardır:

1. Dönme hızı (n)
2. İlerleme (f)
3. İş Parçası Kalınlığı
4. Eksenel Kuvvet
5. Takım Koniklik Açısı

Sürtünmeli delik delme yönteminin literatürdeki çalışmalarında genelde bu parametrelerin çeşitli kombinasyonlarında deneysel çalışmalar yapılarak kovan kalitesine olan etkileri incelenmiştir. Tez çalışması sonucu tasarımı yapılacak olan sürtünmeli delik delme ünitesi için gerekli komponentlerin seçiminde bu parametreler ve literatürdeki deneysel çalışmalar dikkate alınarak başarılı bir sistem tasarımı hedeflenmektedir.

3.3. Deneysel Çalışmalar

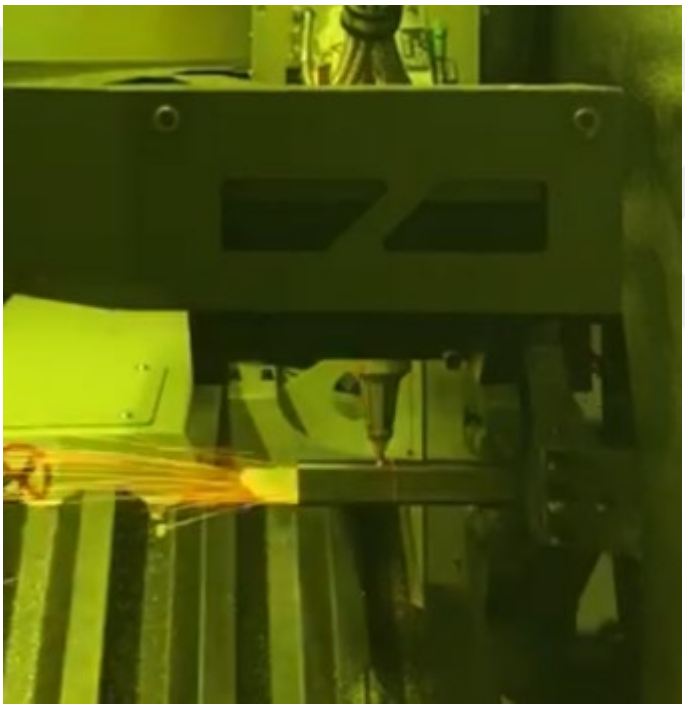
Bu çalışmada sürtünmeli delme prosesi ile ve geleneksel kaynak somunu kaynatma proseslerinden elde edilen delik bölgelerinin mukavemet karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ile, lazer profil makinesine opsiyon olarak tasarlanacak olan sürtünmeli delme ünitesinin fayda analizi açısından prosesin mukavemet yeterliliğinin ortaya konması hedeflenmiştir.

3.3.1. Çekme Testi Numunelerinin Lazer Profil Kesim Makinesinde Hazırlanması

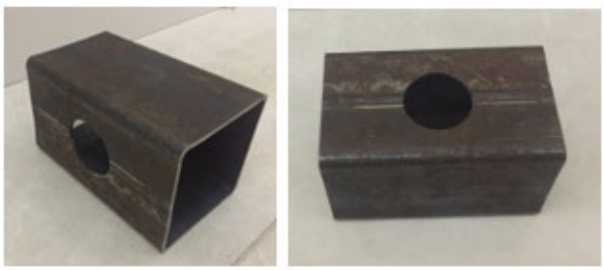
Çekme testine hazırlanacak numuneler için St37 malzemeye sahip 2 mm et kalınlığında 60x60 mm kutu profil kullanılmıştır. Test numunelerinin Solidworks Cad programında modellemesi yapılmıştır. Numune modeli Step formatta lazer profil makinesi Lantek Cam yazılımına aktarılarak kesim programı hazırlanmıştır. Numunelerin aynı boy,

kesim formu ve özelliklere sahip olması açısından lazer profil kesim makinesinde hassas kesimleri yapılmıştır (Şekil 3.10).

Tasarımı yapılacak olan sürtünmeli delik delme ve diş açma ünitesi için delik kapasitesi piyasadaki müşteri isteği doğrultusunda M6-M12 aralığı olarak belirlenmiştir. Tasarım ve mekanik eleman seçimleri bu kapasiteye göre yapılacaktır. Çekme testi için hazırlanacak olan numune profilleri de bu kapasiteye göre, M6, M8, M10 ve M12 sürtünmeli delme ve kaynak somunu kaynatma proseslerinin uygulanması için 4+4 toplam 8 adet olarak Şekil 3.11'te belirtildiği gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.10. Numune profillerinin lazer profil makinesinde kesim işlemi



Şekil 3.11. Kesilen numune profilleri

Deneylerde kullanılan St37 profillerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de, mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Veriler numune profillerinin satın alındığı tedarikçiden temin edilmiştir.

Çizelge 3.1 St 37 kutu profil numuneleri kimyasal bileşimi

Element	Kimyasal Max Değer (%)
Karbon (C)	0,053
Mangan (Mn)	0,213
Kükürt (S)	0,017
Fosfor (P)	0,012
Azot (N)	0,007
Silisyum (Si)	0,013
Bakır (Cu)	0,427

Çizelge 3.2 St 37 kutu profil numuneleri mekanik ve fiziksel özellikleri

Mekanik Özellik	Değer
Çekme Dayanımı (Mpa)	431
Akma Dayanımı (Mpa)	368
Kopma Uzaması (%)	26

3.3.2. Sürtünmeli Delme Yöntemi ile Numunelerin Delinmesi

Sürtünmeli delme prosesinin uygulanacağı profillere M6, M8, M10 ve M12 delik ve diş açma işlemleri uygulanmıştır. Delme işlemlerinde Warmdrill marka takım uçları kullanılmıştır. Takımların özellikleri Çizelge 3.3'te belirtilmiştir. Prosesin uygulanması için önemli parametreler olan ilerleme hızı ve dönme hızı her delik çapı için firma katalog değerlerine göre ayarlanıp proses uygulanmıştır. Delme işlemleri sonrasında ovalama kılavuzları kullanılarak ezerek diş açma yöntemiyle delik dişleri çekilmiştir.

Çizelge 3.3 Sürtünmeli delme proses parametreleri

Parametreler	M6	M8	M10	M12
Proses Süresi (s)	2	2	3	4
Dönme Hızı (rpm)	2800	2500	2200	2000
Sürtünme Açısı (°)	30	30	30	30
Takım Çapı (mm)	5,5	7,4	9,4	11,1

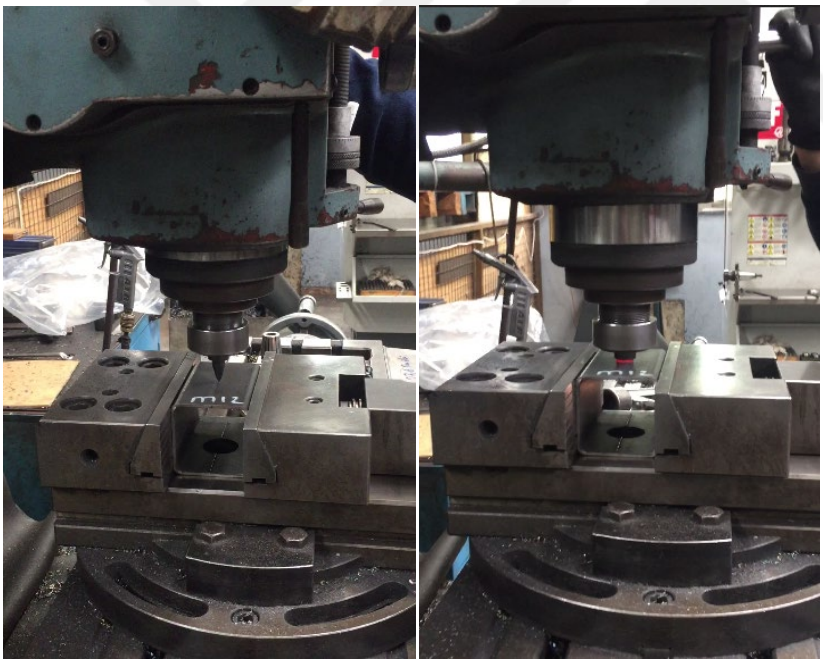
Numunelere sürtünmeli delme prosesi King SZ 2200 HVD marka ve model manuel kalıpçı freze tezgahında uygulanmıştır. Tezgahın özellikleri Çizelge 3.4'te belirtilmiştir.



Şekil 3.12. Sürtünmeli delme prosesinin uygulandığı freze tezgahı (Anonim 2020a)

Çizelge 3.4 Prosesin uygulandığı freze tezgahının özellikleri (Anonim 2020a)

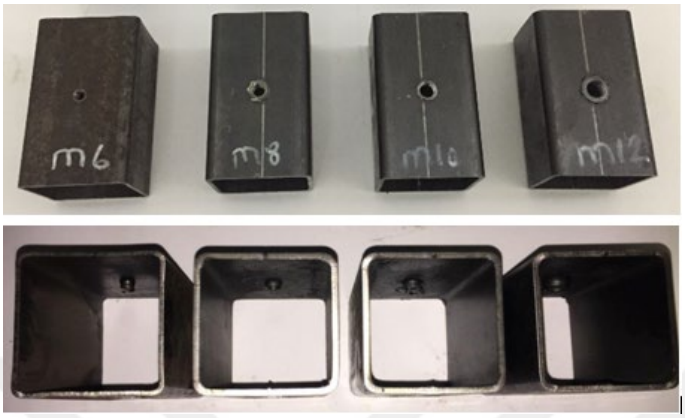
Tezgah Özellikleri	Değerleri
İş Mili Devri (rpm)	75-3600
Z Eksen Motor Gücü (kW)	0,75kW
İlerleme Hızı X,Y (mm/dak)	3000
İlerleme Hızı Z (mm/dak)	1150
X Eksen Hareketi (mm)	950
Y Eksen Hareketi (mm)	400
Z Eksen Hareketi (mm)	400
Tabla Boyu (mm)	1350x305
Makine Ölçüleri (mm)	2800x2300x2400
Makine Ağırlığı (kg)	2700



Şekil 3.13. Sürtünmeli delme işleminin numuneler üzerinde uygulanması

Her profil numune Şekil 3.13'te belirtildiği gibi tezgah mengenesine rijit bir şekilde bağlanarak her numuneye sırasıyla proses uygulanmıştır. Deliklerin merkez noktalarda uygulanması konusuna özen gösterilmiştir. Proseste geleneksel delik yönteminde kullanılan soğutma sıvısı kullanılmamaktadır. Aksine bu yöntem de ısının kullanılması

ile delik delindiği için soğutma sıvısı kullanılması prosese aykırı bir işlemdir. M6, M8, M10 ve M12 deliklerin sürtünmeli delme yöntemiyle delinmiş ve ovalama kılavuzu ile dişleri çekilerek çekme testine hazırlanmış olan numuneler Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Sürtünmeli delme prosesinin uygulandığı numuneler

3.3.3. Projeksiyon Kaynağı İle Numunelere Somunların Kaynatılması

DIN 929 ve DIN standardındaki M6, M8, M10 ve M12 kaynak somunları numune profillerine otomotivde yaygın olarak kullanılan projeksiyon kaynağı prosesiyle kaynatılmıştır. Numunelerin üretici bir otomotiv firma şartnamesine göre somun çekme testi kuvvet değerlerinin kabul edilebilir değerlerde olmasını sağlamak adına kaynak parametrelerinin belirlenmesi için ön deneme çalışması yapılmıştır. Numunelere kaynatılacak olan M6, M8, M10 ve M12 kaynak somunları numune profilleri ile aynı kalınlığa sahip olmak üzere 2mm kalınlığında ve 50x50 mm ölçüsünde sac parçalara kaynatılmıştır. Kaynatılan somunlar saclardan kopartılarak kopma kuvvetleri değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Kaynatma parametrelerinin belirlenmesi için yapılan ön çalışma

Çıkan değerler, şartnamelerde belirlenmiş olan değerler ile mukayese edilmiş ve prosesin numunelere uygulanacağı kaynak parametreleri optimize edilerek belirlenmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Numunelere kaynak somunu kaynatma parametreleri

Numune	Proses Parametreleri		
	Akım (kA)	Proses Süresi (s)	Uygulanan Kuvvet (kg)
M6 Kaynak Somunlu	16,88	4	570
M8 Kaynak Somunlu	17,47	4	550
M10 Kaynak Somunlu	18,2	4	652
M12 Kaynak Somunlu	19,83	4	730

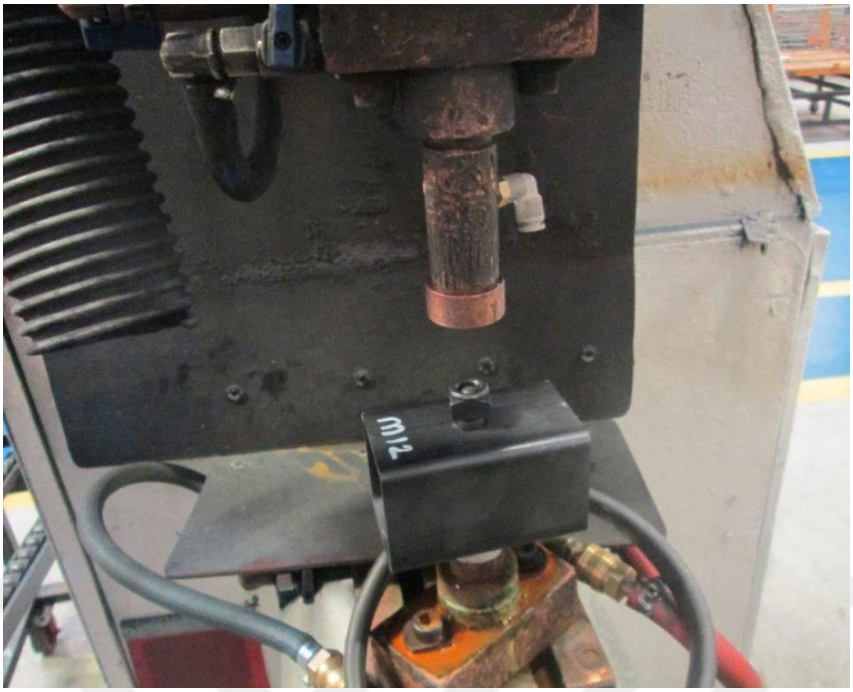
Numunelere somun kaynatma işlemi projeksiyon kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. M6, M8, M10 ve M12 kaynak somunları için sırasıyla uygun olan bakır elektrotlar makineye takılarak Çizelge 3.5'te belirtilen kaynak parametreleriyle numunelere kaynatılmıştır. Prosesin uygulandığı projeksiyon kaynak makinesine ait teknik özellikler Çizelge 3.6'da belirtilmiştir. Prosesin numuneler üzerinde uygulanması Şekil 3.17'de ve tüm kaynak somunlarının profillere kaynatılması ile hazırlanan numuneler Şekil 3.18'te gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Projeksiyon kaynağının uygulandığı kaynak makinesi

Çizelge 3.6 Projeksiyon kaynak makinesi teknik özellikleri

Tezgah Özellikleri	Değerleri
Anma Gücü (%50 DT) (kVA)	120
Sekonder Gerilimi (V)	9
Kısa Devre Akımı (max) (kA)	38
Kaynak Akımı (max) (kVA)	34
Punta Kol Boyu (mm)	400
Projeksiyon Kol Boyu (mm)	400
Kol Açıklığı (min-max) (mm)	175/475
Strok (mm)	100/200
Hava Basıncı (bar)	2/6
Elektrot Baskı Kuvveti (min-max) (daN)	400-1200
Hava Tüketimi (Strok: 10mm, 5bar) (m^3/dk)	1,76
Soğutma Suyu Basıncı (min-max) (bar)	3-5
Soğutma Suyu Sıcaklığı (min-max) (°C)	15-25



Şekil 3.17. Projeksiyon kaynak makinesinde somunların numunelere kaynatılması



Şekil 3.18. Projeksiyon kaynağı ile hazırlanan kaynak somunlu numuneler

3.3.4. Çekme Testi

Sürtünmeli delme ve projeksiyon somun kaynağı proseslerinin uygulandığı numunelere DIN 933 altıköşe civatalar takılarak test cihazında çekme testleri uygulanmıştır. Numuneler üzerinde her iki prosesle elde edilen bağlantı deliklerinin mukavemet karşılaştırması yapılmıştır. Numuneler üzerindeki civataların kopma kuvvetleri kıyaslanmış ve her iki proses ile elde edilen deliklerin, bir otomotiv üreticisi şartnamesine göre mukavemet gerekliliklerini karşılayıp karşılamadıkları değerlendirilmiştir. Çekme testine hazır olan numuneler Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

Numunelerin test cihazı alt çenesi ile sıkılabilmesi için her numunenin alt yüzeyine 10x40 mm ölçülerinde boydan boya lama kaynatılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.19. Çekme testine hazırlanmış numuneler

Çekme testleri ZwickRoell marka Z100 model test cihazında yapılmıştır (Şekil 3.20). Numunelere aynı şartlarda 50 mm/dak çekme hızında civatalardan koparma testleri uygulanmıştır. Çekme testi için kullanılan test cihazına ait teknik özellikler Çizelge 3.7 ‘de belirtilmiştir. Numunelerin test cihazındaki çekme testi uygulaması Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Testler her bir numuneye tek tek uygulanarak, maksimum çekme kuvvetleri ve kopma kuvvetleri uzamaya bağlı olarak elde edilmiştir. Çekme testi sonuçları grafikleri ile birlikte Bölüm 4’te verilerek detaylı olarak açıklanmıştır.



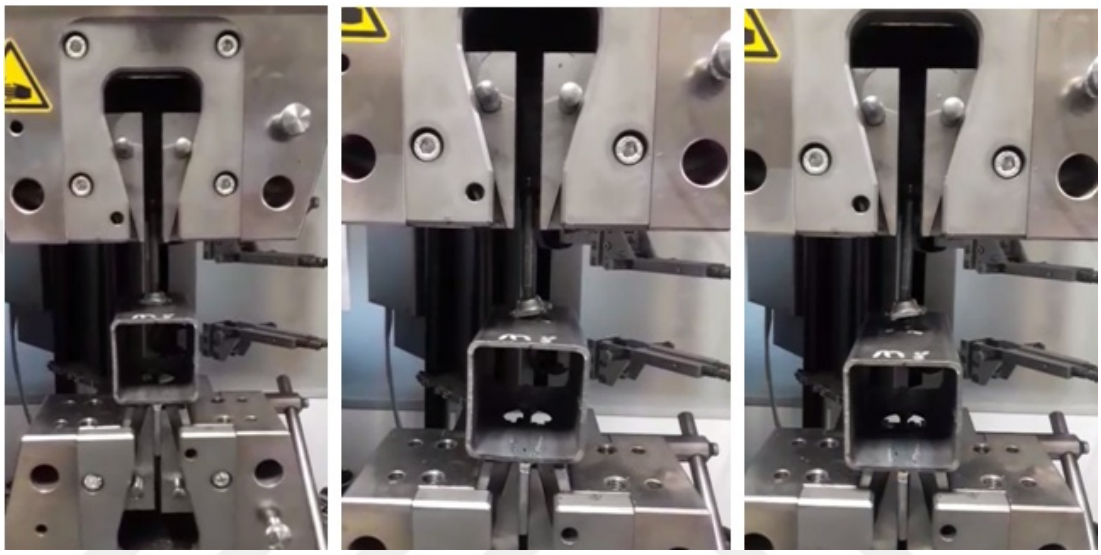
Şekil 3.20. Çekme testlerinin uygulandığı test cihazı

Çizelge 3.7 Çekme testlerinde kullanılan test cihazı özellikleri (Anonim 2005)

Test Cihazı Özellikleri	Değerleri
Maksimum Test Kuvveti (Çekme/Basma) (kN)	100
Gövde Sütun Sayısı	2
Maksimum Kafa Hareket Mesafesi(Tutucusuz) (mm)	320
Test Hızı (mm/dak)	0,0005-600
Test Cihazı Yüksekliği (mm)	2188
Test Cihazı Genişliği (mm)	1006
Test Cihazı Eni (mm)	620
Test Alanı Yüksekliği (mm)	1068

Çizelge 3.7 Çekme testlerinde kullanılan test cihazı özellikleri (devam)

Test Cihazı Ağırlığı (kg)	1200
Zemine Uygulanan Yük (kg/cm^2)	1,7-1,9
Cihaz Test Kafasının Pozisyon Kararlığı (µm/impuls)	0,0083
Pozisyon Hassasiyeti (µm)	± 2



Şekil 3.21. Numunelerde çekme testinin uygulanması

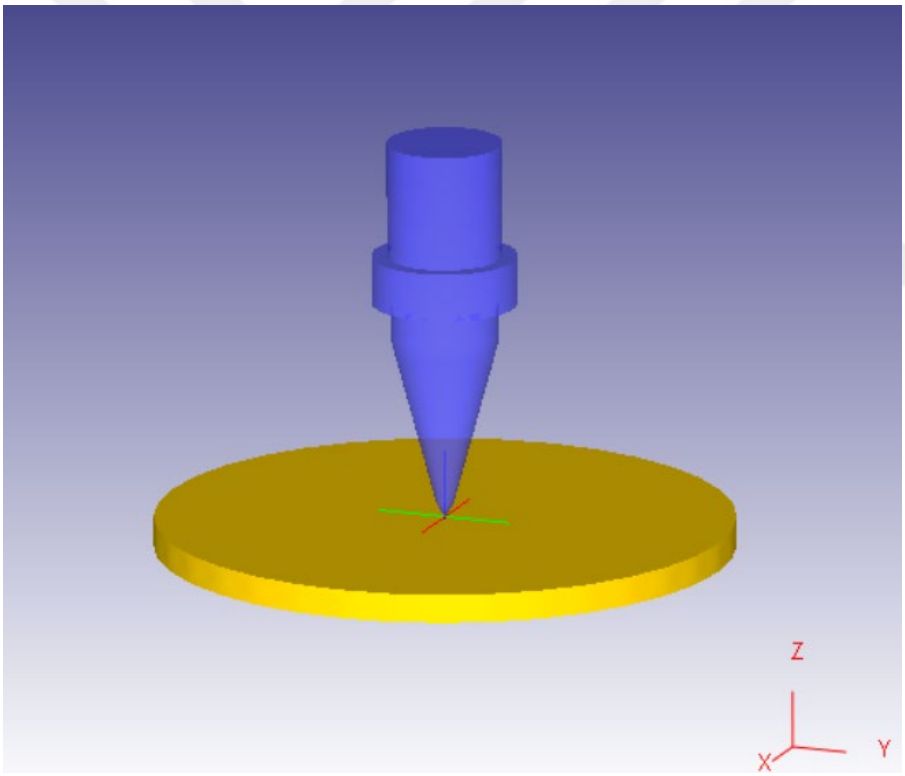
3.4. Sürtünmeli Delme Prosesinin Sonlu Elemanlar İle Analizi

Sürtünmeli delme prosesinde takım ve iş parçası yüksek sıcaklıklara ulaşarak iş parçasında çok yüksek seviyede deformasyon gerçekleşir. Sürtünmeli delme sırasında deneysel olarak ölçümü zor olan malzeme akışı, bölgesel sıcaklık değişimi, gerilme ve gerinimleri görmek ve anlamak için sonlu elemanlar metodu önemli bir araçtır. İncelenen literatür çalışmalarında da konuyla alakalı olarak farklı analiz çalışmalarının yapıldığı gözlemlenmiştir. Proses için önemli olan birçok parametre sonlu elemanlar metodu ile analiz edilerek geliştirilmesi ve ortaya konması mümkün olacağı görülmüştür.

Tasarımı yapılacak olan sürtünmeli delme ünitesinde delinecek olan delik kapasitesi M6-M12 olarak belirlenmiştir. Tasarım öncesi prosesin sonlu elemanlar metodu ile

simülasyonu, prosesin davranışını incelemek amacıyla, aynı zamanda kullanılacak olan takım ucu ve diğer komponent seçimleri için ön bilgi elde etmek amacıyla yapılmıştır. Maksimum itme kuvveti, tork ve sıcaklık değerleri maksimum delik çapında oluşacaktır. Bu sebeple M12 deliğin sürtünmeli delme ile simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz, yüksek deformasyonlar içeren karmaşık metal şekillendirme işlemlerinin 3D akışını analiz etmek için kullanılan Deform-3D yazılımı ile yapılmıştır.

Analizde kullanılmak üzere, M12 delik için deneylerde kullanılan Ø11,1 mm çapına sahip takım ucu ve Ø60 mm çapında ve 2 mm et kalınlığındaki iş parçası Solidworks 2020 Cad programında modellenmiştir. Step formatında kaydedilen takım ve iş parçası modeli 3D-Deform analiz programına aktarılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Sürtünmeli delme için hazırlanan sonlu elemanlar analiz modeli

Takım malzemesi tungsten karbür (WC) ve iş parçası malzemesi olarak seçilen AISI 1045 çeliği özelikleri Deform-3D kütüphanesinden seçilmiştir. Takım ucu malzemesi tungsten karbüre ait mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.8'de belirtilmiştir. AISI

1045 çeliğine ait kimyasal bileşim Çizelge 3.9'da ve proseste önem arz eden diğer termal özellikler devamında özetlenmiştir.

Çizelge 3.8 Takım ucu malzemesi(tungsten karbür) mekanik ve fiziksel özellikleri (Deform 3D Kütüphanesi)

Özellik	Değer
Elastikiyet Modülü (Mpa)	650 000
Poisson Oranı	0,25
Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)	5e-06
Isı Kapasitesi (N/mm2 /°C)	15
Isıl İletkenlik Katsayısı (N/s/°C)	59

Çizelge 3.9 İş Parçası Malzemesi AISI 1045 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi (Deform-3D Kütüphanesi)

Element	Kimyasal Max Değer (%)
Karbon (C)	0,43-0,50
Mangan (Mn)	0,60-0,90
Kükürt (S)	<0,050
Fosfor (P)	<0,040
Silisyum (Si)	0,10-0,30

İş parçasında oluşacak olan kalıcı şekil değişiminden dolayı iş parçası tipi için plastik deformasyon tanımlaması yapılmıştır. Takımdaki takım aşınması önemsenmediğinden dolayı rijit tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca Deform-3D yazılımında iş parçası malzemesi olan AISI 1045 çeliği için plastik deformasyon hesaplamasında kullanılacak akış-gerilme model fonksiyonu Denklem 3.1'de belirtilmiştir.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \tag{3.1}$$

Burada;

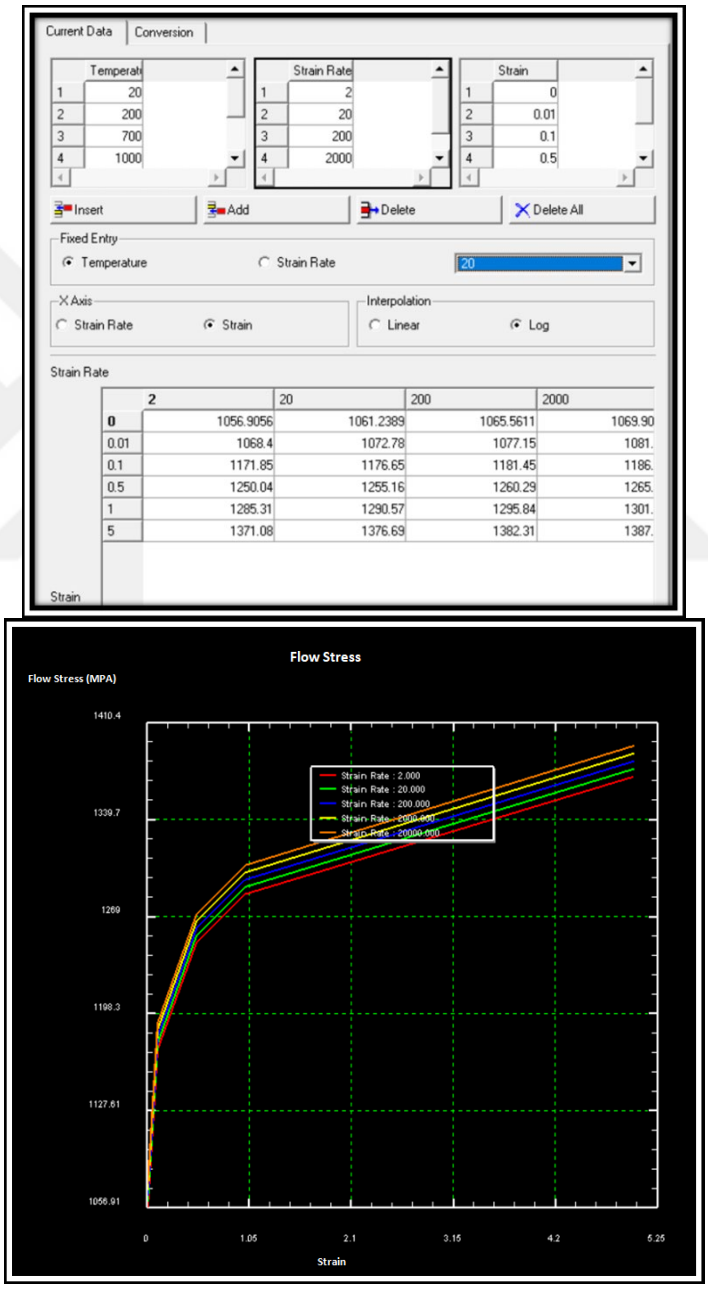
$\bar{\sigma}$: Akış gerilmesi

ε: Etkin şekil değiştirme

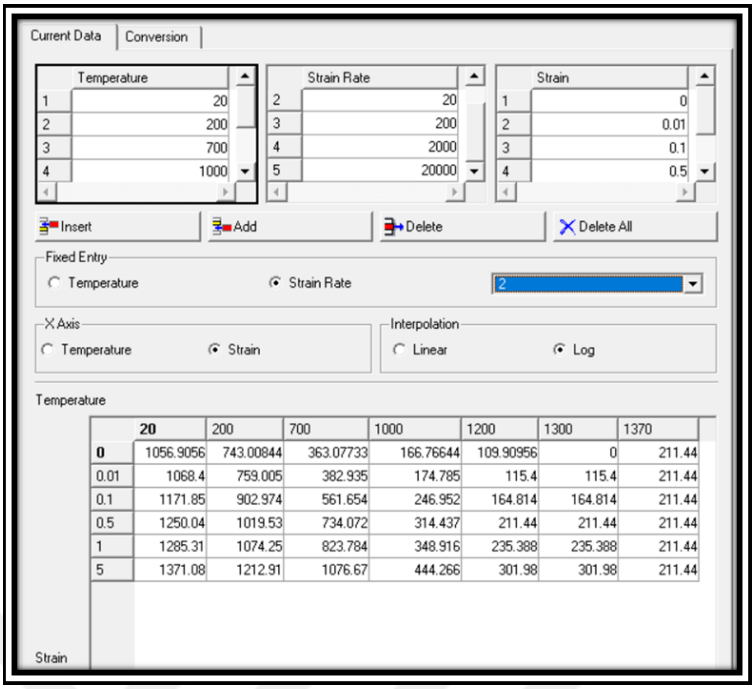
T: Etkin şekil değiştirme hızı

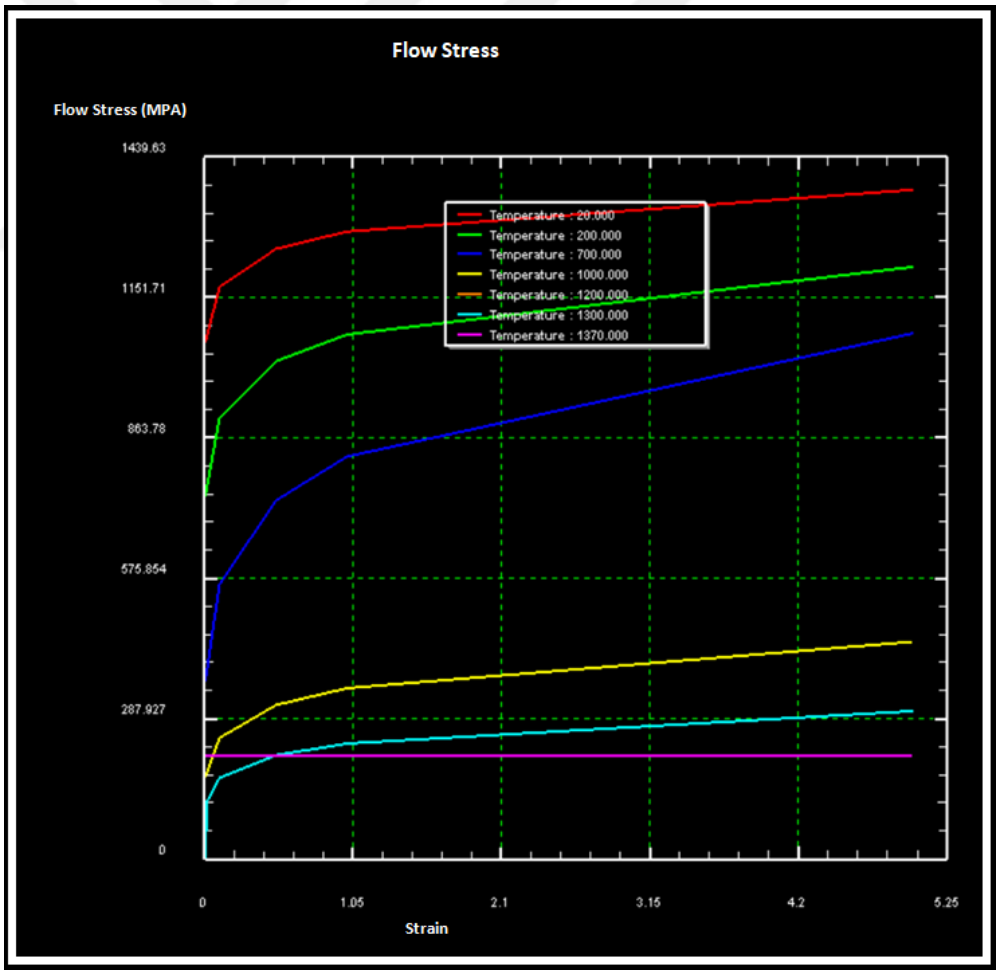
ε: Sıcaklık

Analiz malzeme modelinde kullanılan AISI 1045 çeliğine ait akma gerilmesinin, şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak, şekil 3.23'te sabit sıcaklıkta şekil değiştirme hızına göre, şekil 3.24 'te sabit şekil değiştirme hızında sıcaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



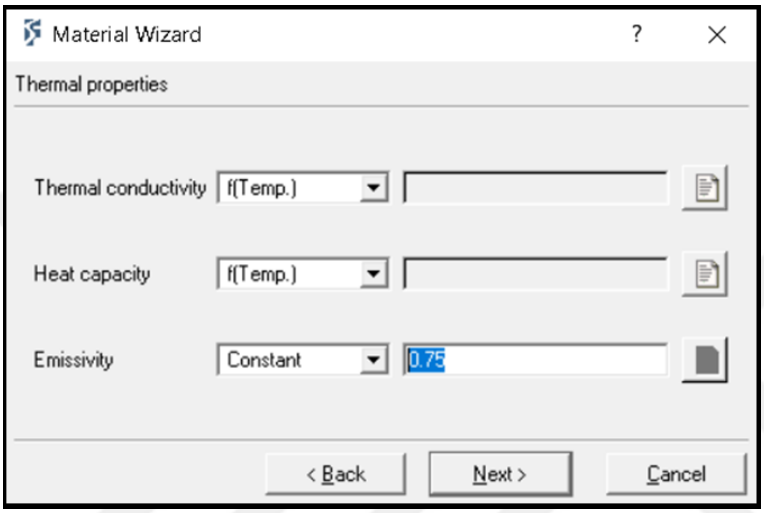
Şekil 3.23. İş parçası malzemesi AISI 1045 için sabit sıcaklıkta, şekil değiştirme hızına bağlı bağlı akma gerilmesi



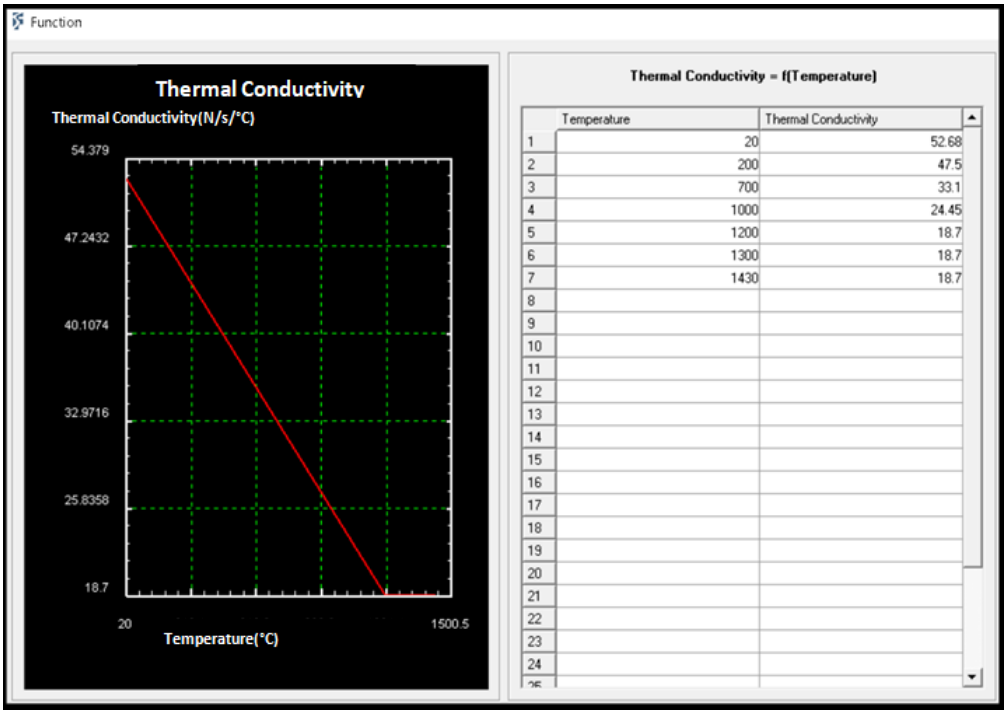


Şekil 3.24. İş Parçası malzemesi AISI 1045 için sabit şekil değiştirme hızında, sıcaklığa bağlı akma gerilmesi

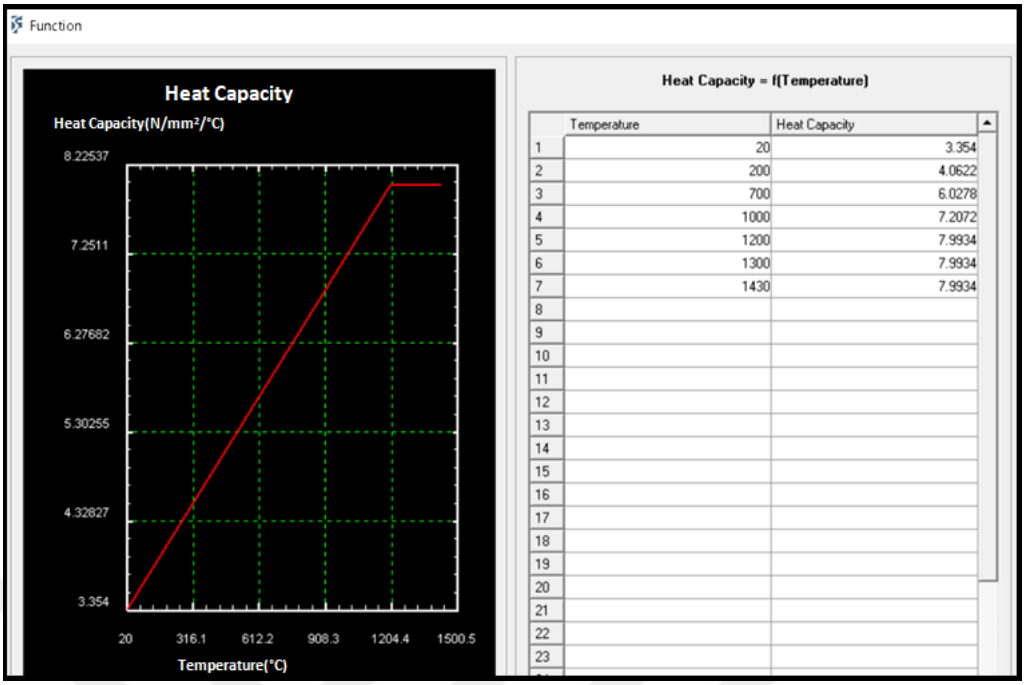
Sürtünmeli delme prosesi ile takım ve iş parçası sürtünmesi sonucu açığa çıkan ısı ve sonrasında oluşan şekil değişimi sebebiyle malzemenin termal karakteristiklerinin doğru girilmesi, analiz sonuçlarının gerçekliğe yakın olması anlamında önem arz etmektedir. AISI 1045 çeliği için malzemenin termal özelliklerinden yayınırlık katsayısı sabit 0,75 değeri, ısıl iletkenliği ve ısı kapasitesi değerleri sıcaklığın fonksiyonu olarak girilmiştir (Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27).



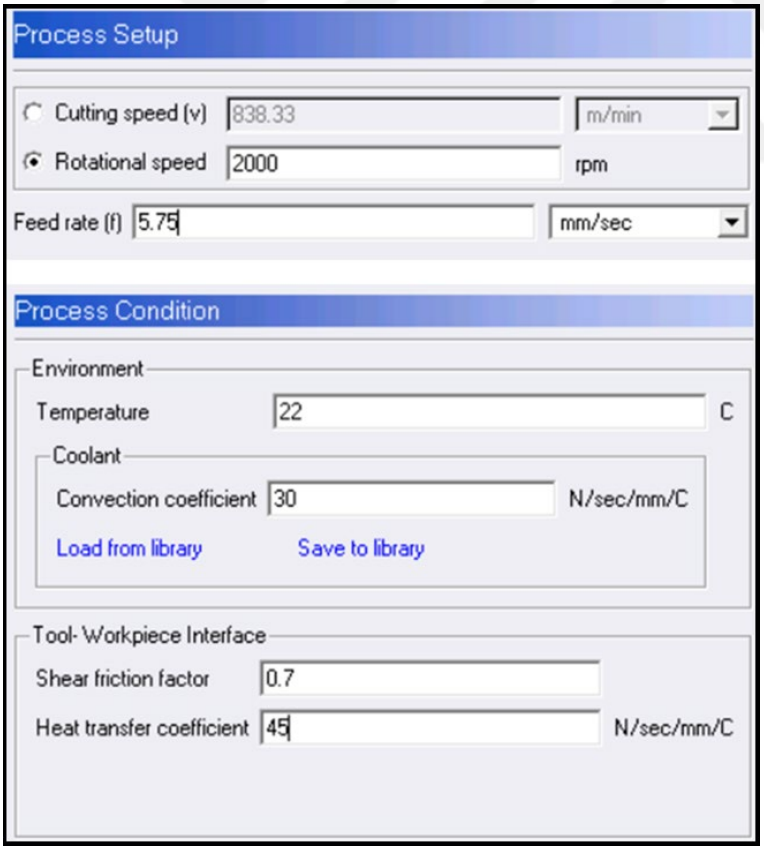
Şekil 3.25. AISI 1045 için girilen yayınırlık katsayısı



Şekil 3.26. İş AISI 1045 için sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik grafiği



Şekil 3.27. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı ısı kapasitesi grafiği



Şekil 3.28. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan proses parametreleri

Analiz proses parametrelerinden dönme hızı 2000 rpm ve ilerleme hızı 5,75 mm/sn olarak girilmiştir. Dönme hızı deneysel çalışmalarda kullanılan Çizelge 3.3'ten alınmıştır. M12 sürtünmeli delme takım ucu takıma dalan kısmın boyu 23 mm ölçüsündedir. Proses süresi M12 için 4 sn olarak verilmiştir. Prosesin ilerleme hızı Denklem 3.2 ile hesaplanarak bulunmuştur.

$$L_m = V_p \cdot t_p \quad (3.2)$$

V_p : M12 sürtünmeli delme prosesi ilerleme hızı

L_m : M12 sürtünmeli delme matkabının boyu (mm)

t_p : M12 sürtünmeli delme proses süresi (s)

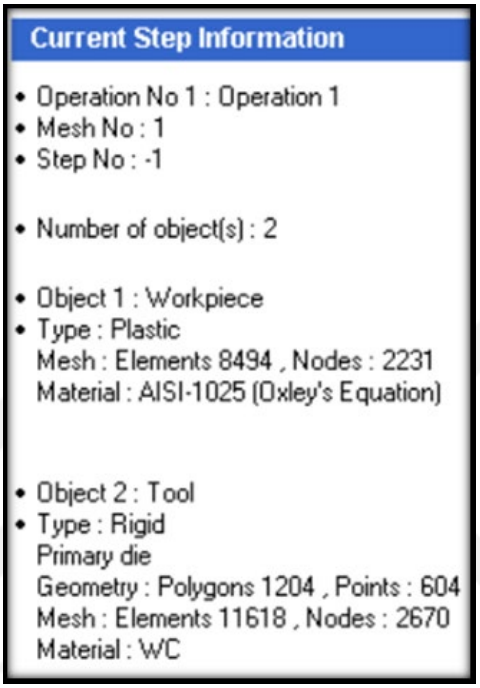
$V_p = L_m / t_p = 23$ (mm) / (s) $4 = 5{,}75$ mm / s

İş parçasının yüzeyi 30 N/s/mm/°C konveksiyon katsayısı ve 22°C çevre sıcaklığı ile serbest konveksiyon altında olarak tanımlanmıştır. İş parçasının ve takımın da başlangıç sıcaklığı 22°C girilmiştir. İş parçası ve takım arası ısı transfer katsayısı 45 N/s/mm/°C olarak girilmiştir. İş parçası ve takım arası sürtünme katsayısı 0,7 olarak girilmiştir. Sürtünme katsayısı, Hacaloğlu ve ark (2019) tarafından tungsten karbür takım ucu ve AISI 1045 çeliği ile yaptıkları deneysel çalışmadan elde ettikleri sonuç tablosu baz alınarak ortalama bir değer olarak alınmıştır.

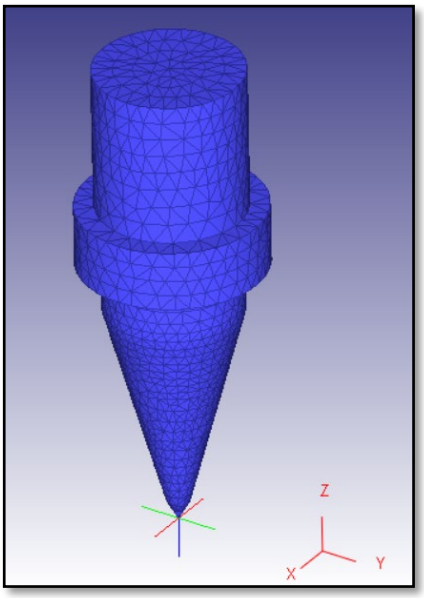
Pin tipi	Numune Tipi ve adı	Yük (N)	Hız (mm/s)	Sürtünme katsayısı ortalama değeri
Kaplamasız Karbür (WC-Co) uç	C45-1	4.5	1333.33	0.74
	C45-2	1.6	1333.33	0.67
	C45-3	4.5	333.33	0.88
	C45-4	1.6	333.33	0.68
TiN kaplamalı karbür (WC-Co) uç	C45-5	4.5	1333.33	0.71
	C45-6	4.5	333.33	0.85
	C45-7	1.6	1333.33	0.72
	C45-8	1.6	333.33	0.86

Şekil 3.29. AISI 1045 çeliği deneysel ölçüm parametreleri ve sürtünme katsayısı sonuçları (Hacaloğlu ve Kaftanoğlu 2019)

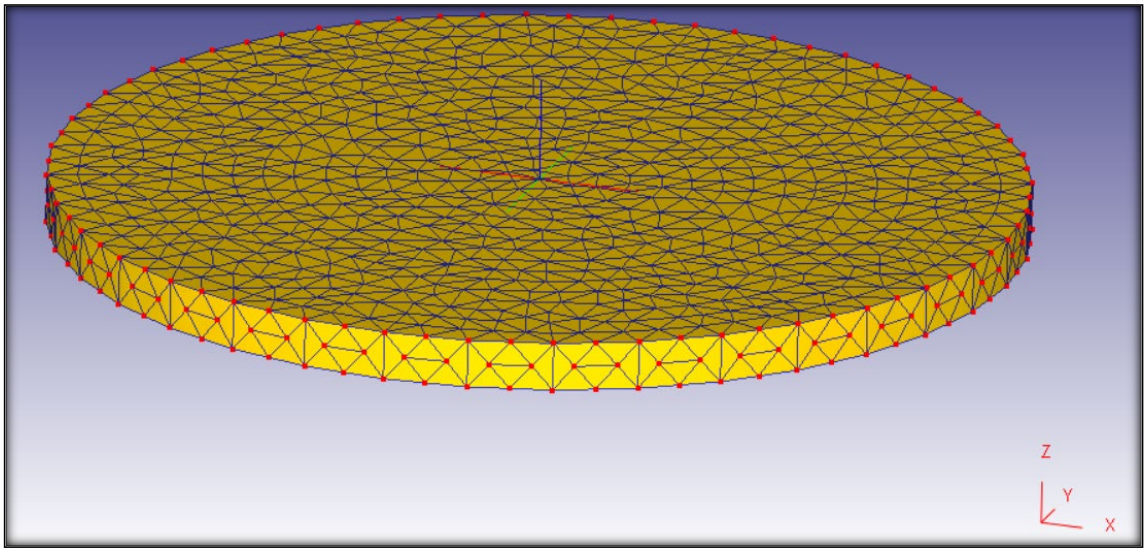
Oluşturulan analiz modelinde oluşturulan M12 sürtünmeli delme takım ucu ağ yapısı Şekil 3.31'de, iş parçası için oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Takım ucu için oluşturulan ağ yapısı 11618 adet tetrahedral geometriye sahip elemandan, iş parçasının ağ yapısı ise 8494 adet tetrahedral geometriye sahip elemandan oluşmaktadır.



Şekil 3.30. Deform-3D sürtünmeli delme analiz özet bilgileri



Şekil 3.31. Takım ucu ağ yapısı modeli



Şekil 3.32. İş parçası ağ yapısı modeli

Yapılan analizde sınır şartı olarak iş parçasının X,Y ve Z eksenlerindeki hareketi sabitlenmiştir. Takım ucu ise X ve Y doğrultularında sınırlandırılmış, Z eksen yönünde ilerleme hareketi ve dönme hareketi verilmiştir.

Analiz sonucunda M12 sürtünmeli delik delme sonrası iş parçasındaki oluşan kovan yapısı, bölgesel sıcaklık dağılımı, gerilme dağılımı, gerinim dağılımı ve eksenel yük grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Bölüm 4'te detaylı olarak açıklanmıştır. Maksimum delik kapasitesi olan M12 sürtünmeli delme için takıma gelen maksimum eksenel yük 7960 N olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değerin literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde yaklaşık olarak makul bir değer olduğu görülmüştür. Bu değer sürtünmeli delme ünitesi vidalı mil, lineer kızak, servo motor ve redüktör hesaplamalarında ilave emniyet katsayıları ile birlikte kullanılarak ürün seçimleri gerçekleştirilmiştir.

3.5. Lazer Profil Makinesi İçin Sürtünmeli Delme Ünitesi Tasarımı

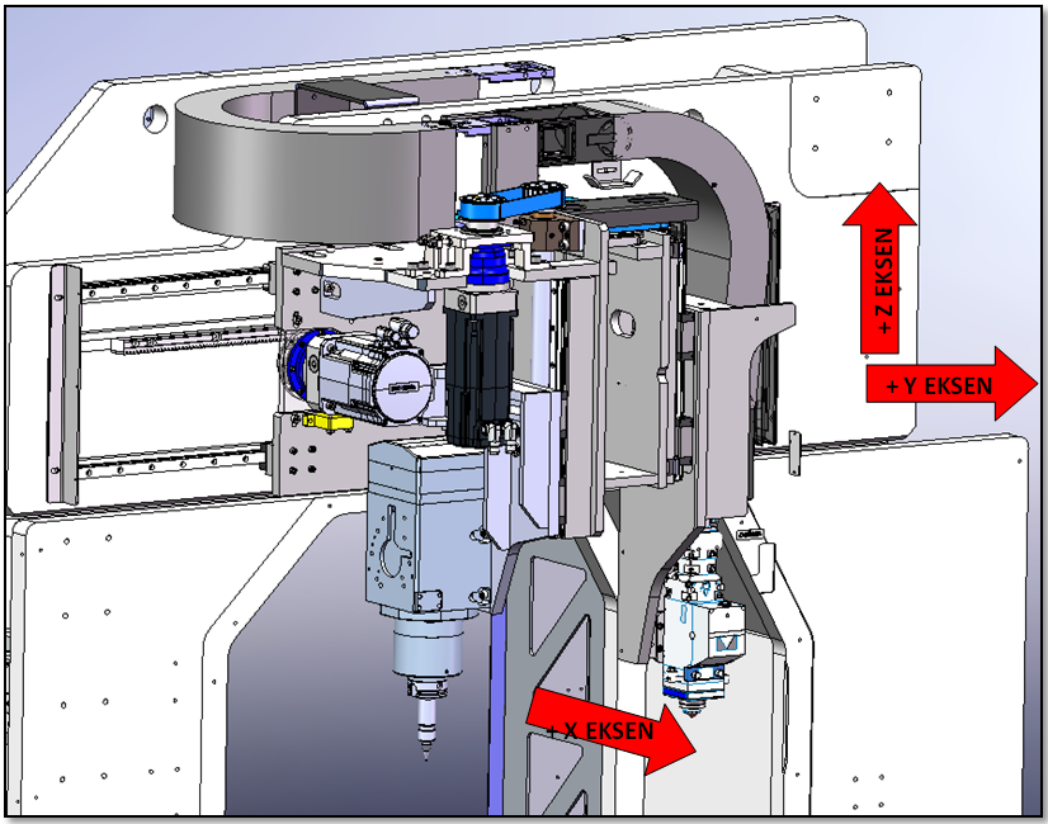
Lazer profil kesim makinelerinde , kesim kafasının hareketi için farklı tip konstrüksiyon tasarımları mevcut olsa da genel olarak Y ve Z eksen yönlerindeki hareketin sağlanması için makine ana gövdesine bağlı 1 adet Y eksen grubu ve bu Y eksen gövdesine bağlı 1 adet Z eksen gövdesi bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında sürtünmeli delmenin yapılacağı ikinci bir Z ekseni barındıran özel Y eksen grubu tasarımı ile sürtünmeli delme ve lazer kesim ünitesinin ortak Y eksen üzerinde hareket etmesi amaçlanmıştır. Bu sayede sürtünmeli delme ve lazer kesim operasyonları için Y eksen yönündeki hareket motorunun ortak olması sağlanacak ve ünitenin az yer kaplayan daha kompakt bir konstrüksiyona sahip olması sağlanacaktır. Y eksen motorunun ortak olması maliyet açısından kazanç sağlayacak ayrıca sürtünmeli delme ve lazer ünitesinin sahip olacağı kompakt yapı sayesinde mevcut makine gövdesine adaptasyonu mümkün olacaktır. Tasarım çalışmaları Solidworks 2020 cad programında yapılmıştır.

Çalışmada sürtünmeli delmenin yapılacağı Z1 eksen tasarımı, lazer kesim işleminin yapılacağı Z2 eksen tasarımı ve Y eksen grubu tasarımı yapılmıştır (Şekil 3.33). Sürtünmeli delme ünitesinde delik delme ve diş çekme prosesleri sırasında yüksek itme kuvvetleri oluşmaktadır. Ayrıca proses sırasında düşük ilerleme hızlarına ihtiyaç vardır. Lazer kesim ünitesinde ise düşük ağırlık mevcut olup ekstra bir karşı yük söz konusu değilken, lazer kesim sırasında daha yüksek hız ve ivme ihtiyacı söz konudur. Bu yüzden Sürtünmeli delme ünitesinde spindle motoru hareket ettirecek Z1 eksen gövdesi ve her iki Z ekseni taşıyacak Y eksen gövde konstrüksiyon malzemesi olarak St 44 çeliği, lazer kesim ünitesi (Z2 eksen) gövde konstrüksiyon malzemesi olarak AlMg3 (5754) alüminyum alaşımı seçilmiştir. Y eksen gövde konstrüksiyon malzemesinin, tasarım sonrasında yapılan statik analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile doğrulaması yapılmıştır.

Eksen tasarımlarında kullanılacak olan motorlar, redüktörler, lineer kızak, lineer kızak arabaları ve diğer mekanik sistem elemanları gerekli analitik hesaplamalar yapılarak ve ürün katalog verileri dikkate alınarak seçilmiştir. Özellikle spindle motor seçimi konusunda ürün tedarikçisinden destek alınmıştır. Analitik hesaplamalar ile seçimleri yapılan ürünlerin ilgili paket programlarda uygun mekanik sistem tanımlamaları yapılarak doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Y eksen gövde konstrüksiyon malzemesi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek seçimin doğruluğu incelenmiştir. Ürün seçimlerinde lazer profil kesim tezgahında önem arz eden eksen hızları, ivmeleri ve kesim hassasiyeti gibi önemli kriterler dikkate alınmıştır. Lazer profil kesim

makinesinin kesim tarafını oluşturan kesim gövdesi ve sürtünmeli delme ünitesini barındıran Y-Z eksen grubu tasarımı ve makinenin eksen tanımlaması Şekil 3.33 ‘ te gösterilmiştir. Lineer kızak arabası hesaplamalarında farklı koordinat sistemleri tanımlanarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.33. Lazer profil kesim makinesi sürtünmeli delik delme üniteli Y-Z eksen grubu tasarımı ve makine eksen gösterimi

Lazer profil kesim makinesinde kesim gövdesinin ön kısmında 1 adet merkezleme aynası ve X ekseni yönünde hareketli 1 adet sürücü hareketli ayna bulunmaktadır. Kesilecek profil öncelikle sürücü ayna tarafından tutulur ve sonrasında +X eksen yönünde hareket ettirilerek kesim bölgesine sürülür. Tasarlanan Y-Z eksen grubu Y ve Z yönündeki hareketler ile merkezdeki profile yaklaşarak lazer kesim işlemi ve sürtünmeli delme operasyonlarını gerçekleştirir.

3.5.1. Sürtünmeli Delme Ünitesi Spindle Motor ve İlgili Ekipmanlarının Seçimi

Sürtünmeli delme ünitesi tasarımı için delik kapasitesi minimum M6 ve maksimum M12 delik olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada bu delik çaplarında delik delme ve diş çekme proseslerini yapabilen sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sürtünmeli delme takım ucu ve ovalama kılavuzu ile delme ve diş açma prosesleri için gerekli hız, tork, güç vs. değerleri firma kataloglarından alınmıştır (Şekil 3.34 ve Çizelge 3.11). Delme ve diş çekme prosesleri için ihtiyaç olan hız-tork değerlerini karşılayabilecek uygun spindle motor seçimi yapılmıştır.

WARM DRILL

MAKİNA AYARI

ÖLÇÜ	± %10 Devir rpm	± %10 Motor KW	± %10 Süre
M4	3000	0,8	2 sn
M5	3000	1,0	2 sn
M6	2800	1,0	2 sn
M8	2500	1,5	2 sn
M10	2200	1,8	3 sn
M12	2000	2,0	4 sn
M14	1800	2,2	5 sn
M16	1500	2,5	6,5 sn
G1/4"	1500	3,0	2 sn

* standard bir freze tezgahı için değerler verilmiştir.

Şekil 3.34. Takım uçları için proses katalog değerleri (Warmdrill firmasının katalog değerleri)

Maksimum delik çapı olarak belirlenen M12 delik delme ve diş açma proseslerinde en yüksek tork değeri oluşacaktır. Sürtünmeli delme işleminin yapılacağı Z1 eksende kullanılacak olan spindle motor seçimi maksimum tork ve hız değerlerine göre seçilmelidir.

M12 sürtünmeli delme prosesinde oluşacak maksimum tork değeri;

P (kW) = T (Nm) x n (rpm) / 9550 (3.3)

T (Nm) = 9550 x P (kW) / n (rpm) = 9550 x 2 / 2000

T (Nm) = 9,55 Nm olur.

M10 sürtünmeli delme prosesinde oluşacak maksimum tork değeri;

T (Nm) = 9550 x 1,8 / 2200 = 7,81 Nm olur.

M8sürtünmeli delme prosesinde oluşacak maksimum tork değeri;

T (Nm) = 9550 x 1,5 / 2500 = 5,73 Nm olur.

M6sürtünmeli delme prosesinde oluşacak maksimum tork değeri;

T (Nm) = 9550 x 1 / 2800 = 3,41 Nm olur.

Çizelge 3.10 Sürtünmeli delme prosesi için yaklaşık devir ve tork değerleri

Ölçü	Devir (rpm)	Tork (Nm)
M6	2800	3,41
M8	2500	5,73
M10	2200	7,81
M12	2000	9,55

Fanar marka ovalama kılavuzları ile ST 37 malzemeye diş çekilmesi için firmanın verdiği yaklaşık tork değerleri Çizelge 3.11'de belirtilmiştir. Kılavuzlar için katalogta verilen kesme hızına göre devir hızı hesapları yapılmıştır.

n (rpm) = V_c (m/dak) x 1000 / π x D (m) (3.4)

Vc= 15 m/dak olarak önerilmiştir.

M6 diş çekme için dönme hızı;

D= 5,5 mm

n (rpm) =15 x 1000 (mm/dak) / π x 5,5 (mm) = 868,1 d/dak olarak hesaplanmıştır.

M8 diş çekme için dönme hızı;

D= 7,4 mm

n (rpm) =15 x 1000 (mm/dak) / π x 7,4 (mm) = 645,.2 d/dak olarak hesaplanmıştır.

M10 diş çekme için dönme hızı;

D= 9,40 mm

n (rpm) =15 x 1000 (mm/dak) / π x 9,40 (mm) = 507,9 d/dak olarak hesaplanmıştır.

M12 diş çekme için dönme hızı;

D= 11,1 mm

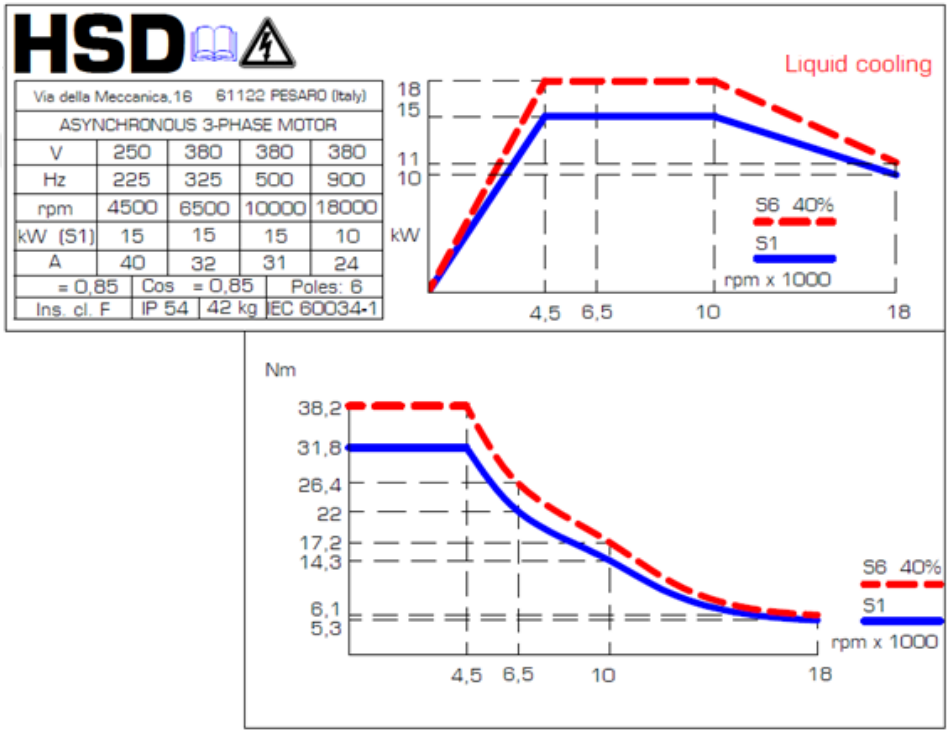
n (rpm) =15 x 1000 (mm/dak) / π x 11, 1mm = 430,1 d/dak olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.11 Fanar marka ovalama kılavuzları ile ST37 malzemeye diş çekme için verilen ortalama devir ve tork değerleri

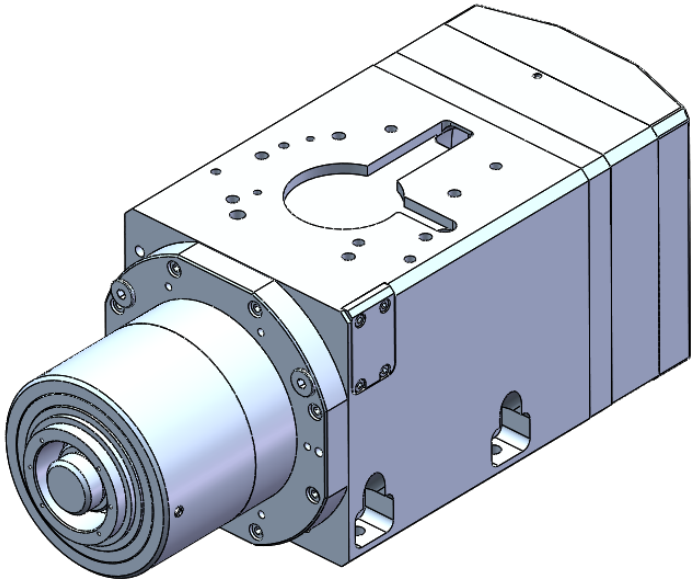
Ölçü	Devir (rpm)	Tork (Nm)
M6	868,1	5
M8	645,2	8
M10	507,9	15
M12	430,15	28

Firma kataloglarından verilen değerler doğrultusunda belirlenen M6-M12 delik kapasitesi için hesaplanan ve verilen tork-devir aralıklarına uygun HSD marka ES779 H6161H1661 HSK A63 model spindle motor seçimi yapılmıştır. Lazer profil kesim makinesi tam otomatik olarak çalışan bir makine olması sebebiyle otomatik takım değiştirme özelliğine sahip spindle motor seçilmiştir. Bu özellik ile ileri tasarlanabilecek yedek takım istasyonunda bekleyen takım ve takım tutucuların eksen hareketleri yönetilerek otomatik salma ve kitleme özelliğiyle takım değiştirme işlemini hızlı ve otomatik olarak yapılabilmesi mümkün olacaktır. Spindle motor tutucu girişi HSK A63 standırdına sahiptir. Bu yüzden sistemde kullanılan takım tutucular HSK A63 giriş özellikli olarak seçilmiştir.

Seçilen spindle motora ait hız-tork grafiği Şekil 3.35'te belirtilmiştir. M6 Sürtünmeli delme prosesi esnasında maksimum hız ve minimum tork ihtiyacı olduğu Çizelge 3.10'da belirtilmiştir. Minimum hız ve maksimum tork ihtiyacının M12 kılavuz çekme prosesi sırasında olduğu Çizelge 3.11'de görülmektedir. Bu değerlere göre spindle motor karakteristik tork-hız grafiği incelendiğinde 4500 rpm hızına kadar istenilen tork değerlerini karşılayabildiğini göstermektedir.



Şekil 3.35. Spindle motor teknik özellikleri ve hız-tork grafiği (Anonim 2018)



Şekil 3.36. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan spindle motor

Spindle motora ait teknik özellikler Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12 Spindle motor teknik verileri (Anonim 2018)

Takım tutucu tipi	HSK A63
Ağırlık	30 kg
Atalet momenti	0,006 kg.m2
Motor soğutma tipi	Sıvı soğutmalı
Soğutma sıvısı sıcaklığı	25 ± 3 °C
Motor tipi	3 fazlı asenkron
Motor gücü	15 kW
Nominal Hız	12000 rpm
Maksimum Hız	18000 rpm
Verim	0,91
Lineer enkoder markası	Lenord + Bauer

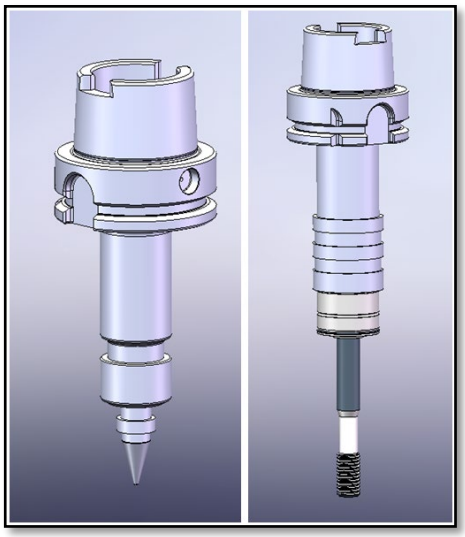
M12 delik delme sırasında malzemede oluşan maksimum sıcaklık yapılan proses analizinde 764,8 °C olarak bulunmuştur. Malzemede oluşan bu sıcaklıklar spindle motora da yüksek sıcaklık olarak yansıyacaktır. Yüksek sıcaklıkların spindle ve parçalarına zarar vermemesi için spindle sıvı soğutmalı özellikli olarak seçilmiştir. Seçilen spindle motora katalogta önerilen 25 ± 3 °C sıcaklığında soğutma sıvısının

gönderilmesi gerekmektedir. Lazer profil kesim makinelerinde kesim kafasındaki optiklerin ve lineer motorların soğutulması için soğutucu ekipmanı kullanılmaktadır. Soğutucu ekipmanının birden fazla kapalı devrede olması mümkün olabildiği için aynı anda farklı hatlarda ve sıcaklıklarda soğutma sıvısı gönderilebilmektedir. Makinedeki lazer kesim kafası için kullanılan soğutucu ekipmanı uygun seçilerek, spindle ve lazer kesim kafasının soğutulmasının ortak ekipman ile yapılması mümkün olacaktır.



Şekil 3.37. Soğutucu ekipmanı (IPG Soğutucu)

Seçilen spindle motor takım girişi HSK A63 standardına sahip olduğu için sistem tasarımında HSK A63 takım ve kılavuz tutucular kullanılmıştır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan takım tucular

3.5.2. Sürtünmeli Delme Ünitesi (Z1 Eksen) Vidalı Mil Seçimi

Tasarımda Rexroth marka vidalı mil ve yatakları kullanılmıştır. Sistemin maksimum çapta delik delme ve diş çekme çevrimi boyunca vidalı milin maruz kalacağı yük ve hız değerleri dikkate alınarak, belirlenmiş olan kullanım ömrü sürecinde problemsiz çalışması için emniyetli olarak seçimleri hedeflenmiştir. Yapılan analitik hesaplamalar Rexroth firması kataloglarında yer alan kritik hız grafiklerinden ve vidalı mil için izin verilen eksenel yük grafiklerinden kontrol edilerek doğrulaması yapılmıştır.

Sürtünmeli delme ünitesinin vidalı mil seçimi hesaplamalarında kullanılan M12 delik delme çevrimine ait kuvvet, vidalı mil dönme hızı ve proses süresi verileri özet olarak Çizelge 3.13'te belirtilmiştir. Maksimum çapta, maksimum kuvvet ve tork oluşacağı için hesaplamalar M12 deliğe göre yapılmıştır. Çevrim boyunca vidalı mile gelen kuvvet zaman grafiği ve vidalı mil dönme hızı zaman grafiği Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'ta gösterilmiştir.

M12 sürtünmeli delme proses analizinde elde edilen maksimum 7960 N eksenel yük değeri, hesaplamalarda 8000 N alınmıştır. Proses analizi sonuçları 4. Bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. M12 sürtünmeli delme için vidalı mil dönme hızı hesabı yapılmıştır.

$$n_p = 60 \cdot V_p / p_v \text{ (dev / dak)} \qquad (3.5)$$

n_p : M12 sürtünmeli delme vidalı mil dönme hızı

V_p : M12 sürtünmeli delme prosesi ilerleme hızı

p_v : Vidalı mil adımı (mm) (10mm olarak seçildi.)

$n_p = 60 \cdot 5.75$ (mm / dak) / 10 (mm) = 34.5 dev / dak olarak hesaplanmıştır.

M12 diş çekme için yanal kesme kuvveti hesabı yapılmıştır. Yanal kuvvetin dikey bileşeni vidalı mile gelen eksenel yükü ifade edecek olup, bu kuvvetten daha küçük değerdir. Fakat sürtünmeli delme sonrası malzemede bir miktar sertlik artışı söz konusu olabileceği için hesaplanan yanal kuvvet direkt olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Böylelikle kılavuz çekmede oluşacak eksenel yük olması gerekenden yüksek olacağı varsayımında bulunularak vidalı mil hesabının emniyetli yapılması hedeflenmiştir.

M12 kılavuz çekme prosesi sırasında maksimum kuvvet değeri oluşacağı için M12 için ilerleme hızı ve diş başına kesme kuvveti hesaplaması yapılmıştır

$F_i = p \cdot n$ (3.6)

F_i : Kılavuzun ilerleme hızı (mm / dak)

p : Kılavuzun hatvesi (mm)

n : Kılavuzun dönme hızı (rpm)

$F_i = 1.75 \cdot 430.15 = 752.75$ mm /dak olarak hesaplanmıştır.

$n_v = F_i / p_v$ (3.7)

n_v : M12 kılavuz çekme prosesi vidalı mil dönme hızı (rpm)

$n_v = 752.75$ (mm/dak) / 10 (mm)

$n_v = 75.275$ dev /dak olarak hesaplanmıştır.

$F_c = d_1 \cdot f_o \cdot k_c / 2$ (3.8)

F_c : Diş başına kesme /ezme kuvveti (N)

d_1 : Takımın nominal çapı (mm)

f_o : Kılavuzun dönüş başına ilerlemesi (mm)

k_c : İş parçası malzemesinin özgül direnci (Mpa) (2000 Mpa)

N: Kılavuzun kesme ağzı sayısı (Önerilen kılavuz için 3'tür)

$f_o = F / (n \cdot N)$ (3.9)

$f_o = 752.75$ (mm / dak) / (430.15. 3) (dev /dak) = 0.583 mm / dev

$F_c = 11.1 \cdot 0.583 \cdot 2000 = 6471.3$ N olarak bulunmuştur.

M12 kılavuzdan vidalı mile gelen eksenel yük değeri emniyetli olarak 7000 N olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. M12 kılavuz çekme sırasındaki vidalı mil ilerleme hızı da 75.27 rpm olarak hesaplanmıştır.

Sürtünmeli delme ünitesi toplam kütlesi 60kg'dır. Vidalı mil boşta harekette bu kütlenin ağırlık kuvveti etkisinde kalmaktadır.

$F_g = m \cdot g$ (3.10)

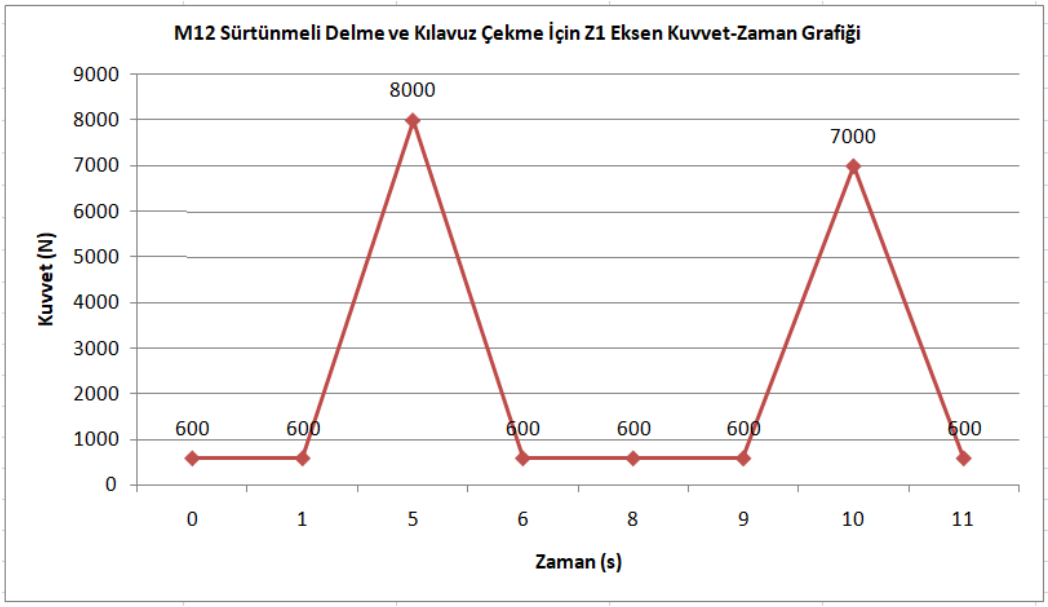
$F_g = 60$ (kg) . 9.81 (m / s^2) = 588.6 N

Boşta harekette vidalı mile gelen kuvvet 600N olarak alınmıştır. Sürtünmeli delme ünitesi hareketi için seçilen servo motorun nominal hız değeri n_0 = 3000 rpm 'dir. Ve kullanılan planet redüktörün çevrim oranı i =5 'tir. Bu yüzden sürünmeli delme ünitesinin boşta hareketi sırasındaki vidalı milin dönme hızı:

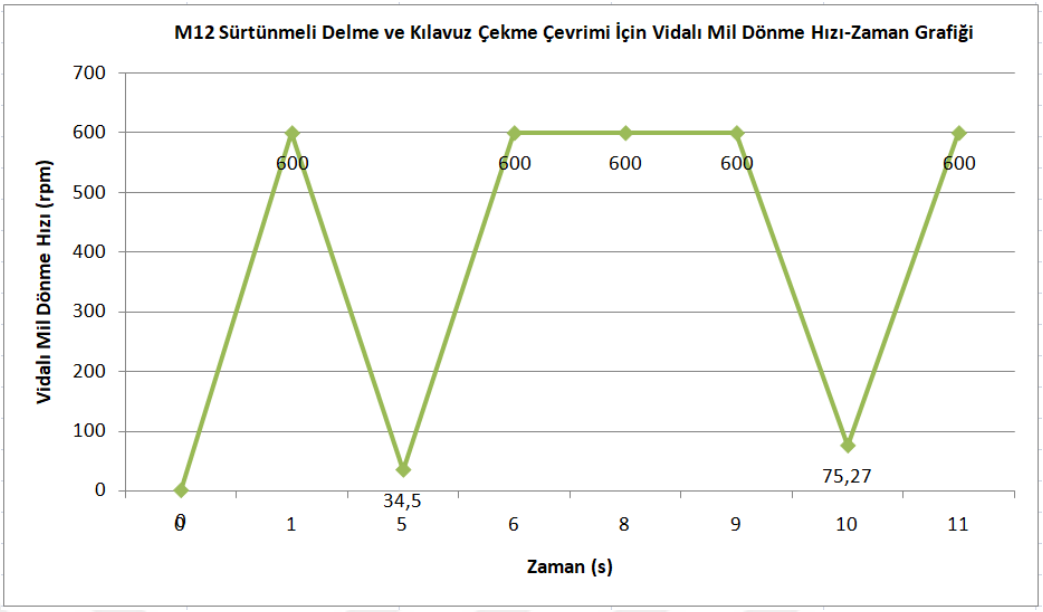
n= 3000 (rpm) /5 = 600 rpm olarak alınmıştır.

Çizelge 3.13 M12 delik delme proses çevrimi veri özet tablosu

Proses No	Proses	Proses Süresi (s)	Uygulanan Yük(N)	Vidalı Mil Dönme Hızı (rpm)
1	Duruş	0	600	0
2	Boşta İleri Gitme	1	600	600
3	Sürtünmeli Delme	4	8000	34.5
4	Geri Çekilme	1	600	600
5	Takım Değiştirme	2	600	600
6	Boşta İleri Gitme	1	600	600
7	Kılavuz Çekme	1	7000	75.27
8	Geri Çekilme	1	600	600



Şekil 3.39. Sürtünmeli delme ünitesi M12 delme- diş çekme proses çevrimine ait kuvvet-zaman grafiği



Şekil 3.40. Sürtünmeli delme ünitesi M12 delme- diş çekme proses çevrimine ait vidalı mil dönme hızı-zaman grafiği

Vidalı mil seçimi öncesi çevrim boyunca sistemin maruz kalacağı hızlar dikkate alınarak ortalama hız değeri (n_m) bulunmuştur. Sonrasında değişken hızlar ve yükler altında sistemin sahip olduğu ortalama yük değeri (F_m) hesaplanmıştır. Sistem için belirlenen kullanım ömrü süresi kriterine göre vidalı milin devir cinsinden ömür süresi hesaplaması yapılmıştır. Hesaplanan bu değerler kullanılarak vidalı mil seçim karakteristiği olan temel dinamik yük değeri (C) Newton cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplanan dinamik yük derecesi değerine göre Rexroth ürün kataloğundan sistem için emniyetli vidalı mil seçimi yapılmıştır.

$$n_m = \frac{q_1}{100}.n_1 + \frac{q_2}{100}.n_2 + \ldots + \frac{q_n}{100}.n_n \qquad (3.11)$$

n_m : ortalama hız (rpm)

q: tekil prosesin süresinin toplam çevrim süresine oranı (%)

$q_n = t_n / t_{toplam}$ (3.12)

t_{toplam} = 1+4+1+2+1+1+1=10s

q_1 = 1 /11= 9%

q_2 = 4 /11= 36%

q_3 = 1 /11= 9%

q_4 = 2 /11= 18%

q_5 = 1 /11= 9%

q_6 = 1 /11= 9%

q_7 = 1 /11= 9% olarak hesaplanır.

Hesaplanan qn değerleri formül (3.5)'te yerine konulursa;

$$n_m = \frac{9}{100} \text{ x } 600 + \frac{36}{100} \text{ x } 34.5 + \frac{9}{100} \text{ x } 600 + \frac{18}{100} \text{ x } 600 + \frac{9}{100} \text{ x } 600 + \frac{9}{100} \text{ x } 75.27 + \frac{9}{100}.600$$

n_m =343,2 (rpm) olarak hesaplanır.

$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 \; x \; \frac{q_1}{100} + F_2^3 \; x \; \frac{q_2}{100} + \cdots + F_n^3 \; x \; \frac{q_n}{100}} \qquad (3.13)$$

F_m : ortalama yük (N)

$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_1}{100} + F_2^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_2}{100} + F_3^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_3}{100} + F_4^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_4}{100} + F_5^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_5}{100} + F_6^3 \; x \; \frac{n_1}{n_m} \; x \; \frac{q_6}{100} + F_7^3 \; x \; \frac{q_7}{100}}$$

$$F_m = \sqrt[3]{600^3 \; x \; \frac{600}{343,2} \; x \; \frac{9}{100} + 8000^3 \; x \; \frac{34.5}{343,2} \; x \; \frac{36}{100} + 600^3 \; x \; \frac{600}{343,2} \; x \; \frac{9}{100} + 600^3 \; x \; \frac{600}{343,2} \; x \; \frac{18}{100} + 600^3 \; x \; \frac{600}{343,2} \; x \; \frac{9}{100} + 7000^3 \; x \; \frac{75.27}{343,2} \; x \; \frac{9}{100} + 600^3 \; x \; \frac{600}{343,2} \; x \; \frac{9}{100}}$$

F_m= 2943,5 N olarak hesaplanmıştır.

$$L = L_H \text{ x } n_m \text{ x } 60 \qquad (3.14)$$

L : Devir cinsinden vidalı mil ömrü

L_H : Saat cinsinden vidalı mil ömrü

L_H = 24 000 saat (Rexroth Katalog Önerisi)

L = 24 000 x 355.6 x 60 = 512 064 000 devir olarak hesaplanır.

$$C = F_M \text{ x } \sqrt[3]{\frac{L}{10^6}} \tag{3.15}$$

C : Dinamik Yük

$$C = 2943{,}5 \text{ x } \sqrt[3]{\frac{512\,064\,000}{10^6}} = 23\,549 \text{ N}$$

Sürtünmeli delme ünitesinin ilerleme hareketini sağlayacak Z1 eksen için seçilecek vidalı mil dinamik yük değeri 23 549 N ‘un üzerinde olmalıdır. Şekil 3.41’de belirtilen Rexroth kataloğundan 32 x 10R boyutunda FEM-E-B serili ve C2 önyükleme sınıfına dahil vidalı mil ve somun seçimi yapılmıştır.

C = 38 000 N (> 23549 N) eşitsizliğe göre sistem vidalı mili emniyetle çalışacaktır.

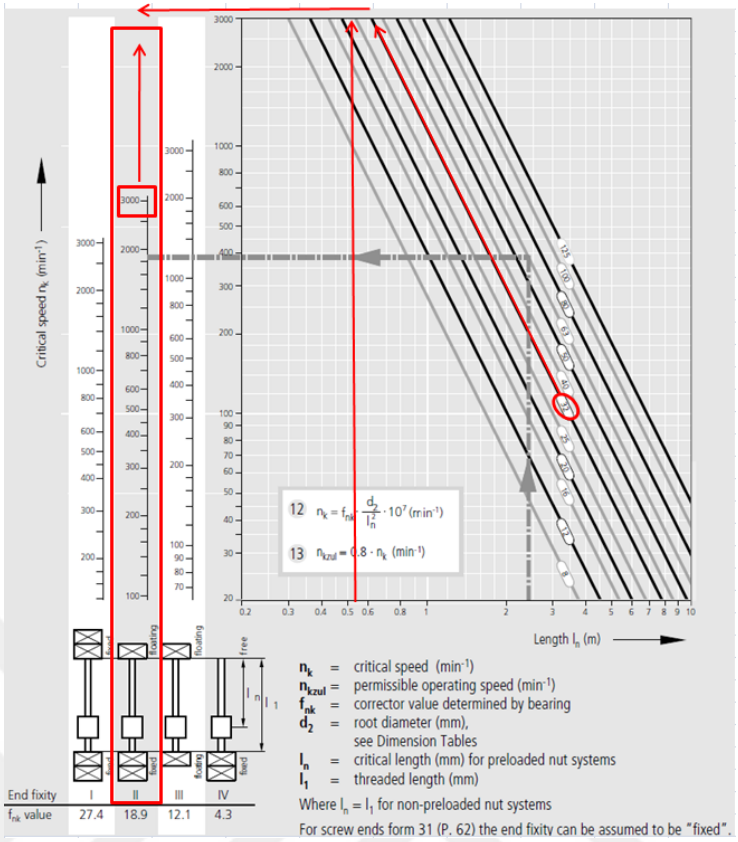


Ordering data:

BASA	20 x 5R x 3	FEM-E-B - 4	00	1	2	T7	R	82Z120	41Z120	1250	0	1

Category	Size d_0 x P x D_w - i	Part number	Load ratings[3] dyn. C (N)	stat. C_0 (N)	Linear speed[1] v_{max} (m/min)
A	16 x 5R x 3 - 4	R1502 010 63	14,800	16,100	30
A	16 x 10R x 3 - 3	R1502 040 83	11,500	12,300	60
A	16 x 16R x 3 - 3	R1502 060 63	11,200	12,000	96
A	20 x 5R x 3 - 4	R1502 110 83	17,200	21,500	30
A	20 x 10R x 3 - 4	R1502 140 63	16,900	21,300	60
A	20 x 20R x 3.5 - 3	R1502 170 63	16,000	18,800	120
A	25 x 5R x 3 - 4	R1502 210 83	19,100	27,200	30
A	25 x 10R x 3 - 4	R1502 240 83	18,800	27,000	60
A	25 x 25R x 3.5 - 3	R1502 280 63	17,600	23,300	150
A	32 x 5R x 3.5 - 4	R1502 310 83	25,900	40,000	23
A	32 x 10R x 3.969 - 5	R1502 340 84	38,000	58,300	47

Şekil 3.41. Rexroth marka flanşlı tek somunlu FEM-E-B tipi vidalı mil kataloğu (Anonim 2021a)



Şekil 3.42. Rexroth kataloğu vidalı mil kritik hız grafiği (Anonim 2021a)

$n_k = f_{nk} \times d_2 / l_n^2 \times 10^7$ (rpm) (3.16)

$n_{kzul} = 0{,}8 \times n_k$ (rpm) (3.17)

n_k : kritik hız (rpm)

n_{kzul} : izin verilen operasyon hızı (rpm)

f_{nk} : uç yataklama rulman tipine göre düzeltme faktörü

f_{nk} : = 18,9

d_2 : vidalı mil diş dibi çapı (mm)

d_2 = 27,9

l_n : sistem vidalı mil uzunluğu (mm)

l_n = 550 (mm)

$n_k = 18{,}9 \times 27{,}9 / 550^2 \times 10^7 = 17\,431{,}7$ rpm

$n_{kzul} = 0{,}8 \times 17\,431{,}7 = 13\,945{,}36$ rpm

Çizelge 3.13'te belirtildiği üzere vidalı mil maksimum 600 rpm hıza sahip olacaktır.

n_{max} = 600 <nkz = 13 945,36 rpm eşitsizliğine göre ve Şekil 3.42'de belirtilen kritik hız grafiğine göre hız açısından sistemin büyük oranda emniyetli olacağı doğrulanmıştır.

$$F_k = f_{Fk} \times d_2^4 / l_k^2 \times 10^4 \text{ (N)} \quad (3.18)$$

$$F_{kzul} = F_k / 2 \text{ (N)} \quad (3.19)$$

F_k : Vidalı mil üzerinde izin verilen teorik kuvvet

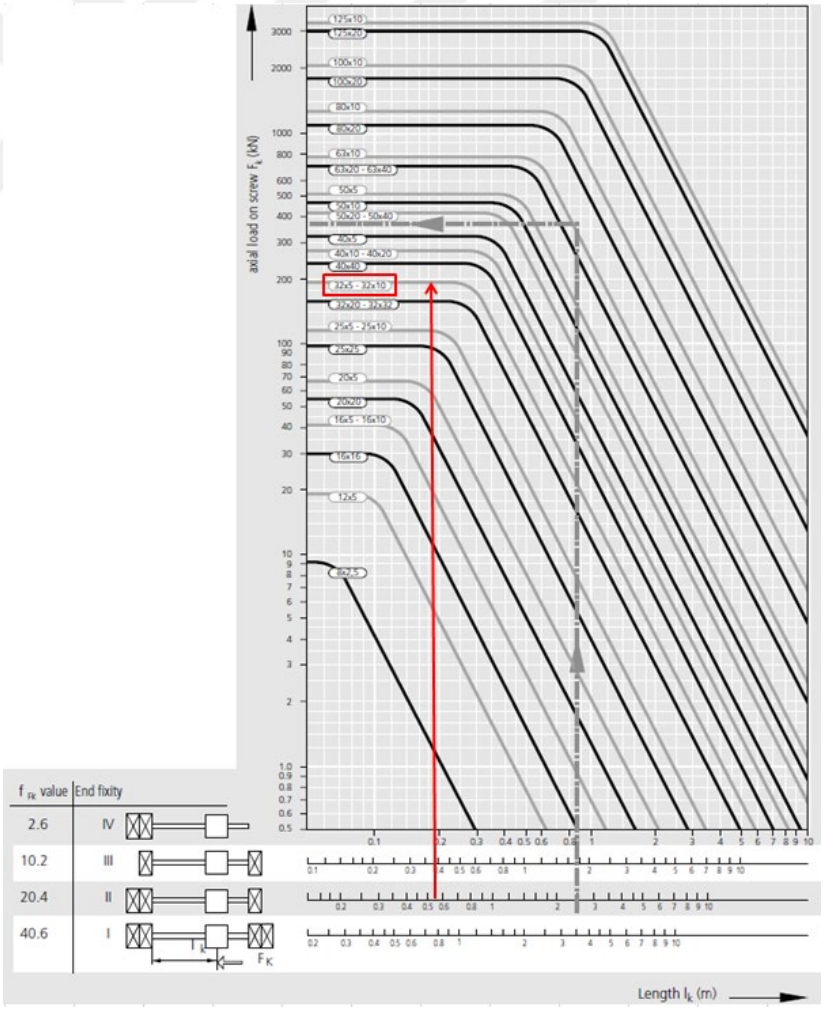
F_{kzul} : Operasyon boyunca izin verilen kuvvet

F_{Fk} : uç yataklama rulman tipine göre kuvvet düzeltme faktörü

f_{Fk} : = 20,4

$F_k = f_{Fk} \times d_2^4 / l_k^2 \times 10^4 = 20.4 \times 27.9^4 / 550^2 \times 10^4 = 408\,621{,}86$ N

$F_{kzul} = 408621{,}86 / 2 = 204\,310{,}9$ N

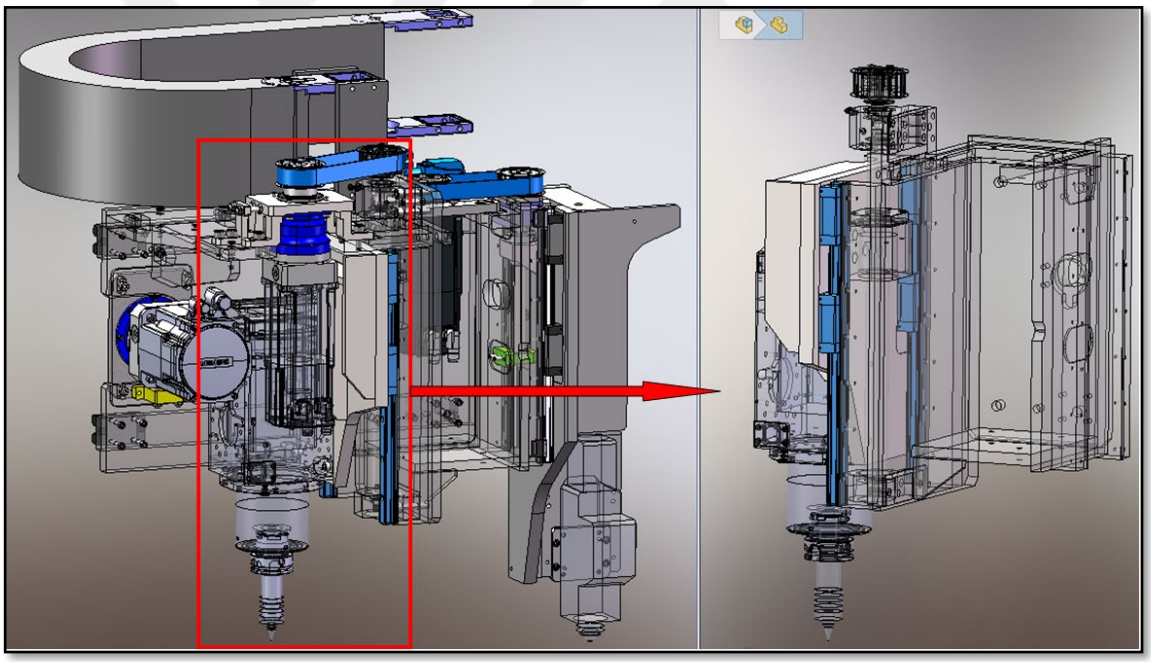


Şekil 3.43. Rexroth kataloğu vidalı mil izin verilen eksenel yük grafiği (Anonim 2021a)

Çizelge 3.13'te belirtildiği üzere vidalı mil maksimum 8000N kuvvete maruz kalacaktır. Vidalı mil için Şekil 3.43' de izin verilen teorik yük grafiğine göre ve Denklem 3.18 çözümüne göre seçilen 32 x 10R boyutlu vidalı milin maruz kalacağı yük açısından fazlasıyla emniyetli çalışacağı ortaya konmuştur.

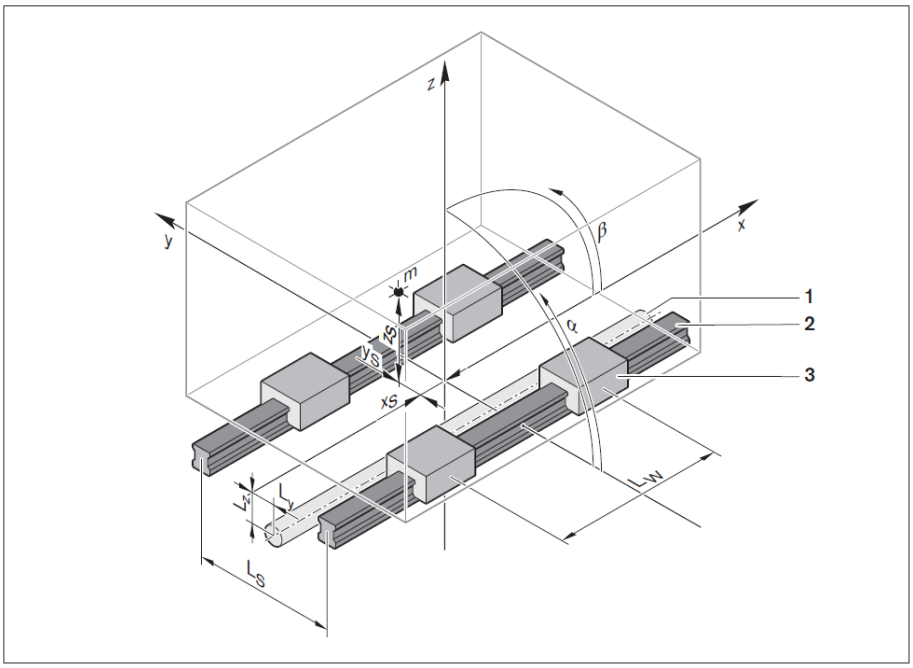
3.5.3. Sürtünmeli Delme Ünitesi (Z1 Eksen) Lineer Kızak ve Araba Seçimi

Tasarımda Rexroth marka lineer kızak ve araba kullanılmıştır. Sürtünmeli delme ünitesinin proses modeli oluşturularak her arabaya gelen yük hesaplaması yapılmıştır. Ürünün belirlenen yaşam ömründe problemsiz çalışabilmesi için maksimum yük miktarına göre ürün seçimi yapılarak, statik yük faktörü önerilen 4 değerinin üzerinde olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 3.44. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan (Z1 Eksen) lineer kızak ve arabaların pozisyonu

Her arabaya gelen yük hesabı yapılırken lineer kızak arabalarının orta noktası sistem orjini olarak kabul edilmiştir. Bu orjin noktasına göre sistemdeki ağırlık ve proses kuvvetinin oluşturduğu bileşke kuvvetler hesaplanarak arabalara gelen maksimum yükler hesaplanmıştır.



Şekil 3.45. 2 lineer kızaklı, 4 lineer kızak arabalı vidalı mil tahrikli sistem modeli (Anonim 2013)

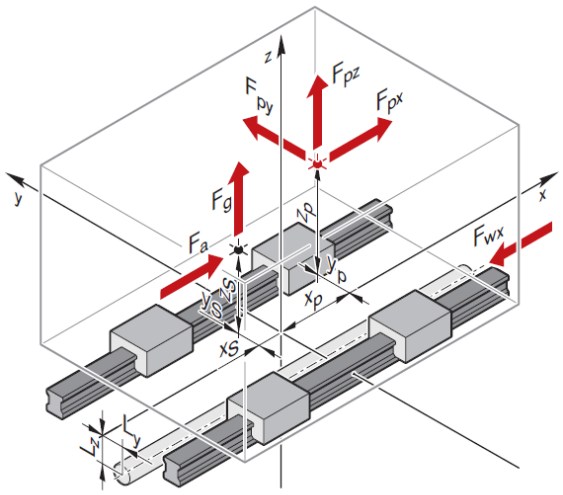
Çizelge 3.14 Lineer kızak ve araba sistem modeli parametre detayları

L_w (mm)	Lineer kızak arabaları arası mesafe
L_S (mm)	Lineer kızaklar arası mesafe
L_y (mm)	Tahrik vidalı milinin y yönündeki konumu
L_z (mm)	Tahrik vidalı milinin z yönündeki konumu
α (°)	Lineer kızakların x eksenine göre açısal konumu
β (°)	Lineer kızakların y eksenine göre açısal konumu
x_S (mm)	Sistem ağırlık merkezinin koordinat sisteminde x yönündeki konumu
y_S (mm)	Sistem ağırlık merkezinin koordinat sisteminde y yönündeki konumu
z_S (mm)	Sistem ağırlık merkezinin koordinat sisteminde z yönündeki konumu
m (kg)	kütle
x_p (mm)	Proses kuvveti noktasının x yönündeki konumu
y_p (mm)	Proses kuvveti noktasının y yönündeki konumu
z_p (mm)	Proses kuvveti noktasının z yönündeki konumu

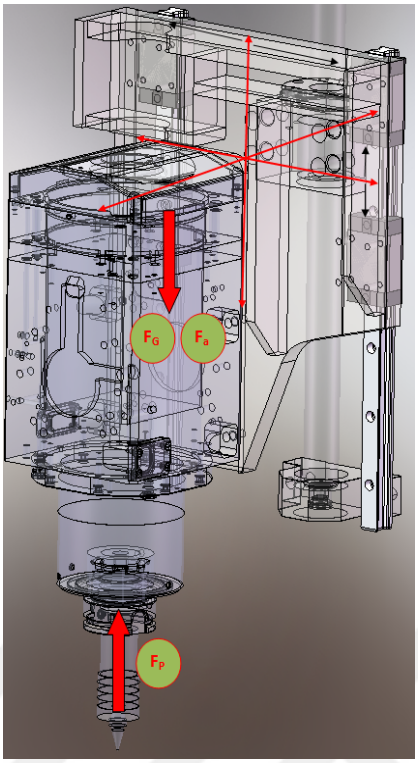
Şekil 3.46'da belirtildiği üzere sistemin sahip olduğu 4 arabalı ve 2 lineer kızaklı sistemde moment oluşmamaktadır. Arabalar F_z ve F_y bileşke kuvvetlere maruz kalacaktır. Hesaplamalarda da bu kuvvetlerin bulunması gerçekleştirilmiştir.

Scenario	Layout	Forces		Moments		
		in z-direction Lift-off/ down force	in y-direction Side load	about the X-axis Torsional moment	about the Y-axis Longitudi-nal moment	about the Z-axis Longitudi-nal moment
1	1 rail 1 runner block	F_z	F_y	M_x	M_y	M_z
2	1 rail 2 runner blocks	F_z	F_y	M_x	–	–
3	2 rails 2 runner blocks	F_z	F_y	–	M_y	M_z
4	2 rails 4 runner blocks	F_z	F_y	–	–	–
5	2 rails 6 runner blocks	F_z	F_y	–	–	–
6	2 rails 8 runner blocks	F_z	F_y	–	–	–

Şekil 3.46. Sistemdeki arabalarda oluşacak kuvvet ve moment bilgileri (Anonim 2013)



Şekil 3.47. 4 arabalı lineer sistemdeki kuvvetler ve kuvvet uygulama noktaları gösterimi (Anonim 2013)

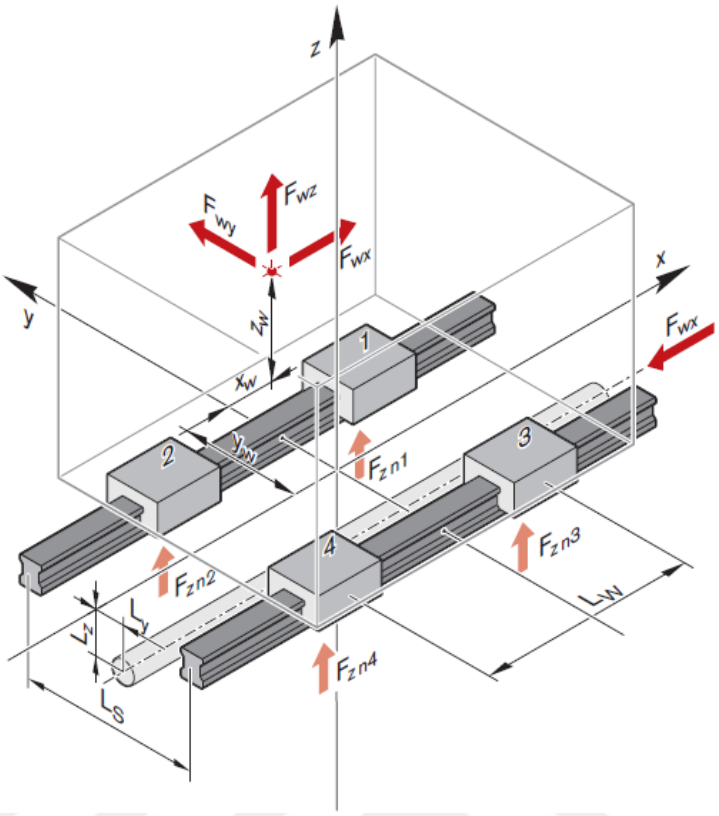


Şekil 3.48. Sürtünmeli delme ünitesindeki kuvvet noktaları

Çizelge 3.15 Sistemde oluşan kuvvet detayları

F_g (N)	Ağırlık kuvveti	$F_g = - m \times g$
F_a (N)	İvmelenme kuvveti	$F_a = - m \times a$
F_p (N)	Proses kuvveti	M12 delik delmede oluşan maksimum kuvvet

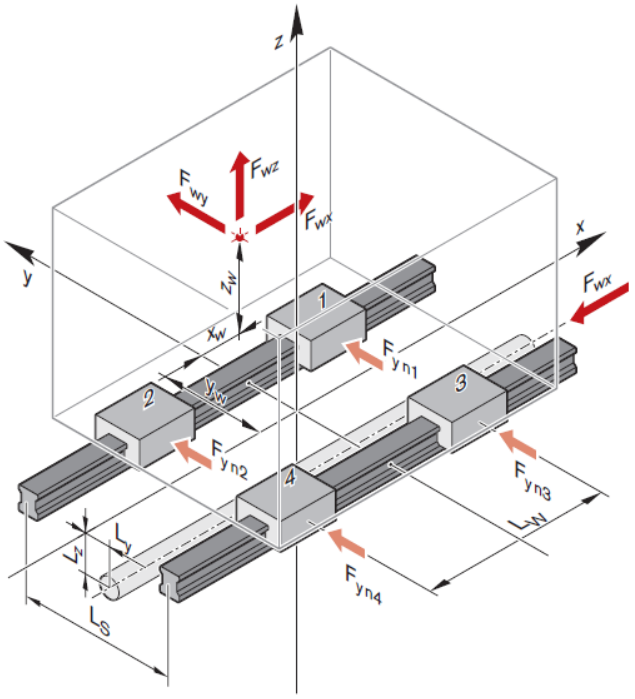
Sürtünmeli delme ünitesindeki lineer kızak arabaları ağırlık kuvveti, ivmelenme kuvveti ve proses kuvveti olmak üzere 3 tip kuvvete maruz kalmaktadır. Sistemdeki proses sırasındaki düşük ivme değerinin oluşturucağı düşük kuvvet değerleri ihmal edilerek hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. F_{WX} kuvveti bu 3 kuvvete karşı koyması gereken tahrik mekanizması olan vidalı milin uygulayacağı kuvveti ifade etmektedir. F_z ve F_y kuvvetleri bu 3 kuvvetin orjin noktasına göre arabalara etki ettiği bileşke kuvvetler olarak hesaplanmıştır. F_z ve F_y kuvvetlerinin bileşkeleri de her arabaya gelen toplam kuvvet değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.49. Lineer kızak arabalarına z eksen yönünde etki eden kuvvet gösterimi (Anonim 2013)

i	Formula
1	(3-25) $F_{zn1} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wz,j}}{4} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot y_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,j}\cdot z_{w,j}\right)}{2\cdot L_S} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot x_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,j}\cdot\left(z_{w,j}-L_z\right)\right)}{2\cdot L_W}$
2	(3-26) $F_{zn2} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wz,j}}{4} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot y_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,j}\cdot z_{w,j}\right)}{2\cdot L_S} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,j}\cdot\left(z_{w,j}-L_z\right)\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot x_{w,j}\right)}{2\cdot L_W}$
3	(3-27) $F_{zn3} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wz,j}}{4} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,j}\cdot z_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot y_{w,j}\right)}{2\cdot L_S} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot x_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,j}\cdot\left(z_{w,j}-L_z\right)\right)}{2\cdot L_W}$
4	(3-28) $F_{zn4} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wz,j}}{4} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,j}\cdot z_{w,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot y_{w,j}\right)}{2\cdot L_S} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,j}\cdot\left(z_{w,j}-L_z\right)\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wz,j}\cdot x_{w,j}\right)}{2\cdot L_W}$

Şekil 3.50. Z Eksen yönünde arabalara gelen kuvvet formülasyonu (Anonim 2013)



Şekil 3.51. Lineer kızak arabalarına y eksen yönünde etki eden kuvvet gösterimi (Anonim 2013)

i	Formula
1 3	(3-29) $F_{y\,n\,1} = F_{y\,n\,3} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wy,\,j}}{4} + \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,\,j} \cdot x_{w,\,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,\,j} \cdot \left(y_{w,\,j} - L_y\right)\right)}{2 \cdot L_W}$
2 4	(3-30) $F_{y\,n\,2} = F_{y\,n\,4} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{wy,\,j}}{4} - \frac{\sum_{j=1}^{k}\left(F_{wy,\,j} \cdot x_{w,\,j}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(F_{wx,\,j} \cdot \left(y_{w,\,j} - L_y\right)\right)}{2 \cdot L_W}$

Şekil 3.52. Y Eksen yönünde arabalara gelen kuvvet formülasyonu (Anonim 2013)

Çizelge 3.16 Sistemdeki parametre değerleri

L_w (mm)	140
L_S (mm)	237
L_y (mm)	41
L_z (mm)	20
α (°)	0
β (°)	90
x_S (mm)	-98,6
y_S (mm)	50,8
z_S (mm)	78,3
m (kg)	60
x_p (mm)	-515,6
y_p (mm)	81,5
z_p (mm)	103,6

F_g= - m x g (3.20)

F_g= 60 x 9,81= - 588, 6 N

F_p = 8000N kuvvet değeri M12 sürtünmeli delme proses analizinde bulunarak Çizelge 3.13'te verilmiştir ve Şekil 3.45'te tanımlanan koordinat sistemine göre x yönünde etki etmektedir.

F_a ivmelenme kuvveti proses sırasındaki düşük ivme değerleri nedeniyle hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

Sürtünmeli delme ünitesindeki lineer kızak ve arabalarının konumu ağırlığa paralel yöndedir. Yani sistemdeki lineer kızakların y eksen yönündeki açısı β=90º'dir. Sistemin ağırlığını ifade F_g kuvveti lineer kızak arabalarına, Şekil 3.47'de tanımlanan koordinat sistemine göre z yönünde değil de x yönünde etki etmektedir. Formüllerde belirtilen F_g değeri 0 olarak alınacak ve ağırlıktan dolayı arabalara gelen kuvvet F_{gx} ifadesiyle x yönünde etki eden kuvvet olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Lineer kızak arabalarında z yönünde oluşan bileşke kuvvetler:

$$F_{z\,1} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{F_{wz}\,.\,y_w}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wz}\,.\,x_w)-(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} \tag{3.21}$$

$$F_{z\,1} = 0 + 0 + \frac{(0)-(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_p\,.\,z_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,1} = \frac{-(8000\,x\,103.6)}{2\,x\,140} + \frac{-(-588.6\,x\,78.3)}{2\,x\,140} = -\,2795{,}4\ \text{N}$$

$$F_{z\,2} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{F_{wz}\,.\,y_w}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)-(F_{wz}\,.\,x_w)}{2\,.\,L_W} \tag{3.22}$$

$$F_{z\,2} = 0 + 0 + \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)-(0)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_p\,.\,z_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{(F_{gx}\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,2} = \frac{(8000\,x\,103{,}6)}{2\,x\,140} + \frac{(-588{,}6\,x\,78{,}3)}{2\,x\,140} = 2795{,}4\ \text{N}$$

$$F_{z\,3} = \frac{F_{wz,1}}{4} + \frac{-(F_{wz,1}\,.\,y_{w,1})}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wz,1}\,.\,x_{w,1})-(F_{wx,2}\,.\,z_{w,2})}{2\,.\,L_W} \tag{3.23}$$

$$F_{z\,3} = 0 + 0 + \frac{(0)-(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_p\,.\,z_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,3} = \frac{-(8000\,x\,103{,}6)}{2\,x\,140} + \frac{-(-588{,}6\,x\,78{,}3)}{2\,x\,140} = -\,2795{,}4\ \text{N}$$

$$F_{z\,4} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{-(F_{wz}\,.\,y_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)-(F_{wz}\,.\,x_w)}{2\,.\,L_W} \tag{3.24}$$

$$F_{z\,4} = 0 + 0 + \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)-(0)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_{wx}\,.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_p\,.\,z_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{(F_{gx}\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,4} = \frac{(8000\,x\,103{,}6)}{2\,x\,140} + \frac{(-588{,}6\,x\,78{,}3)}{2\,x\,140} = 2795{,}4\ \text{N}$$

Lineer kızak arabalarında y yönünde oluşan bileşke kuvvetler:

$$F_{y\,1} = \frac{-(F_{wx}\,.\,y_w)}{2\,.\,L_w} \tag{3.25}$$

$$F_{y\,1} = \frac{-(F_p\,.\,y_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,y_s)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(8000\,x\,81{,}5)}{2\,x\,140} + \frac{-(-588{,}6\,x\,50{,}8)}{2\,x\,140} = -\,2221{,}78\ \text{N}$$

$$F_{y\,2} = \frac{-(F_{wx}\,.\,y_w)}{2\,.\,L_w} \tag{3.26}$$

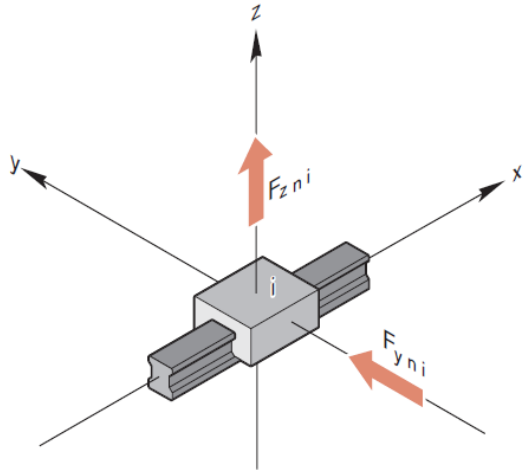
$$F_{y\,2} = \frac{-(F_p\,.\,y_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,y_s)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(-8000\,x\,81{,}5)}{2\,x\,140} + \frac{-(588{,}6\,x\,50{,}8)}{2\,x\,140} = 2221{,}78\ \text{N}$$

$$F_{y\,3} = \frac{-(F_{wx}.\ y_w)}{2\,.\,L_w} \qquad (3.27)$$

$$F_{y\,3} = \frac{-(F_p\,.\,y_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,y_s)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(8000\ x\ 81{,}5)}{2\ x\ 140} + \frac{-(-588{,}6\ x\ 50{,}8)}{2\ x\ 140} = -\ 2221{,}78\ \text{N}$$

$$F_{y\,4} = \frac{-(F_{wx}.\ y_w)}{2\,.\,L_w} \qquad (3.28)$$

$$F_{y\,4} = \frac{-(F_p\,.\,y_p)}{2\,.\,L_W} + \frac{-(F_{gx}\,.\,y_s)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(-8000\ x\ 81{,}5)}{2\ x\ 140} + \frac{-(588{,}6\ x\ 50{,}8)}{2\ x\ 140} = \ 2221{,}78\ \text{N}$$



Şekil 3.53. Lineer kızak arabasına gelen kuvvet gösterimi (Anonim 2013)

$$F_{comb\ n\,i} = |\,F_{z\,n\,i}\,| + |\,F_{y\,n\,i}\,| \qquad (3.29)$$

$F_{comb\ n\,i}$ = Birleşik eşdeğer yük

Lineer kızak arabalarına gelen birleşik eşdeğer yük F_z ve F_y kuvvetlerinin mutlak değerlerinin toplamına eşittir. Buna istinaden her arabaya gelen eşdeğer yük hesaplaması yapılmıştır.

$$F_{comb\ 1} = |\,F_{z\ 1}\,| + |\,F_{y\ 1}\,| = |\,-\,2795{,}4\ \text{N}\,| + |\,-\,2221{,}78\ \text{N}\,| = 5017{,}2\ \text{N}$$

$$F_{comb\ 2} = |\,F_{z\ 2}\,| + |\,F_{y\ 2}\,| = |\,2795{,}4\ \text{N}\,| + |\,2221{,}78\ \text{N}\,| = 5017{,}2\ \text{N}$$

$$F_{comb\ 3} = |\,F_{z\ 3}\,| + |\,F_{y\ 3}\,| = |\,-\,2795{,}4\ \text{N}\,| + |\,-\,2221{,}78\ \text{N}\,| = 5017{,}2\ \text{N}$$

$F_{comb\ 4} = |F_{z\ 4}| + |F_{y\ 4}| = |2795{,}4\ N| + |2221{,}78\ N| = 5017{,}2\ N$

SNS – Slimline, normal, standard height R1622 ... 2.



Size	Dimensions (mm)							Mass (kg)	Load capacities[3] (N)		Load moments[3] (Nm)			
	N_3	$N_6^{\pm 0.5}$	S_2	S_5	S_9	T	V_1	m	C	C_0	M_t	M_{t0}	M_L	M_{L0}
15	6.0	10.3	M4	4.5	M2.5x3.5	60	5.0	0.15	9860	12700	95	120	68	87
20	7.5	13.2	M5	6.0	M3x5	60	6.0	0.35	23400	29800	300	380	200	260
25	9.0	15.2	M6	7.0	M3x5	60	7.5	0.50	28600	35900	410	510	290	360
30	12.0	17.0	M8	9.0	M3x5	80	7.0	0.85	36500	48100	630	830	440	580
35	13.0	20.5	M8	9.0	M3x5	80	8.0	1.25	51800	80900	1110	1740	720	1130
45	18.0	23.5	M10	14.0	M4x7	105	10.0	2.40	86400	132000	2330	3560	1540	2350

Şekil 3.54. Sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan lineer kızak arabası (Anonim 2013)

Sürtünmeli delik delme ünitesinde 4 adet Rexroth Marka SNS serisi 20'lik lineer kızak arabası seçilmiştir. Seçilen lineer kızak arabası C2 ön yükleme sınıfında olup C = 23400 N dinamik yük kapasitesi ve C_0 = 29800 N statik yük kapasitesine sahiptir. Seçilen ürün için statik yük faktörü $S_0 > 4$ olarak önerilmiştir. Arabalara gelen maksimum kuvvete göre statik yük faktörü hesabının yapılması için C2 sınıfı olarak seçilen ön yüklemeli lineer kızak arabasında ön yüklemenin ürün yaşam ömrüne etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun için ön yük kuvveti hesaplaması yapılmıştır.

$$F_{Pr} = X_{Pr} \cdot C \qquad (3.30)$$

$$F_{lim} = 2{,}8 \cdot F_{pr} \qquad (3.31)$$

F_{Pr} (N) : Ön yük nedeniyle araba üzerindeki dahili eksenel yük

X_{Pr} : Ön yükleme faktörü (C2 sınıfı için : 0,08)

C (N) : Dinamik yük kapasitesi

F_{lim} = Kaldırma kuvveti

$F_{Pr} = 23400 \cdot 0{,}08 = 1872$ N

$F_{lim} = 2{,}8 \cdot 1872 = 5241{,}6$ N

$F_{comb\ 1,2,34}$ =5017,2 N < F_{lim}= 5241,6 N

Tüm arabalara gelen yük hesaplanan ön yükleme kaldırma kuvvetinden daha düşük olduğu için statik yük faktörü hesabında ön yükleme kuvveti dikkate alınması gerekmektedir. Arabalara gelen ön yüklemeli etkin eşdeğer yük F_{eff} hesaplaması yapılmıştır.

$$F_{eff\ n\ i} = \left(\frac{F_{comb\ n\ i}}{2{,}8\ .F_{pr}} + 1\right)^{\frac{3}{2}} . F_{pr} \qquad (3.32)$$

$$F_{eff\ 1\ 1,2,3,4} = \left(\frac{5017{,}2\ N}{2{,}8\ .1872\ N} + 1\right)^{\frac{3}{2}} . 1872\ N = 5125{,}7\ N$$

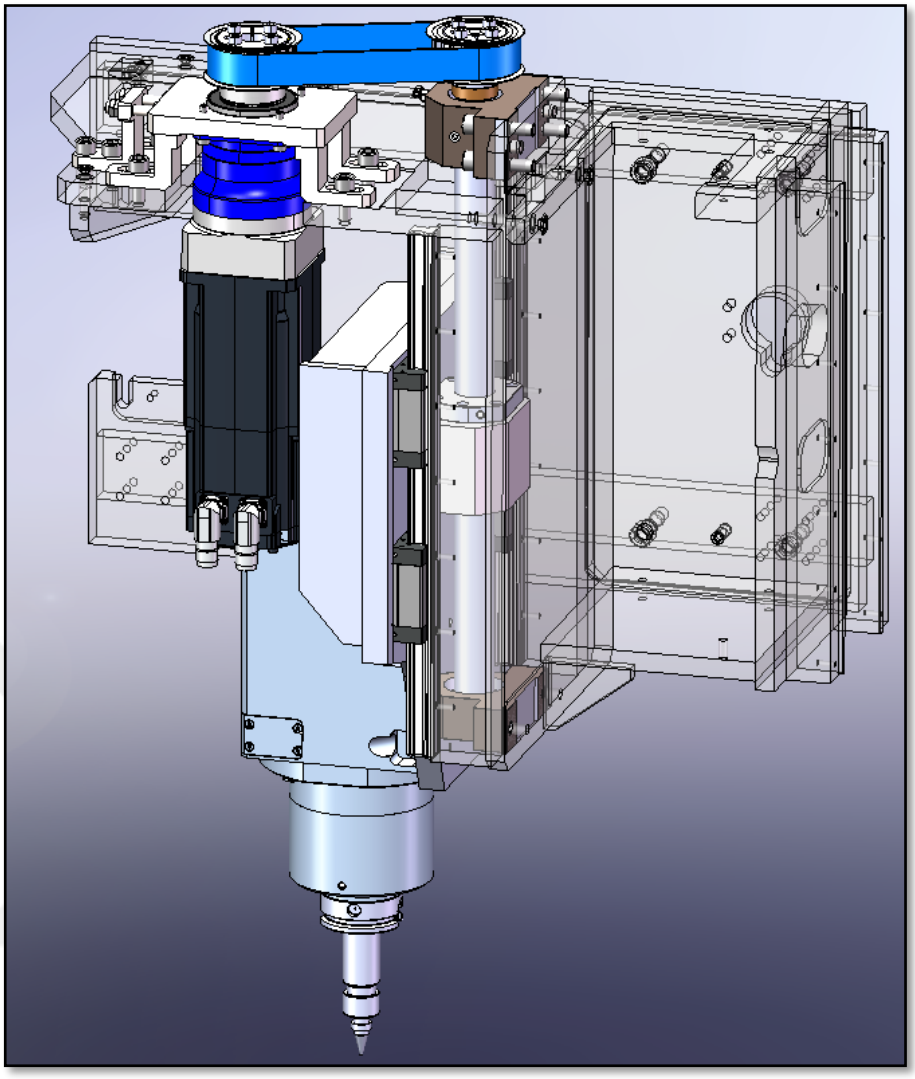
F_{max} = $F_{eff\ 1\ 1,2,3,4}$ = 5125,7 N olarak hesaplanmıştır. Buna göre statik yük faktörü hesaplaması yapılmıştır.

$$S_0 = C_0 / F_{max} \qquad (3.33)$$

S_0= 23400 N / 5125,7 N = 4,565 olarak hesaplanmıştır. Katalogta önerilen S_0 >4 eşitlik ifadesi sağlandığı için sürtünmeli delik delme ünitesinde seçilmiş olan lineer kızak arabalarının emniyetli olduğu doğrulanmıştır.

3.5.4. Sürtünmeli Delme Ünitesi Motor ve Diğer Mekanik Elemanların Seçimi

Sürtünmeli delme ünitesi Z1 eksen hareket motoru için Siemens marka servo motor seçimi yapılmıştır. Servo motor ile birlikte 1 adet planet redüktör kullanılmıştır. Planet redüktör çıkışı ve vidalı mil arasında kayış kasnak mekanizması kullanılarak aktarım sağlanmıştır. Sürtünmeli delme ünitesi spindle motorunun ilerleme hareketi bu mekanizma ile sağlanmıştır. Motorun seçimi için öncelikle tork hesaplaması yapılmıştır. Seçilecek olan motorun hesaplanan torku karşılayabilecek güç ve nominal tork değerine sahip olması noktasına önem gösterilmiştir. Maksimum eksenel yük ve tork değeri M12 sürtünmeli delme prosesi sırasında oluşacağından tork hesaplaması buna göre yapılmıştır. Analitik hesaplamalara göre yapılan motor seçiminin, Siemens Sizer yazılımında doğrulaması yapılmıştır. Motorun kararlı çalışabilmesi için önem arz eden atalet oranı Sizer yazılımında dikkate alınmıştır.



Şekil 3.55. Sürtünmeli delme ünitesi Z1 eksen yönü tahrik sistemi gösterimi

$$M_t = M_{ta} + M_s + M_i \quad (3.34)$$

M_t : Toplam moment (Nm)

M_{ta} : Tahrik momenti (Nm)

M_s : Sürtünme momenti (Nm)

M_i : İvmelenme momenti (Nm)

Sistemde maksimum proses momenti maksimum eksenel yükten dolayı M12 sürtünmeli delme işlemi sırasında oluşacaktır. M12 sürtünmeli delme sırasında oluşan itme kuvveti ağırlık kuvvetinin tersi yönündedir. Bu yüzden M_{ta} tahrik momenti hesabı sırasında ağırlık kuvveti maksimum eksenel kuvvetten çıkarılarak hesaplanmıştır.

$$M_{ta} = \frac{F_L \,.\, P}{2000 \,.\pi \,.\eta} \qquad (3.35)$$

$$M_{ta} = \frac{(F_p + F_g) \,.\, P}{2000 \,.\pi \,.\eta}$$

M_{ta} : Tahrik Torku (Nm)

F_L : Eksenel Kuvvet (N)

P : Vidalı mil adımı (mm)

η : Vidalı mill verimi (0,8)

F_p : Proses sırasında oluşan maksimum kuvvet (Nm)

F_g : Ağırlıktan dolayı oluşan kuvvet (Nm)

$$M_{ta} = \frac{(8000\ N + (-60\ .\ 9{,}81\ (N))\ .\ 10\ (mm)}{2000 \,.\pi\ .\ 0{,}8}\ \text{(Nm)}$$

M_{ta} = 14,75 Nm olarak hesaplanmıştır.

Sistemde kullanılan vidalı mil için hesaba katılması önerilen önyükleme ve sürtünme moment değerleri firma katalog değerlerinden alınarak hesaba dahil edilmiştir (Şekil 3.56).

$$M_s = M_{\text{ön yükleme}} + M_{\text{conta sürtünme}} \qquad (3.36)$$

M_s = 1,24 Nm + 0,15 Nm = 1,39 Nm

Preload and rigidity

d_0 x P	Single nut FEM / ZEM backlash standard (mm)	(preload class C2) R_{nu} (N/µm) max.	T_{p0} (Nm) min.	T_{p0} (Nm) max.	Rs $\left(\frac{N \cdot m}{\mu m}\right)$
20 x 5	0,03	400	0.29	0.66	66
25 x 5		460	0.42	0.92	103
25 x 10		290	0.42	0.92	103
30 x 5		620	0.57	1.24	149
30 x 10		420	0.57	1.24	149
39 x 5		750	0.88	1.92	251
39 x 10		500	0.88	1.92	251
48 x 5		1,080	1.24	2.72	380
48 x 10		760	1.24	2.72	380
60 x 10		1,030	1.79	3.94	594
60 x 20		700	1.79	3.94	594
75 x 10		1,400	2.61	5.17	928
75 x 20		1,000	2.61	5.17	928

Frictional torque of the seals
Seal torque of the nuts

d_0 x P = size
R_S = rigidity of the screw
R_{nu} = rigidity of the nut
T_{RD} = dynamic drag torque of the 2 seals
T_{p0} = dynamic drag torque without seals
T_0 = overall dynamic drag torque
$T_0 = T_{p0} + T_{RD}$

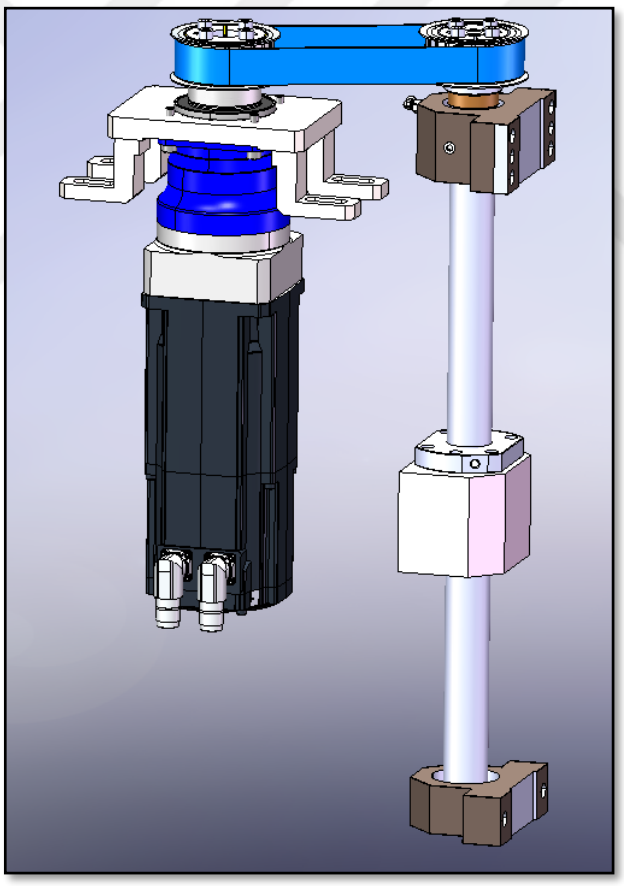
d_0 x P	Dynamic drag torque T_{RD} approx. (Nm) Lip seal	Gap-type seal/cover plate wiper
20 x 5	0.10	0
25 x 5/10	0.10	0
30 x 5/10	0.15	0
39 x 5/10	0.25	0
48 x 5/10	0.35	0
60 x 10/20	0.50	0
75 x 10/20	0.70	0

The values given for dynamic drag torque are proven practical indicators for the nut preloading.

Şekil 3.56. Vidalı milde hesaba katılması gereken önyükleme ve sürtünme momenti tablosu (Anonim 2021)

Proses sırasında düşük ivme değerinden dolayı F ivmelenme dolayısıyla ivmelenme momenti ihmal edilmiştir. Zaten servo motor ve planet redüktör sistem emniyeti adına bulunan moment değerinin üstünde tork sağlayabilecek şekilde seçilmiştir.
$M_i = 0$ olarak alınmıştır.

$M_t = M_{ta} + M_s + M_i = 14{,}75\ N + 1{,}39\ N + 0$
$M_t = 16{,}14$ Nm olarak hesaplanmıştır. Vidalı milde oluşan bu momentin motor tarafından karşılanması gerekmektedir. Servo motora bağlı planet redüktör milinden vidalı mile aktarım i =1 çevrim oranında kayış kasnak mekanizmasıyla sağlanmıştır. O yüzden servo motor ve planet redüktör seçimi için direkt olarak bu değer kullanılmıştır.



Şekil 3.57. Servo motor-planet redüktör hareket iletim sistemi

Sistemde 1FK2205-4AF10-0MB0 tip Siemens marka servo motor ve Witteinstein marka SP075S-MF1-3-0E1-2S model planet redüktör kullanılmıştır. Seçilen servo

motor boşta ivmeli hareket yapacağı için frenli olarak seçilmiştir. Planet redüktöre ait teknik özellikler Çizelge 3.17'de ve servo motora ait teknik özellikler Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.17 Sürtünmeli delme ünitesi planet redüktör teknik özellikleri (Anonim 2020b)

Çevrim Oranı	i	5
Maksimum Tork (Nm)	T_{2a}	176
Maksimum İvmelenme Torku (Nm)	T_{2B}	132
Nominal Tork (Nm)	T_{2N}	81
Nominal Giriş Hızı (rpm)	n_{1n}	2900
Maksimum Giriş Hızı (rpm)	n_{1max}	7500
Maksimum Radyal Geri Boşluk (arcmin)	j_t	Standard ≤ 4 / Yüksek ≤ 2
Tam Yükte Verim (%)	η	97
Servis Ömrü (saat)	L_h	>20000
Ağırlık (kg)	m	3.9
Atalet Momenti (kg cm^2)	J_1	0,68

Çizelge 3.18 Sürtünmeli delme ünitesi servo motor teknik özellikleri(Anonim 2021b)

Nominal Çıkış Hızı (rpm)	n_N	3000
Maksimum Çıkış Hızı (rpm)	n_{max}	7200
Nominal Çıkış Torku (Nm)	M_0	6
Nominal Güç (kW)	P_N	1.45
Motorun Ataleti (kg m^2)	J	0.000510
Fren Durumu	-	frenli
Kama Durumu	-	kamasız

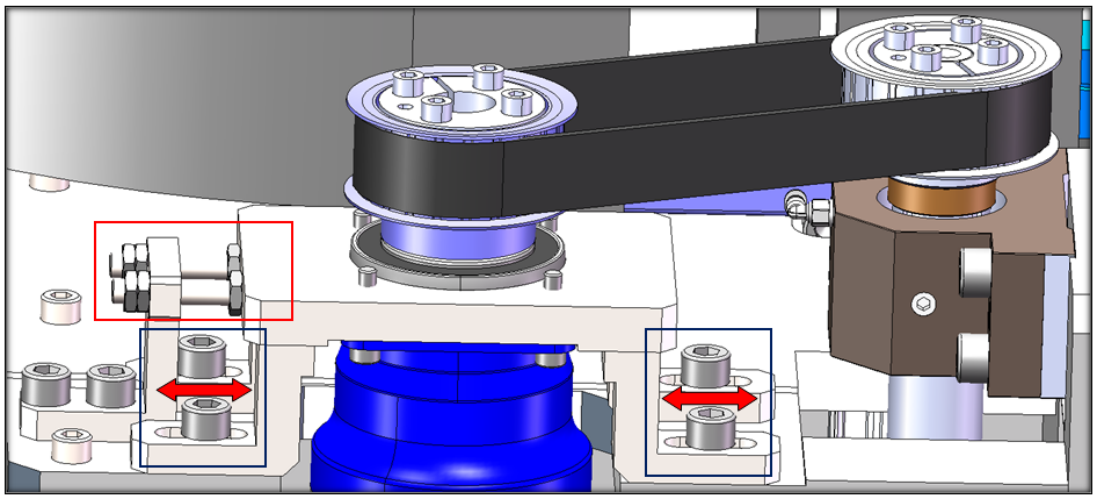
$$M_Ç = M_0 . i \quad (3.37)$$

$M_Ç$ (Nm) : Sistem Çıkış Torku (Nm)

$M_Ç = M_0 . i = 6 . 5 = 30$ Nm

$M_Ç$ = 30 Nm > M_t = 16,14 Nm eşitsizliği sağlandığından dolayı sistemde seçilen servo motor ve redüktörden elde edilen tork değerinin, proses sırasında oluşacak maksimum toplam momenti emniyetli olarak karşılayabileceği doğrulanmıştır.

Redüktörden vidalı mile hareket aktarımı dişli kayış ve kasnak ile sağlanmıştır. Düşük gürültülü çalışması, yağlama ve bakım ihtiyacının olmaması, yüksek ve sabit açısal hızlarda hassas çalışabilmesi avantajlarından dolayı dişli zaman kayışı ve kasnağı tercih edilmiştir. Zaman kayışı tipi sürtünmeli delme ünitesinde oluşacak maksimum güç değerine göre katalogtan uygun olarak seçilmiştir. Kayışın gerginliğinin ayarlanabilmesi için redüktör bağlantı sehpasındaki civata bağlantı delikleri 30 mm boyunda slot yapılmıştır. Redüktör sehpası 2 adet M8 çektirme setskurları ile yandan çektirilip kayış gerginliği hesaplanan frekansta ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.58).



Şekil 3.58. Sürtünmeli delme ünitesi dişli-kayış kasnak gösterimi

P (kW) = T (Nm) . n (rpm) /9550 (3.38)

M_s = 1,39 Nm

Z1 eksen sürtünmeli delme sırasında oluşan güç:

Proses sırasındaki vidalı mil dönme hızı Çizelge 3.13' ten 34.5 rpm olarak alınmıştır.

$M_t = M_{ta} + M_s$ = 16,14 +1.39 = 17,53Nm

P(kW) = 17,53 (Nm) . 34,5 (rpm) /9550 = 0,065 kW olarak bulunmuştur.

Z1 eksen boşta hareketi sırasında oluşan güç:

Sistemin boşta hareketi sırasında vidalı mile sistemin ağırlığından dolayı oluşan tahrik momenti, sürtünme momenti ve ivmelenme momenti etki etmektedir. Ağırlıktan dolayı vidalı mile gelen kuvvet Çizelge 3.13' ten 600 N olarak alınmıştır.

$$M_{ta} = \frac{F_L \,.\, P}{2000 \,.\pi\,.\eta} = \frac{600 \,.\, 10}{2000 \,.\pi\,.\, 0{,}8} = 1{,}194 \text{ Nm}$$

$$M_s = 1{,}39 \text{ Nm}$$

$$F_i = m\,(kg) \,.\, a\,(\, m / s^2\,) = 60 \,.\, 15 = 900 \text{ N}$$

$$M_i = \frac{F_L \,.\, P}{2000 \,.\pi\,.\eta} = \frac{900 \,.\, 10}{2000 \,.\pi\,.\, 0{,}8} = 1,\, 79 \text{ Nm}$$

$$M_t = M_{ta} + M_s + M_i = 1{,}194 \text{ N} + 1{,}39 \text{ N} + 1{,}79$$

$$M_t = 4{,}374 \text{ Nm}$$

P(kW) = 4,374 (Nm) . 600 (rpm) /9550 = 0,274 kW olarak bulunmuştur.

Bu hesaplamalara göre seçilen kayış tipi 600 rpm devirde 0,274 kW ve 34,5 rpm devirde 0,065 kW güç aktarımı yapabilecek özellikte olması gerekmektedir. Bu yüzden Şekil 3.59'da katalogta güç değeri verilen Megadyne marka 544 RPP8 tipi 20mm genişliğe sahip zaman kayışı ve Ø66,21mm çapında ve Z = 26 dişe sahip kasnak seçilmiştir. Vidalı mil ucundaki ve redüktör mili ucundaki her iki kasnak aynı çapta seçildiği için çevrim oranı i = 1 'dir. Bu yüzden aktarım sırasında kasnaklardaki hız ve tork değerleri eşittir.

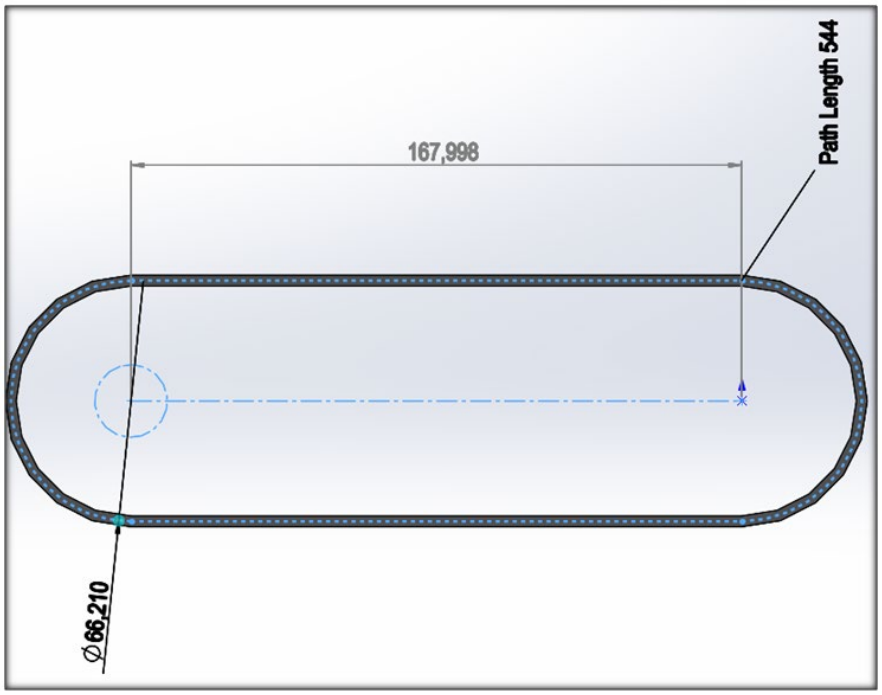
RPP8 - RPP8 DD

BASIC PERFORMANCE Pb IN kW FOR ISORAN RPP8 AND RPP8 DD - 20 mm WIDE (kW / 20 mm)

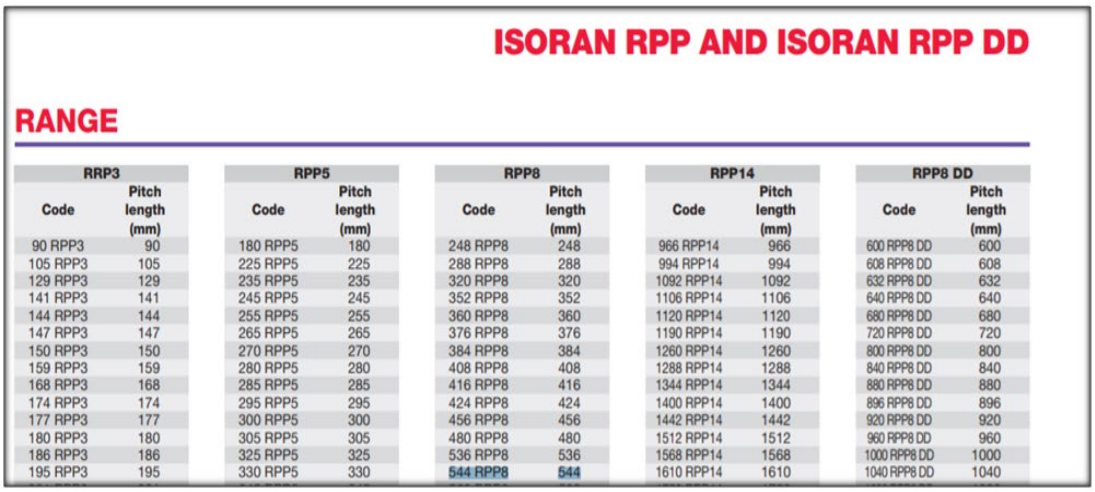
d (mm)	56,02	61,12	66,21	71,30	76,39	81,49	86,58	91,67	96,77	101,86	112,05	122,23	142,60	162,97	183,35	203,72
z	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	44	48	56	64	72	80
rpm																
10	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16	0,19	0,22	0,26	0,29
20	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,24	0,27	0,32	0,38	0,44	0,49
30	0,14	0,16	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,33	0,36	0,44	0,51	0,59	0,67
50	0,21	0,23	0,26	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,48	0,53	0,64	0,75	0,87	0,98
70	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62	0,69	0,82	0,97	1,12	1,27
100	0,35	0,39	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59	0,63	0,68	0,72	0,81	0,90	1,08	1,27	1,46	1,65
200	0,59	0,66	0,72	0,79	0,86	0,93	1,00	1,07	1,14	1,21	1,36	1,51	1,81	2,13	2,45	2,78
300	0,80	0,89	0,98	1,07	1,16	1,26	1,35	1,45	1,54	1,64	1,84	2,04	2,46	2,88	3,32	3,77
400	0,99	1,10	1,21	1,33	1,44	1,56	1,67	1,79	1,91	2,03	2,28	2,53	3,05	3,57	4,12	4,67
500	1,17	1,30	1,43	1,57	1,70	1,84	1,98	2,12	2,26	2,40	2,70	2,99	3,60	4,22	4,86	5,51
600	1,35	1,49	1,64	1,80	1,95	2,11	2,27	2,43	2,59	2,76	3,09	3,43	4,12	4,83	5,56	6,31

Şekil 3.59. Seçilen zaman kayışı kataloğu güç tablosu (Anonim 2021c)

Tasarlanan sistemde iki kasnak ekseni arası mesafe 168 mm gelmektedir. Seçilen kasnak çapı Ø 66,21 mm ölçüsündedir. Bu eksen ölçüsüne ve kasnak çapına göre tasarlanan kayış uzunluğu Şekil 3.61' deki ürün katalog tablosundan standart kayış boyu 544 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.60. Sistemde kullanılan zaman kayışı uzunluğu



ISORAN RPP AND ISORAN RPP DD

RANGE

RRP3		RPP5		RPP8		RPP14		RPP8 DD	
Code	Pitch length (mm)	Code	Pitch length (mm)	Code	Pitch length (mm)	Code	Pitch length (mm)	Code	Pitch length (mm)
90 RPP3	90	180 RPP5	180	248 RPP8	248	966 RPP14	966	600 RPP8 DD	600
105 RPP3	105	225 RPP5	225	288 RPP8	288	994 RPP14	994	608 RPP8 DD	608
129 RPP3	129	235 RPP5	235	320 RPP8	320	1092 RPP14	1092	632 RPP8 DD	632
141 RPP3	141	245 RPP5	245	352 RPP8	352	1106 RPP14	1106	640 RPP8 DD	640
144 RPP3	144	255 RPP5	255	360 RPP8	360	1120 RPP14	1120	680 RPP8 DD	680
147 RPP3	147	265 RPP5	265	376 RPP8	376	1190 RPP14	1190	720 RPP8 DD	720
150 RPP3	150	270 RPP5	270	384 RPP8	384	1260 RPP14	1260	800 RPP8 DD	800
159 RPP3	159	280 RPP5	280	408 RPP8	408	1288 RPP14	1288	840 RPP8 DD	840
168 RPP3	168	285 RPP5	285	416 RPP8	416	1344 RPP14	1344	880 RPP8 DD	880
174 RPP3	174	295 RPP5	295	424 RPP8	424	1400 RPP14	1400	896 RPP8 DD	896
177 RPP3	177	300 RPP5	300	456 RPP8	456	1442 RPP14	1442	920 RPP8 DD	920
180 RPP3	180	305 RPP5	305	480 RPP8	480	1512 RPP14	1512	960 RPP8 DD	960
186 RPP3	186	325 RPP5	325	536 RPP8	536	1568 RPP14	1568	1000 RPP8 DD	1000
195 RPP3	195	330 RPP5	330	544 RPP8	544	1610 RPP14	1610	1040 RPP8 DD	1040

Şekil 3.61. Seçilen zaman kayışı kataloğu uzunluk tablosu (Anonim 2021c)

Redüktör mili ucundaki ve vidalı mil ucundaki aktarma kasnaklarının rijit olarak sabitlenmesi için Clampex marka KTR-250 tipi konik sıkmalı kaplin kullanılmıştır. Katalog değerlerine göre seçilen kaplin 250 Nm tork değerine kadar olan momenti karşılayabilmektedir. Sistemde oluşacak maksimum tork değeri M_t = 16,14 Nm < T_{kaplin} = 250 Nm eşitsizliğine göre seçilen kaplin sistem için uygundur. Kaplinin sürtünmeli delme ünitesindeki montaj şekli Şekil 3.64'teki kesit görünümde gösterilmiştir.



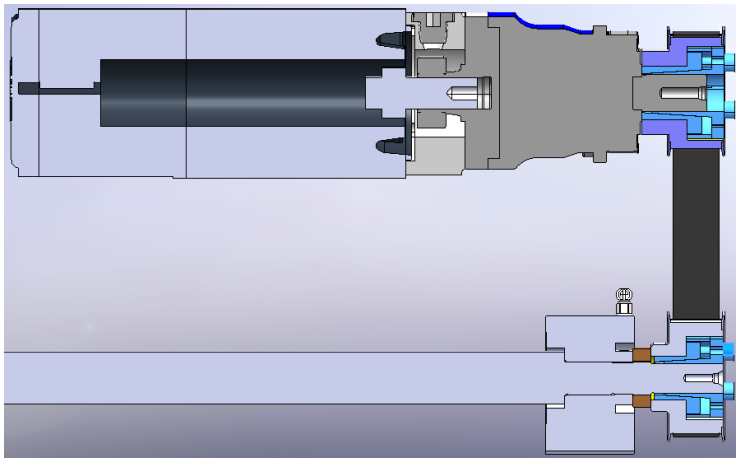
Şekil 3.62. Aktarma kasnaklarındaki konik sıkmalı kaplin tipi (Anonim 2021d)

CLAMPEX® KTR 250
Clamping elements

CLAMPEX® – KTR 250

d x D [mm]	Dimensions [mm]					Clamping screws DIN EN ISO 4762 - 12.9 µtotal=0.14				Transmittable torque or axial force		Surface pressure between clamping element		Weight [~kg]	Stock programme
	B	B_1	B_2	B_3	D_1	M	Length	z No. z	T_A [Nm] 1)	T [Nm]	F_{ax} [kN]	Shaft PW [N/mm2]	Hub PN [N/mm2]		
6 x 14	24,5	21,5	18,5	10	25	M3	10	4	2,6	11	4	162	69	0,05	●
8 x 15	29	25	21,5	11,5	27	M4	10	3	5,6	26	7	187	100	0,05	●
9 x 16	30	26	22,5	14	28	M4	10	4	5,6	37	8	173	97	0,06	●
10 x 16	30	26	22,5	14	29	M4	10	4	5,6	42	8	159	99	0,16	●
11 x 18	30	26	22,5	13,5	32	M4	10	4	5,6	50	9	162	99	0,18	●
12 x 18	30	26	22,5	13,5	32	M4	10	4	5,6	55	9	150	100	0,18	●
14 x 23	30	26	22,5	14	38	M4	10	6	5,6	100	14	193	118	0,20	●
15 x 24	42	36	28,5	16	44	M6	18	4	15	145	19	214	134	0,2	●
16 x 24	42	36	28,5	16	44	M6	18	4	15	155	19	201	134	0,3	●
17 x 25	42	36	28,5	16	45	M6	18	4	15	162	19	186	126	0,2	
17 x 26	44	38	31	18	47	M6	18	4	17	180	21	184	120	0,2	
18 x 26	44	38	31	18	47	M6	18	4	17	200	22	182	126	0,2	●
19 x 27	44	38	31	18	48	M6	18	4	17	210	22	171	121	0,3	●
20 x 28	44	38	31	18	49	M6	18	4	17	220	22	162	116	0,2	●
22 x 32	51	45	38	25	54	M6	18	4	17	250	23	110	75	0,3	●

Şekil 3.63. Aktarma kasnaklarındaki konik sıkmalı kaplin kataloğu (Anonim 2021d)



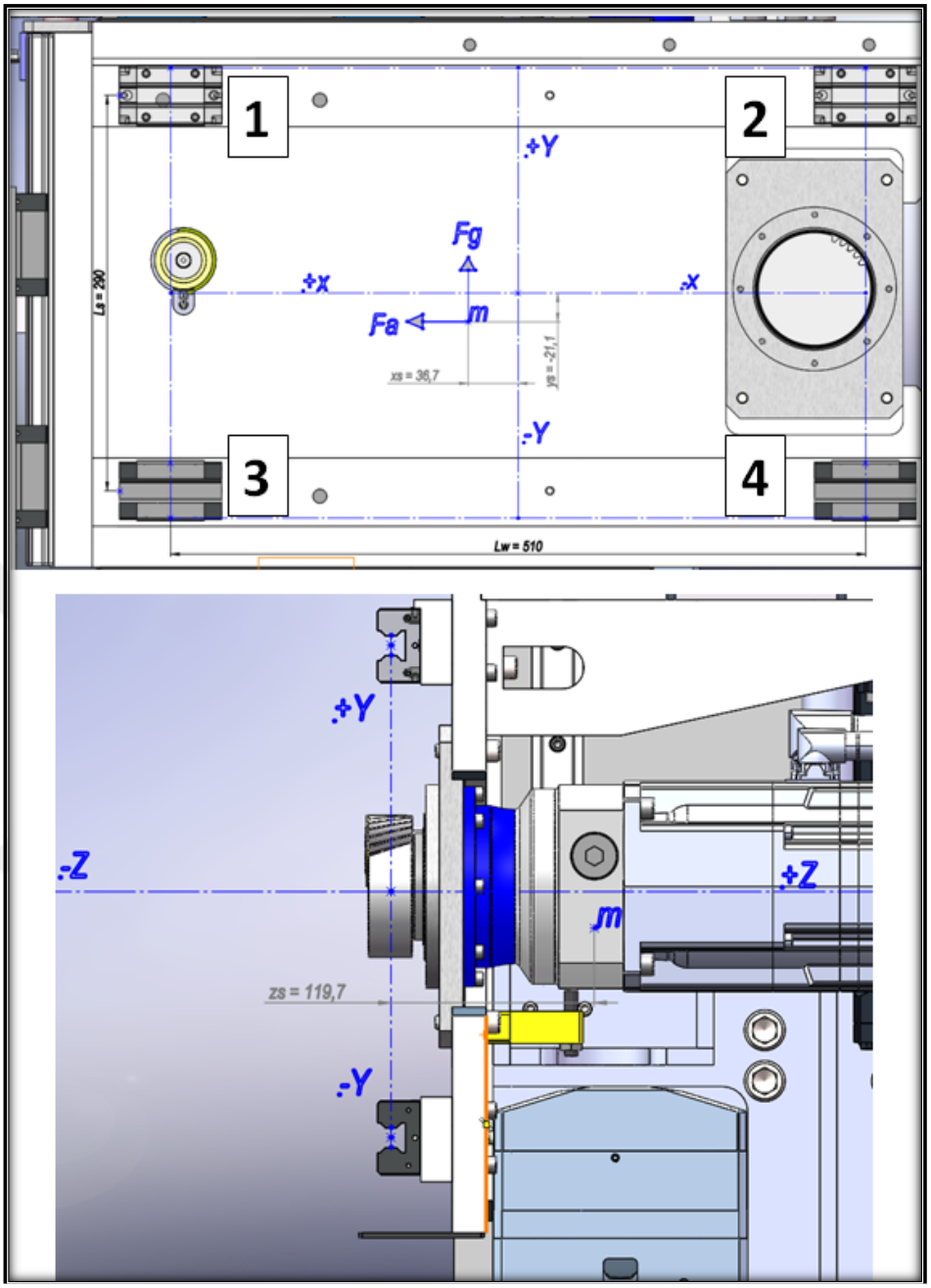
Şekil 3.64. Sistemdeki hareket iletim elemanları ve konik sıkmalı kaplin kullanımı kesit görünümü

3.5.5. Y-Z Eksen Grubu Lineer Kızak ve Araba Seçimi

Y-Z eksen grubu Tasarımda Rexroth marka lineer kızak ve araba kullanılmıştır. Y eksen arabalarına Y-Z eksen grubunun hareketi sırasında toplam ağırlıktan gelen kuvvet ve ivmelenme kuvveti etki etmektedir. Bu aşamada maksimum yüke maruz kalacağı için bu durum için hesaplama yapılarak lineer kızak ve araba seçimi yapılmıştır. Y eksen yönünde hareketsiz iken sadece ağırlık kuvveti etki etmektedir. Proses sırasında da Y eksen arabalarına düşük kuvvet geleceği için ihmal edilmiştir. Ürünün problemsiz çalışabilmesi için maksimum yük miktarına göre ürün seçimi yapılarak statik yük faktörü önerilen 4 değerinin üzerinde olmasına dikkat edilmiştir.

Çizelge 3.19 Y-Z eksen grubu malzeme listesi ve ağırlıkları

Komponent	Malzeme	Kütle (kg)
Y Eksen Gövdesi	St44	113
Z1 Eksen Gövdesi (Sürtünmeli Delme)	St44	17,5
Z2 Eksen Gövdesi (Lazer Kesim Kafası)	AlMg3	10,5
Z1 Eksen Tahrik Grubu (Motor, redüktör, vidalı mil vs.)	-	45
Z2 Eksen Tahrik Grubu (Motor, kasnak, vidalı mil vs.)	-	12,2
Diğer Komponentler (Lineer kızak ve arabaları, cıvata, kablo paleti, y eksen motoru ve redüktörü vs.)	-	24,8
Toplam Ağırlık	223 kg	



Şekil 3.65. Y-Z eksen grubu ağırlık merkezi ve arabalara etki eden kuvvetler

Y eksen grubu lineer kızak arabası hesaplamaları için tanımlanan koordinat sistemi Şekil 3.65'te gösterilmiştir. Arabalar z ve y yönünde kuvvet etkisine maruz kalmaktadır. Hesaplamalarda 4 arabanın merkezi orjin kabul edilerek ağırlık ve ivmelenme kuvvetlerinin bu orjine göre arabalarda oluşturduğu bileşke F_z ve F_y kuvvetleri hesaplanmıştır. Her araba için bulunan F_z ve F_y kuvvetlerinin bileşkeleri de her arabaya gelen toplam kuvvet değerini ifade etmektedir.

Y-Z eksen grubunun toplam kütlesinin oluşturduğu ağırlık kuvveti:
F_g= - m x g = - 223 (kg) x 9,81 (m / s^2) = - 2187,63 N olarak hesaplanmıştır. F_g kuvveti bu sistemde -y yönünde etki etmektedir.

Lazer profil makineleri üretici katalogları incelenerek ve makine y eksen grubunda yüksek ivmelenme ihtiyacı olmadığından dolayı maksimum ivlemenme değeri a = 4 m / s^2 olarak belirlenmiştir. Buna göre ivmelenme kuvveti:

F_a= - m x a (3.39)

F_a= 223 (kg) x - 4 (m/ s^2) = - 892 N olarak hesaplanmıştır. F_a kuvveti hesaplama için tanımlanan koordinat sistemin gösteriminde x eksen yönünde etki etmektedir.

Şekil 3.47'de tanımlanan koordinat sisteminde Z eksen yönünde yani arabalara etki eden dik F_z kuvveti yönünde direkt etkiyen tekil kuvvet yoktur. Fakat x eksen yönündeki F_a ve F_g kuvvetinin orjine göre oluşturduğu moment etkisinden dolayı arabalarda F_z kuvveti oluşmaktadır.

Çizelge 3.20 Tanımlanan koordinat sistemindeki parametre değerleri

L_w (mm)	510
L_S (mm)	290
α (°)	-90
β (°)	0
x_S (mm)	36,7
y_S (mm)	-21,1
z_S (mm)	119,7

Şekil 3.50. ve Şekil 3.52'de 4 lineer kızak arabasına sahip sistem için her arabaya gelen yükler olan F_z ve F_y kuvvet formülasyonu belirtilmiştir. Buna göre y-z eksen grubu için her arabaya gelen yük hesaplaması yapılmıştır.

Lineer kızak arabalarında z yönünde oluşan bileşke kuvvetler:

$$F_{z\,1} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{(F_{wz}.\,y_w)-(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wz}.\,x_w)-(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W}$$

Z yönünde arabaya direkt olarak etkiyen kuvvet olmadığı için formülasyonda F_{wz} =0 olarak alınmıştır.

$$F_{z\,1} = \frac{-(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{-(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_g\,.\,z_s)}{2\,.\,L_s} + \frac{-(F_a\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,1} = \frac{-(-2187{,}63\,.119{,}7)}{2\,.\,290} + \frac{-(-892\,.119{,}7)}{2\,.\,510} = 556{,}1 \text{ N olarak hesaplanmıştır.}$$

$$F_{z\,2} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{(F_{wz}.\,y_w)-(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}.\,z_w)-(F_{wz}.\,x_w)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,2} = \frac{-(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{-(F_g\,.\,z_s)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_a\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,2} = \frac{-(-2187{,}63\,.119{,}7)}{2\,.\,290} + \frac{(-892\,.119{,}7)}{2\,.\,510} = 346{,}8 \text{ N olarak hesaplanmıştır.}$$

$$F_{z\,3} = \frac{F_{wz,1}}{4} + \frac{(F_{wy}.\,z_w)-(F_{wz}.\,y_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wz}.\,x_w)-(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,3} = \frac{(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{-(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_g\,.\,z_s)}{2\,.\,L_s} + \frac{-(F_a\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,3} = \frac{(-2187{,}63\,.119{,}7)}{2\,.\,290} + \frac{-(-892\,.119{,}7)}{2\,.\,510} = \text{- } 346{,}8 \text{ N olarak hesaplanmıştır.}$$

$$F_{z\,4} = \frac{F_{wz}}{4} + \frac{(F_{wy}.\,z_w)-(F_{wz}.\,y_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}.\,z_w)-(F_{wz}.\,x_w)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,4} = \frac{(F_{wy}.\,z_w)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_{wx}.\,z_w)}{2\,.\,L_W} = \frac{(F_g\,.\,z_s)}{2\,.\,L_s} + \frac{(F_a\,.\,z_s)}{2\,.\,L_W}$$

$$F_{z\,4} = \frac{(-2187{,}63\,.119{,}7)}{2\,.\,290} + \frac{(-892\,.119{,}7)}{2\,.\,510} = \text{- } 556{,}1 \text{ N olarak hesaplanmıştır.}$$

Lineer kızak arabalarında y yönünde oluşan bileşke kuvvetler:

$$F_{y\,1} = F_{y\,3} = \frac{F_{wy}}{4} + \frac{(F_{wy}.\,x_w) - (F_{wx}.\,y_w)}{2\,.\,L_w}$$

$$F_{y\,1} = F_{y\,3} = \frac{F_g}{4} + \frac{(F_g.\,x_s) - (F_a.\,y_s)}{2\,.\,L_w}$$

$$F_{y\,1} = F_{y\,3} = \frac{-\,2187{,}63}{4} + \frac{(-\,2187{,}63\,.36{,}7)\,(-892\,.-21{,}1)}{2\,.510} = \text{- } 644{,}07 \text{ N olarak hesaplanmıştır.}$$

$$F_{y\,2} = F_{y\,4} = \frac{F_{wy}}{4} - \frac{(F_{wy}.\,x_w) - (F_{wx}.\,y_w)}{2\,.\,L_w}$$

$F_{y\,2} = F_{y\,4} = \frac{F_g}{4} - \frac{(F_g.\ x_S) - (F_a.\ y_S)}{2\ .\ L_w}$

$F_{y\,2} = F_{y\,4} = \frac{-\ 2187{,}63}{4} - \frac{(-\ 2187{,}63\ .36{,}7)\ (-892\ .-21{,}1)}{2\ .510}$ = - 449,74 N olarak hesaplanmıştır.

$F_{comb\ n\ i} = |\ F_{z\ n\ i}\ | + |\ F_{y\ n\ i}\ |$

Her arabaya gelen eşdeğer yük hesaplaması yapılmıştır.

$F_{comb\ 1} = |\ F_{z\ 1}\ | + |\ F_{y\ 1}\ | = |$ 556,1 N $| + |$ - 644,07 N $| =$ 1200,17 N

$F_{comb\ 2} = |\ F_{z\ 2}\ | + |\ F_{y\ 2}\ | = |$ 346,8 N $| + |$ -449,74 N $| =$ 796,54 N

$F_{comb\ 3} = |\ F_{z\ 3}\ | + |\ F_{y\ 3}\ | = |$ - 346,8 N $| + |$ - 644,07 $| =$ 990,87 N

$F_{comb\ 4} = |\ F_{z\ 4}\ | + |\ F_{y\ 4}\ | = |$ - 556,1 $| + |$ - 449,74 N $| =$ 1005,84 N

Yapılan analitik hesaplamalar Y-Z eksen grubundaki arabalara sürtünmeli delme ünitesine kıyasla daha düşük eşdeğer yük geldiğini göstermiştir. Bu yüzden bu grupta da ortak ve yüksek emniyetli olması adına 4 adet Rexroth Marka SNS serisi 20'lik lineer kızak arabası seçilmiştir. Kullanılan araba C2 ön yükleme sınıfında olup C = 23400 N dinamik yük kapasitesi ve C_0 = 29800 N statik yük kapasitesine sahiptir. Seçilen ürün için statik yük faktörü $S_0 > 4$ eşitsizliğini sağladığını göstermek adına gerekli analitik hesaplamalar yapılmıştır.

$F_{Pr} = X_{Pr}\ .\ C$

$F_{lim} = 2{,}8\ .\ F_{pr}$

F_{Pr} (N) : Ön yük nedeniyle araba üzerindeki dahili eksenel yük

X_{Pr} : Ön yükleme faktörü (C2 sınıfı için : 0.08)

C (N) : Dinamik yük kapasitesi

F_{lim} = Kaldırma kuvveti

$F_{Pr} = 23400\ .\ 0{,}08 = 1872$ N

$F_{lim} = 2{,}8\ .\ 1872 = 5241{,}6$ N

$F_{comb\ 1}$ = 1200,17 N < F_{lim}= 5241,6 N

Birinci arabaya gelen maksimum yük hesaplanan ön yükleme kaldırma kuvvetinden daha düşüktür. Bu yüzden Rexroth kataloğundan önerdiği üzere statik yük faktörü hesabında ön yükleme kuvveti dikkate alınmıştır Arabalara gelen ön yüklemeli etkin eşdeğer yük F_{eff} hesaplaması aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$F_{eff\ n\ i} = \left(\frac{F_{comb\ n\ i}}{2{,}8\ .F_{pr}} + 1\right)^{\frac{3}{2}} . F_{pr}$$

$$F_{eff\ 1\ 1,2,3,4} = \left(\frac{1200.17\ N}{2{,}8\ .1872\ N} + 1\right)^{\frac{3}{2}} . 1872\ N = 2550{,}4\ N$$

Önyükleme kuvvetinin de lineer kızak arabasına etkisi hesaba dahil edilerek F_{max} = $F_{eff\ 1\ 1}$= 2550,4 N olarak hesaplanmıştır. Seçilen lineer kızak arabasının sahip olduğu C_0= 23400 N statik yük faktörüne göre emniyetli olup olmadığı kontrol edilmiştir.

$S_0 = C_0 / F_{max}$

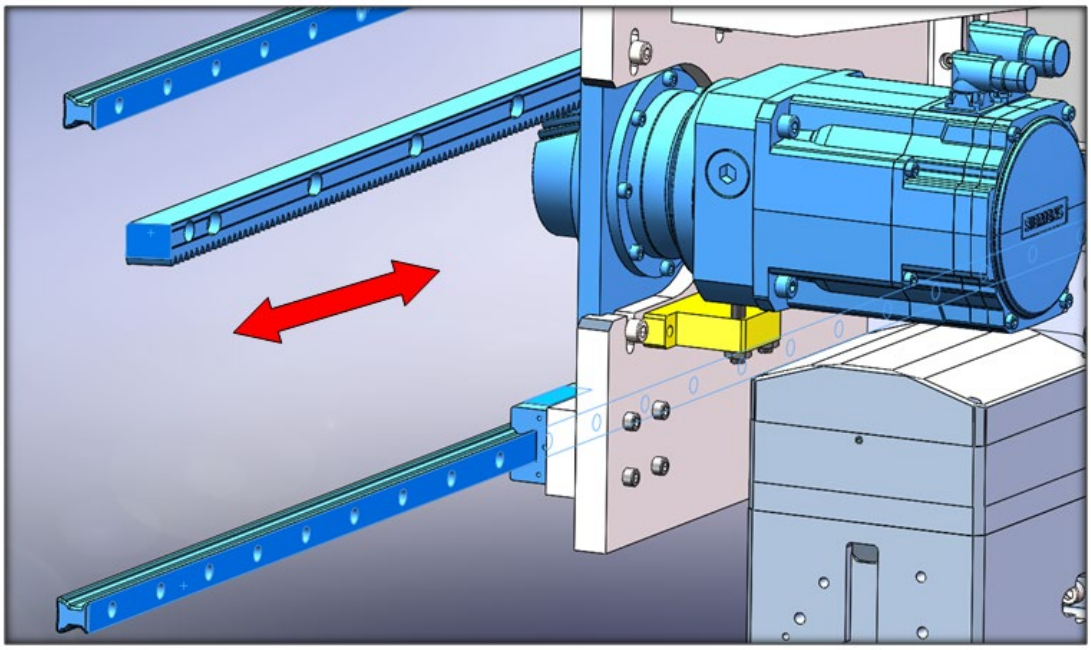
S_0= 23400 N / 2550,4 N = 9,175 olarak hesaplanmıştır. Katalogta önerilen S_0 >4 eşitlik ifadesi sağlandığı için Y-Z ekseni için seçilmiş olan lineer kızak arabalarının emniyetli olduğu doğrulanmıştır.

3.5.6. Y-Z Eksen Grubu Motor ve Diğer Mekanik Elemanların Seçimi

Lazer profil kesim makinesinde, sac lazer kesim makinelerine kıyasla Y eksen yönünde daha düşük optimum ivmelenme ve hız değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat kesim hassasiyeti için Y eksen hareketinin hassas ve sessiz olması önem arz etmektedir. Bu yüzden 4 adet lineer kızak ile yataklanan Y eksen grubunda hareket mekanizması olarak helisel pinyon dişli ve kremayer dişli kullanılmıştır. Helis dişlilerde daha büyük temas oranı sayesinde az gürültülü ve titreşimli olması ve daha düşük boşluk toleranslarına sahip olabilmesi sebebiyle daha iyi ve hassas kavrama özelliğine sahip olması sebebiyle tercih edilmiştir. Bu etkenler lazer kesim makinelerindeki kesim hassasiyeti açısından önem arz etmektedir. Sistemin hareketini sağlamak üzere 1 adet Witteinstein marka planet redüktör ve Siemens

marka servo motor kullanılmıştır. Y-Z eksen grubundaki tahrik sistemi Şekil 3.66 'da gösterilmiştir.

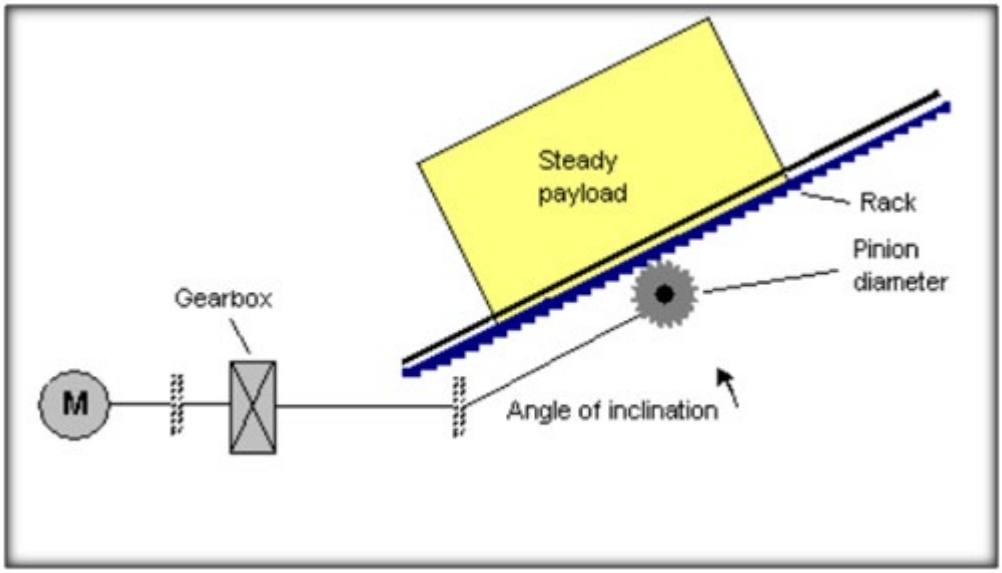
Redüktör ve motor bağlantı plakası 4 adet cıvata ile Y eksen gövdesine üzerindeki dikey koza deliklerden bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Redüktör ve motor plakası yerine takıldığında civataları tamamen sıkılmadan önce, 2 adet M8 ittirme setskurları ile alttan ittirilip pinyon dişli ve kremayer dişli arası boşluğun ayarlanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yöntem ile diş boşluğu kolaylıkla ayarlandıktan sonra redüktör ve motor plakasının montajı yapılabilecektir.



Şekil 3.66. Y-Z eksen hareket iletim sistemi gösterimi

Y-Z eksen grubunun Y eksen yönündeki boşta hareketi için maksimum ivmelenme değeri a = 8 m / s^2 olarak belirlenmiştir. Motorun seçimi için belirlenen bu ivme değerine göre tork hesaplaması yapılmıştır. Seçilecek olan motorun hesaplanan torku karşılayabilecek güç ve nominal tork değerine sahip olması noktasına önem gösterilmiştir. Siemens Sizer yazılımında sistem örnek hareket profili ile modellenerek ve atalet momentinin de etkisi dikkate alınarak hesaplamaların doğrulaması yapılmıştır. Bu doğrultuda sistemin belirlenen şartlarda güvenilir ve kararlı olarak çalışmasını sağlayacak motor seçimi gerçekleştirilmiştir.

Y-Z eksen grubunun toplam kütlesi Çizelge 3.21 ‘de 223kg olarak verilmiştir. Motorun bu kütleyi a = 8 m / s^2 maksimum ivme ile hareket ettirebilmesi için ivmelenme momenti ile lineer kızak arabalarının sürtünmesinden dolayı etki oluşan sürtünme momenti toplamını karşılayabilmesi gerekmektedir. Sistemin çalışma mantığını gösteren temel tahrik sistemi şeması Şekil 3.67’de belirtilmiştir.



Şekil 3.67. Y eksen tahrik sistemi şematik gösterimi (Sizer Yazılımı)

Çizelge 3.21 Motor hesabında gerekli parametreler

a_{max}	Y eksen maksimum ivme	8 m / s^2
V_{max}	Y eksen maksimum hız	90 m / dak
m	Y-Z eksen toplam kütlesi	223 kg
d	Pinyon Çapı	Ø 78,5 mm
μ	Lineer araba sürtünme katsayısı	0,003
g	Yer çekimi ivmesi	9,81 m / s^2
α	Sistem eğim açısı	0º
η_1	Sistemdeki mekanik verim	0,90
η_2	Planet redüktör verimi	0,97

$M_t = (M_s + M_i) / (\eta_1 . \eta_2)$

M_t : Toplam moment (Nm)

M_s : Sürtünme momenti (Nm)

M_i : İvmelenme momenti (Nm)

4 adet lineer kızak arabalı sistem için hesaplamalarda kullanılan sürtünme katsayısı değeri Rexroth firma kataloğundan 0.003 olarak alınmıştır (Şekil 3.68).

$$M_s = F_s \cdot d / 2 \quad (3.41)$$

$$M_s = m \cdot g \cdot \mu \cdot \cos \alpha \cdot d / 2 \quad (3.42)$$

$$M_s = 223\ (kg) \cdot 9{,}81\ (m / s^2) \cdot 0{,}003 \cdot \cos 0 \cdot \frac{78{,}5}{1000} / 2\ (m)$$

M_s = 0,257 Nm olarak hesaplanmıştır. Lineer kızak arabalarında yuvarlanma söz konusu olduğu için çok düşük sürtünme katsayılarından dolayı sürtünmeden dolayı oluşan moment çok düşük çıkmıştır.

Linear component	Friction coefficient μ without seal	Comment
Linear bushing and shaft	0.001 ... 0.004	Standard linear bushing
Ball rail system	0.002 0.003	2-point contact 4-point contact
Roller rail system	0.0004	Line contact
Ball screw assembly	0.004 0.010	2-point contact 4-point contact

Şekil 3.68. Lineer sistem sürtünme katsayıları (Anonim 2013)

$$M_i = F_a \cdot d / 2 \quad (3.43)$$

$$M_i = m \cdot a \cdot \cos \alpha \cdot d / 2 \quad (3.44)$$

$$M_i = 223\ (kg) \cdot 8\ (m / s^2) \cdot \cos 0 \cdot \frac{78{,}5}{1000} / 2$$

M_i = 70,02Nm olarak hesaplanmıştır. Sistem için belirlenen maksimum ivmelenme değerine göre motorun karşılaması gereken ivmelenme momentidir.

$$M_t = (M_s + M_i) / (\eta_1 \cdot \eta_2) = (0{,}257\ Nm + 70{,}02\ Nm\ ) / (0{,}90 \cdot 0{,}97)$$

M_t = 80,5 Nm olarak hesaplanmıştır. Sistemdeki Y-Z eksen grubunu belirlenen maksimum ivmede hareket ettirilebilmesi için karşılanması gereken moment değeridir. Analitik hesaplamalara göre bu moment değerine göre planet redüktör ve motor seçimi yapılmıştır. Sistemdeki atalet oranının etkisi analitik hesaplamalarda dikkate alınmasa da 4. bölümde açıklandığı üzere Siemens Sizer yazılımında ataletin

etkisi de kontrol edilerek motor seçimi doğrulanmıştır. Atalet oranı motorun sistemi kararlı çalıştırabilmesi adına bakılması gerektiği için bu konuya özellikle dikkat edilmiştir.

Y-Z eksen için Witteinstein marka TP 010S-MF1-7-0G0-2S model planet redüktör seçimi yapılmıştır. Hesaplanan moment değerine göre Siemens marka 1FK2206-4AF00-0MB0 model servo motor seçimi yapılmıştır. Planet redüktör ve servo motora ait teknik özellikler Çizelge 3.22 ve 3.23'te verilmiştir.

Çizelge 3.22 Y-Z eksen grubu planet redüktör teknik özellikleri (Anonim 2020b)

Çevrim Oranı	i	10
Maksimum Tork (Nm)	T_{2a}	168
Maksimum İvmelenme Torku (Nm)	T_{2B}	126
Nominal Tork (Nm)	T_{2N}	81
Nominal Giriş Hızı (rpm)	n_{1n}	2100
Maksimum Giriş Hızı (rpm)	n_{1max}	7500
Maksimum Radyal Geri Boşluk (arcmin)	j_t	Standard ≤ 3 / Yüksek ≤ 1
Tam Yükte Verim (%)	η	97
Servis Ömrü (saat)	L_h	>20000
Ağırlık (kg)	m	3,8
Kütle atalet momenti (kg cm^2)	J_1	1,94

Çizelge 3.23 Y-Z eksen grubu servo motor teknik özellikleri (Anonim 2021b)

Nominal Çıkış Hızı (rpm)	n_N	3000
Maksimum Çıkış Hızı (rpm)	n_{max}	5800
Nominal Çıkış Torku (Nm)	M_0	12
Nominal Güç (kW)	P_N	2,85
Motorun Ataleti (kg m^2)	J	0,001510
Fren Durumu	-	frensiz
Kama Durumu	-	kamasız

$M_Ç = M_0 . i$ (3.45)

$M_Ç$ (Nm) : Sistem Çıkış Torku (Nm)

$M_Ç = M_0 . i = 12 . 10 = 120$ Nm olarak bulunmuştur. Kullanılan motor ile nominal devirde redüktör çıkışından sağlanabilecek olan moment değeridir.

$M_Ç = 120$ Nm > $M_t = 80,.5$ Nm eşitsizliği sağlandığından dolayı sistemde seçilen servo motor ve redüktörden elde edilen tork değerinin Y-Z eksenin hareketi için emniyetli olarak karşılanabilecektir.

Sistemde Witteinstein Alpha marka standart RTP 010-A02-5e24-37 model helis pinyon dişli ve ZST 200-333-1000-R1D-3 model helis kremayer kullanılmıştır. Aranan yüksek kesim hassasiyetleri nedeniyle kremayer hassas, taşlanmış ve sertleştirilmiş ve düşük boşluklu olması önem arz etmektedir. Eş çalışan dişlilerde en büyük gerilmelerin diş dibinde meydana geldiğinden ve seçilen pinyon malzemesinin yüksek sertliği nedeniyle pinyon modülü için diş dibi gerilmesine göre mukavemet kontrolü yapılmıştır. Diş ezilmesine göre modül daha düşük çıkacağı için hesaplaması yapılmamıştır.

z = 37 (Diş sayısı)

m= 2 (Modül)

d_0 =78,5 mm (Taksimat dairesi çapı)

β = 19 º (Helis açısı)

b = 26 mm (Diş genişliği)

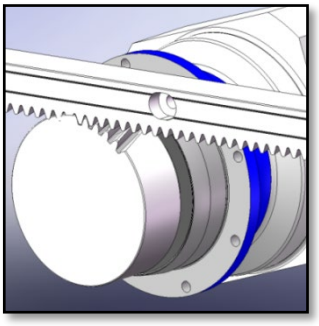
Malzeme : 16MnCr5

σ_{Flim} = 700 Mpa (16MnCr5 Malzemesi için diş dibi gerilmesi)

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 . M_b . 10^3 . \cos^2 \beta . K_A}{{Z_1}^2 . \psi_d . {\sigma^2}_{Fem}} . Y_F . Y_\varepsilon . K_{F\alpha}} \quad (3.46)$$

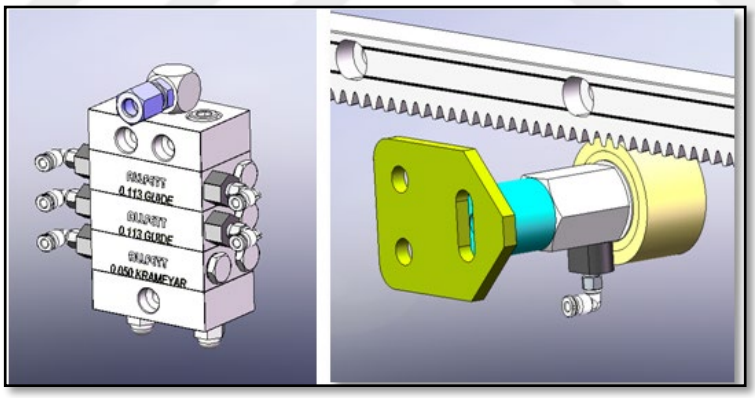
Formülasyondaki bazı faktörler ve değerler varsayımlarda da bulunarak katalog değerlerinden alınmıştır (Avcıl 2006).

$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 . 80,5 . 10^3 . \cos^2 19 . 1}{37^2 . \frac{26}{78,5} . \frac{700}{3}} . 2,2 . 1 . 1,1}$ = 1,5 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla diş dibi mukavemet kontrolüne göre seçilen modül m = 2 uygundur.



Şekil 3.69. Y eksen pinyon ve kremayer dişli gösterimi

Lazer makinelerinde lineer kızak arabalarının uzun ömürlü kullanımı için genelde zaman ayarlı otomatik yağlama pompası kullanılmaktadır. Otomatik yağlama ünitesinden alınan hat makinede orta noktada biryerde konumlandırılan ana dağıtıcı bloğa gelmektedir. Ana dağıtıcı bloklardan ilgili makine gruplarına hat çekilerek grupların üzerindeki yağlama bloklarına hat çekilmektedir. Tasarımı yapılan sürtünmeli delme üniteli Y-Z eksen grubunda toplam 12 adet lineer kızak arabası ve 1 adet yağlama pinyon dişlisi bulunmaktadır. Bu ürünlerin uzun ömürlü olması için Y eksen gövdesi üzerinde montajlanacak 1 adet 5 çıkışlı yağlama bloğu kullanılmıştır.

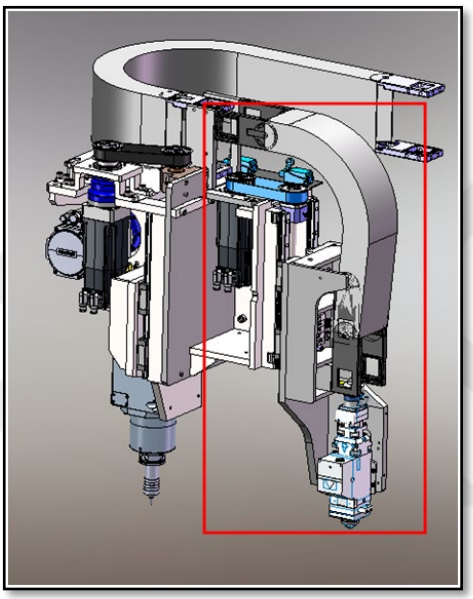


Şekil 3.70. Y eksen yağlama pinyonu ve yağlama bloğu gösterimi

3.5.7. Lazer Kesim (Z2 Eksen) Ünitesi Tasarımı

Lazer kesimde beklenen kesim hassasiyeti ve kısa proses süreleri için kesim kafasının Z2 eksen yönünde yüksek ivmeli ve hızlı hareket etmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Grup tasarımı için seçilen motor hesaplamalarında Z2 eksen hareketi için maksimum ivme 16 m / s^2 ivme, maksimum hız 30 m / dak olarak belirlenmiştir.

Lazer kesim sırasında gövdeye grubun ağırlığı dışında ekstra bir yük gelmemektedir. Ayrıca istenen hız ve ivme değerlerinin elde edilmesi adına Z2 eksenin hafif olması önemlidir. Bu yüzden Z2 eksen gövdesi konstrüksiyon malzemesi olarak AlMg3 (5754) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Sistemde lineer kızak araba yataklamalı, vidalı milli ve kayış-kasnaklı hareket sistemi bir arada kullanılmıştır. Tahrik için adet 1 adet Siemens marka servo motor kullanılmıştır. Servo motordan alınan tahrik zaman kayış kasnağı ve kayışı ile vidalı mile aktarılarak Z2 eksen yönündeki hareket kontrol edilmektedir.



Şekil 3.71. Lazer kesim ünitesi (Z2 Eksen) gösterimi

Servo motorun hareket ettireceği toplam Z2 eksen kütlesi 25kg ‘dır. Maksimum ivmeli hareketten dolayı ivmelenme kuvveti ve kütleden dolayı ağırlık kuvveti sisteme etki etmektedir.

$F = F_g + F_i$

$F = 25\ (kg)\ .\ 9{,}81\ m / s^2 + 25\ (kg)\ .\ 16\ m / s^2$

F = 645,25 N olarak hesaplanmıştır. Sistemdeki oluşacak bu kuvvet, sürtünmeli delme ünitesinde oluşacak toplam kuvvete göre çok düşüktür. Bu yüzden Z1 eksen için seçilen Rexroth Marka SNS serisi 20’lik lineer kızak arabası Z2 eksen grubu için de emniyetli olacaktır. Sistemde 4 adet SNS serisi 20 ‘ lik lineer kızak arabası kullanılmıştır.

Lazer kesim kafası çevrim boyunca maksimum bu kuvvete kaldığı varsayımı yapılırsa vidalı mil seçimi emniyetli olarak yapılmış olacaktır. Bu kuvvete göre C dinamik yük katsayısı hesaplaması yapılarak 16 x 10R boyutunda FEM-E-B serili dahil vidalı mil ve somun seçimi yapılmıştır.

$$C = F_M \text{ x } \sqrt[3]{\frac{L}{10^6}}$$

Bölüm 3.5.3'te L_H = 24 000 saat için L = 512 064 000 devir olarak hesaplanmıştı

$$C = 645{,}25 \text{ x } \sqrt[3]{\frac{512\,064\,000}{10^6}} = 5159.2 \text{ N}$$ olarak bulunmuştur.

C = 11 500 N (> 5159,2 N) eşitsizliğe göre sistem vidalı mili emniyetle çalışacaktır.



Ordering data:

BASA	20 x 5R x 3	FEM-E-B - 4	00	1	2	T7	R	82Z120	41Z120	1250	0	1

Category	Size d_0 x P x D_w - i	Part number	Load ratings[3] dyn. C (N)	stat. C_0 (N)	Linear speed[1] v_{max} (m/min)
A	16 x 5R x 3 - 4	R1502 010 63	14,800	16,100	30
A	16 x 10R x 3 - 3	R1502 040 83	11,500	12,300	60
A	16 x 16R x 3 - 3	R1502 060 83	11,200	12,000	96
A	20 x 5R x 3 - 4	R1502 110 83	17,200	21,500	30
A	20 x 10R x 3 - 4	R1502 140 63	16,900	21,300	60

Şekil 3.72. Lazer kesim ünitesi seçilen vidalı mil (Anonim 2021a)

$M_t = M_{ta} + M_s$

$$M_{ta} = \frac{F_L \,.\, P}{2000 \,.\pi \,.\eta}$$

$$M_{ta} = \frac{(F_i + F_g) \,.\, P}{2000 \,.\pi \,.\eta} = \frac{645{,}25\,(N).\ 10\,(mm)}{2000 \,.\pi \,.0{,}8} = 1.28 \text{ N}$$ olarak hesaplanmıştır.

M_s = 1,24 Nm + 0,15 Nm = 1,39 Nm olarak hesaplanmıştır.

M_t = 1,28 + 1.39 = 2.67 N olarak hesaplanmıştır. Vidalı milde oluşan bu momentin motor tarafından karşılanması gerekmektedir. Bu tork değerine göre Sistemde

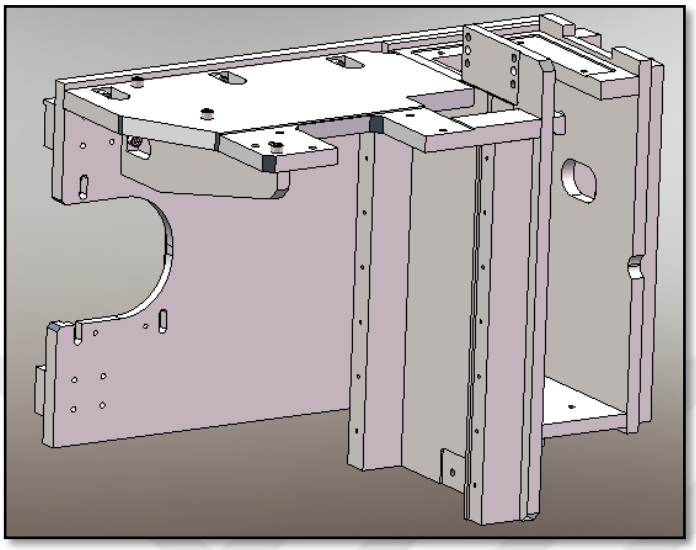
1FK2205-4AF10-0MB0 tip Siemens marka servo motor kullanılmıştır. Motor sürtünmeli delme ünitesinde kullanılan motor ile aynıdır. Fakat Z2 eksendeki düşük tork ihtiyacı nedeniyle redüktör kullanılmamıştır. Motora ait teknik özellikler Çizelge 3.18'de verilmiştir. $M_Ç = 6$ Nm > $M_t = 2,67$ Nm eşitsizliği sağlandığından dolayı sistemde seçilen servo motor hesaplanan maksimum momenti emniyetli olarak sağlayabilecektir.

3.5.8. Y-Z Eksen Gövdesi Maksimum Yükteki Statik Analizi

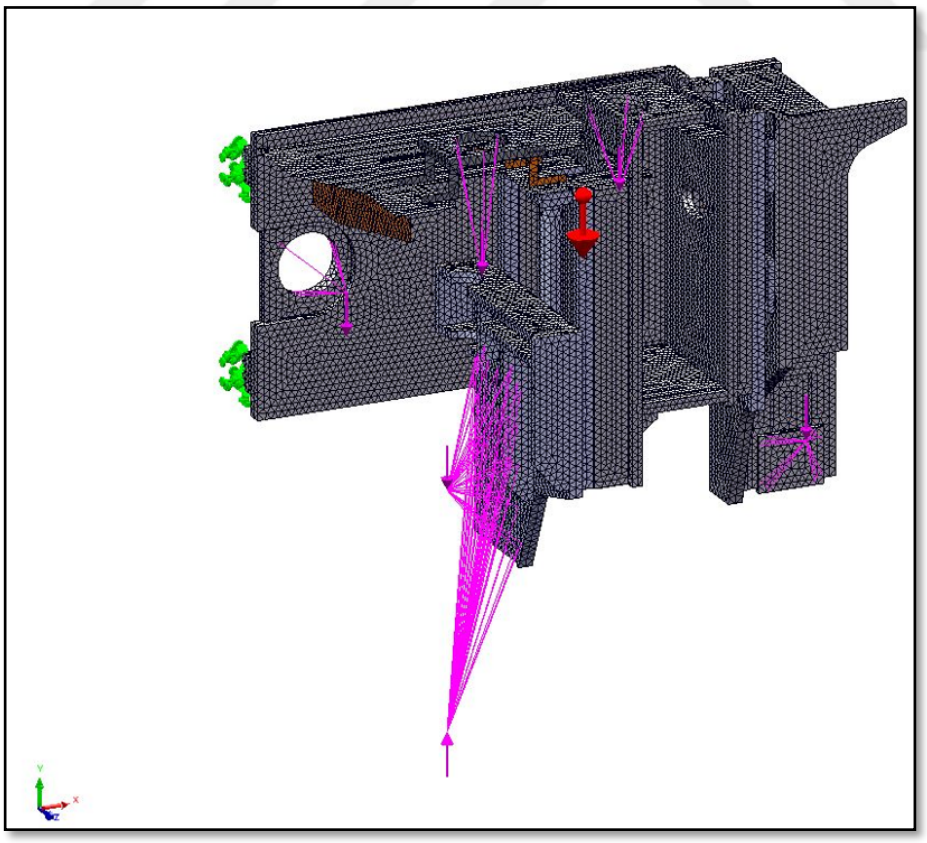
Sac lazer kesim makinelerinde Y-Z eksen gruplarında sistemin ağırlık kuvveti dışında ekstra bir yük gelmediği için genelde gövde malzemesi olarak alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Bunun sebebi yüksek hız ve ivme gerekli olduğu için sistemin hafif olmasını sağlamaktır. Lazer profil kesim makinelerinde maksimum profil kapasitesinden dolayı Y eksen yönündeki kurs en fazla 170-300 mm aralığındadır. Bu yüzden sac lazer makinelerindeki kadar Y eksen yönünde yüksek ivme ve hız ihtiyacı yoktur. Tasarımı yapılan sürtünmeli delik delme üniteli Y-Z eksen grubunda Y eksen gövdesi ve sürtünmeli delme spindle motorunu taşıyan Z1 eksen gövde malzemesi St 44 çeliği seçilirken, lazer kesim kafasını taşıyan Z2 eksen gövde malzemesi olarak AlMg3 (5754) alüminyum alaşımı seçilmiştir. Tasarlanan sürtünmeli delme üniteli Y-Z eksen grubunda, M12 delme prosesi esnasında ağırlık kuvvetine ilave olarak 8000N itme kuvveti gelecektir. Bu kuvvete karşı gövdenin daha rijit olması amacıyla malzeme olarak çelik olmasının daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür. Lazer profil kesim makinelerinde firmaların kesim için yaklaşık olarak verdiği ± 0,2 pozisyon hassasiyetinin, ayrıca tekrarlanabilirlik ve diklik hassasiyetlerinin, sürtünmeli delik delme ünitesi ile delinecek delikler için de sağlanması gerektiği düşünülmüştür. Bu yüzden bu hassasiyetlerin delik delmede de sağlanabilmesi adına gövde rijitliği önemlidir.

Y eksen gövde malzemesinin St 44 çeliği ve AlMg3 alüminyum alaşımı olduğu durumları için maksimum yük durumundaki statik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak malzeme seçiminin doğruluğu yorumlanmıştır. Analizler Solidworks Simulation yazılımında gerçekleştirilmiştir. Y-Z eksen grubundaki her

parça için ayrı ayrı Solidworks kütüphanesinden malzeme atamaları yapılarak, analiz sonuçlarında önem arz eden elastiklik modülü, poisson oranı, kütle yoğunluğu ve akma mukavemeti değerleri kontrol edilmiştir.

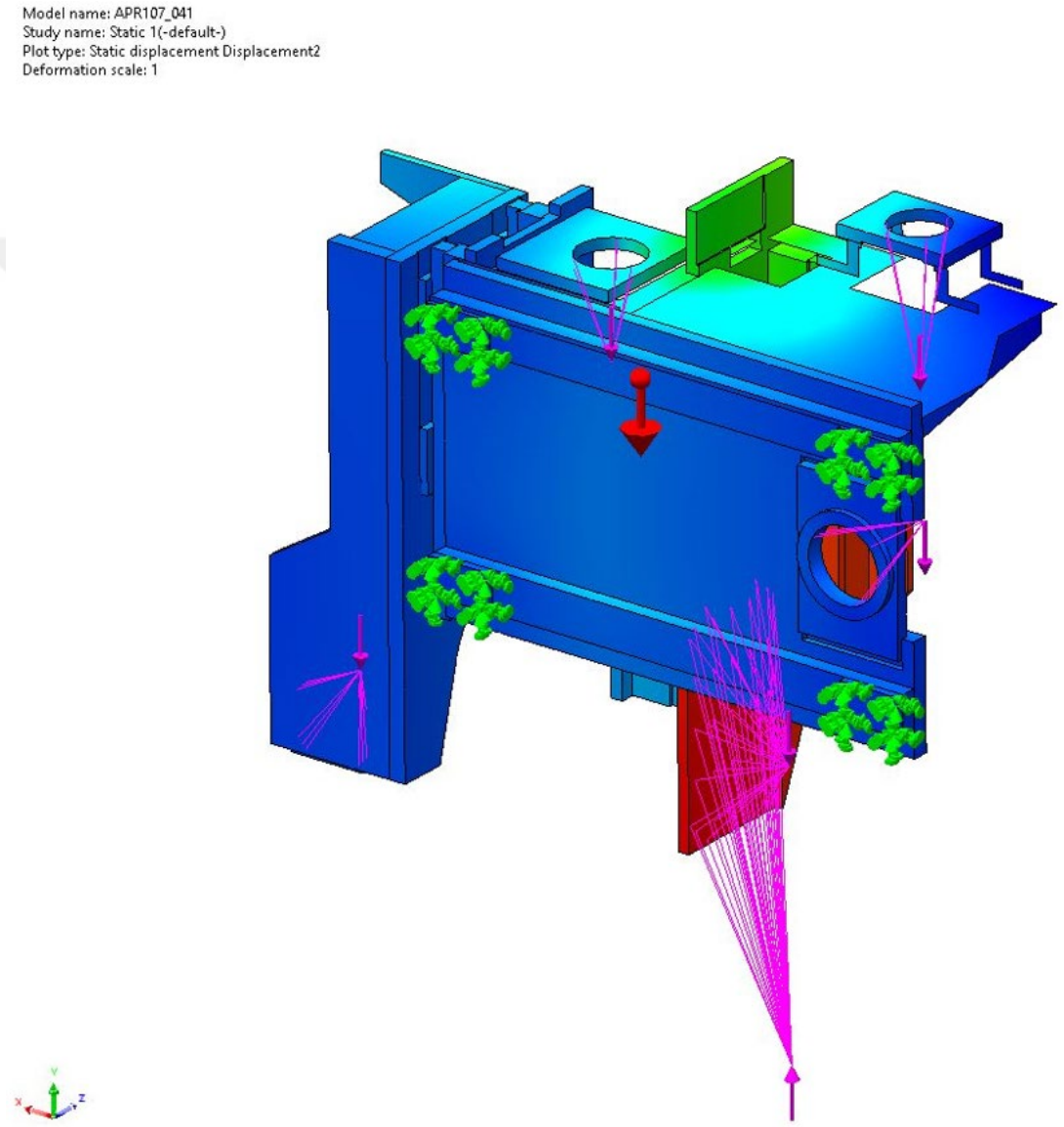


Şekil 3.73. Y eksen gövdesi gösterimi

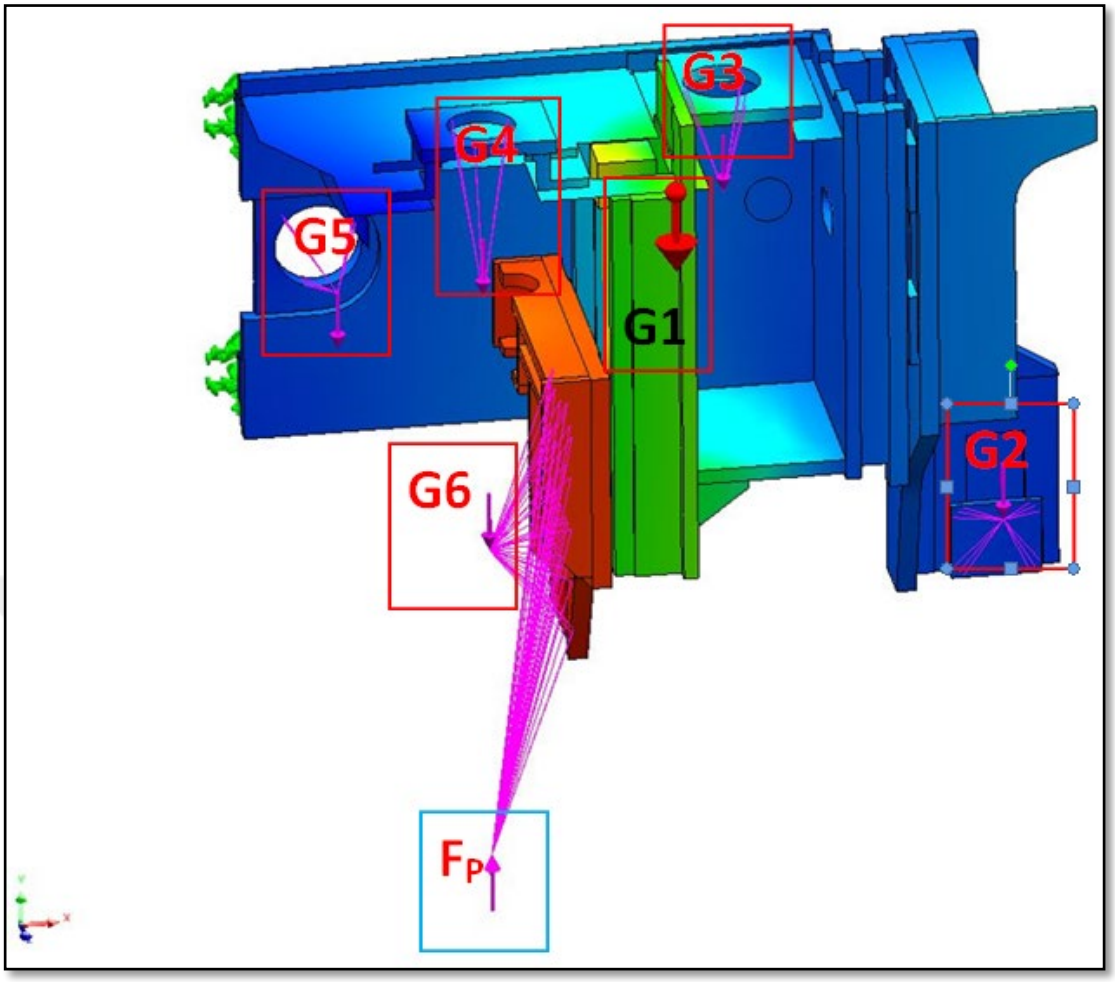


Şekil 3.74. Y eksen gövdesi statik analizi için oluşturulan mesh yapısı

Analizde Y-Z eksen grubu ana gövdesinin alüminyum ve çelik malzemeli durumlarının karşılaştırılması amaçlandığı için orta mesh kalitesinde maksimum eleman büyüklüğü 10 mm, minimum eleman büyüklüğü 1 mm boyutlarında ve curvature – based mesh tipi seçilmiştir (Şekil .74.)



Şekil 3.75. Statik analiz için belirlenen sınır koşulları arka görünüş



Şekil 3.76. Statik analiz için belirlenen sınır koşulları ön görünüş

Analizin problemsiz çözümü için parça tasarımları mümkün olduğu kadar basitleştirilmiştir. Motorlar ve diğer parçalar analiz modelinden kaldırılmış, bu komponentlerin ağırlıkları, ağırlık merkezlerinden noktasal kütlelerek atılarak analize dahil edilmiştir. Gövde kendi ağırlığı G1, diğer parçaların ağırlıkları G2, G3, G4, G5 ve G6 olarak belirtilen ağırlık merkezlerinden tanımlanmıştır. Spindle motora bağlı takım ucu noktasından M12 sürtünmeli delme sırasında gelecek 8000 N maksimum yük değeri F_p olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.76). Y eksen gövdesinin delme sırasında Y eksen yönündeki hareketi motor tarafından durdurulup sabitlenmektedir. Bu yüzden gövde 4 adet lineer kızak arabasından sabitlenerek x, y ve z yönündeki yer değiştirmeler 0 olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.75). Proses sırasında birbirleriyle kenetlenmiş gibi davran parçalar arasında bonded connection bağlantı tipi tanımlanmıştır. Elde edilen statik analiz sonuçları 4.Bölüm'de açıklanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sürtünmeli delik delme ve projeksiyon somun kaynağı proseslerinin uygulandığı numunelere ait çekme testi sonuçları sırasıyla M6, M8, M10 ve M12 deliklere sahip numuneler için verilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8). Çekme testlerinde her numune için maksimum çekme kuvveti, kopma anındaki kuvvet, maksimum kuvvetteki % uzama ve kopma sırasındaki % uzama değerleri veri olarak raporlanmıştır. Ayrıca çekme testlerine ait kuvvet-% uzama grafikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Numunelere ait çekme testi sonuçları

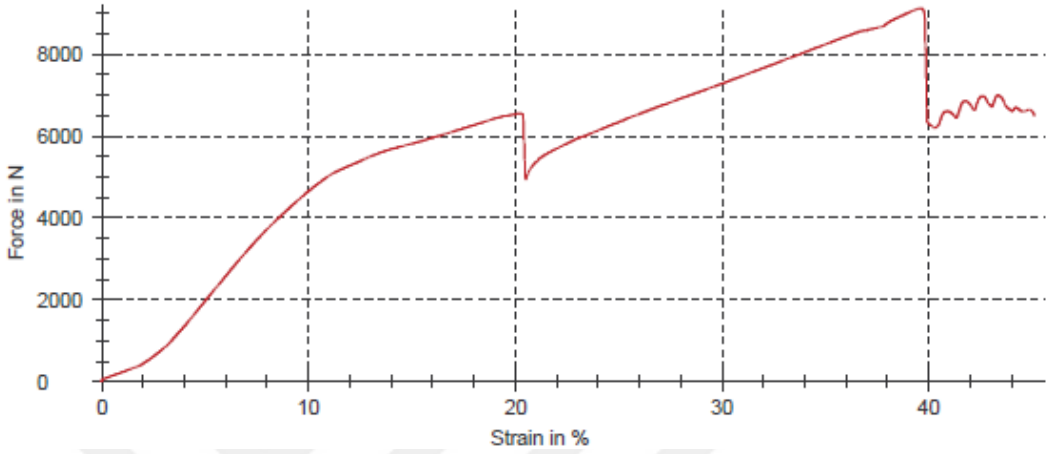
Delik Çapı	Maksimum Kopma Kuvveti (Newton)	
	Kaynak Somunlu Numune	Sürtünmeli Delme Uygulanan Numune
M6	9120	6690
M8	13800	8980
M10	17300	14400
M12	28400	22300

Numunelere yapılan çekme testi sonuçları kaynak somun prosesiyle elde edilen montaj delik bölgelerinin her numune için daha yüksek kopma kuvvetlerine sahip olduğu fakat sürtünmeli delme prosesi ile elde edilen delik mukavemetlerinin de yakın değerlere sahip olduğunu göstermiştir (Çizelge 4.1). Sonuçların mukavemet yeterliliğinin incelenmesi amacıyla, bir otomotiv üreticisinin kaynak somunlu bazı sac parçaların çekme testlerinde beklediği minimum çekme kuvveti değerleri Çizelge 4.2’ de belirtilmiştir.

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	9120	34,3	6500	39,2

Series graph:

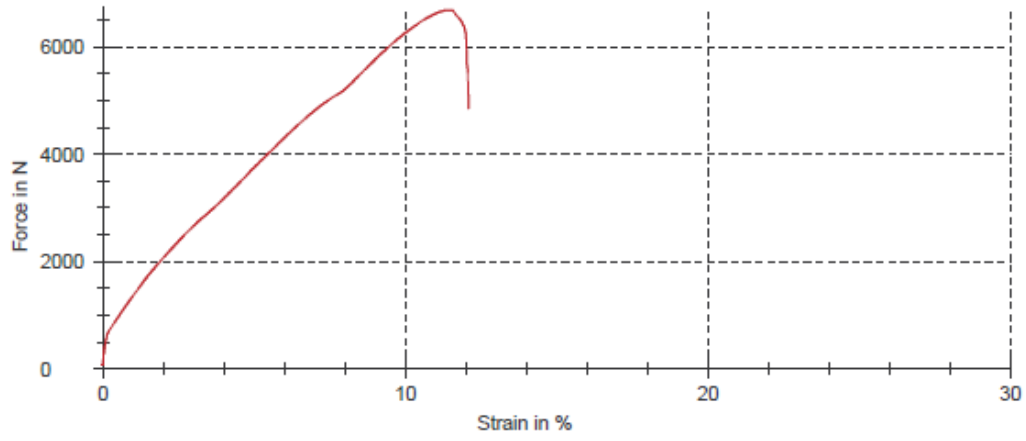


Şekil 4.1. M6 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	6690	10,3	4860	10,9

Series graph:

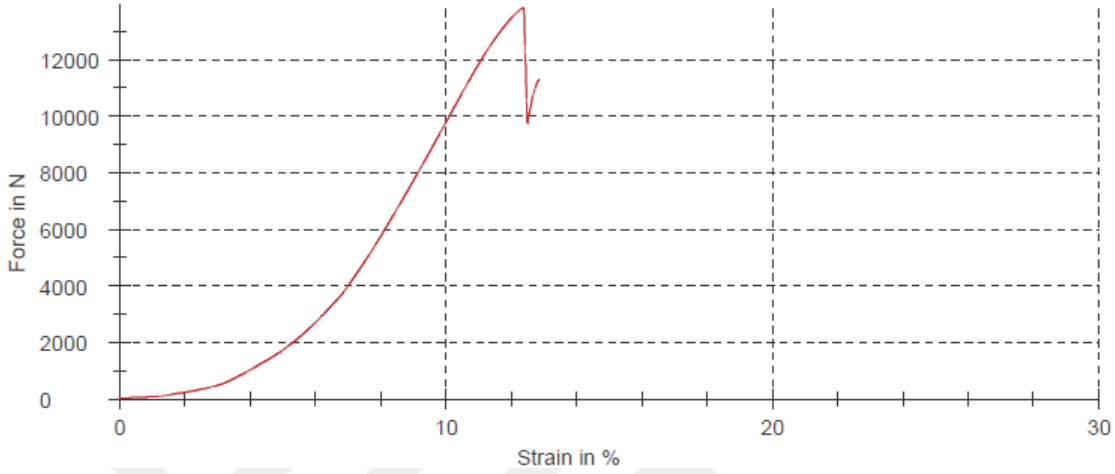


Şekil 4.2. M6 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	13800	11,1	11300	11,5

Series graph:

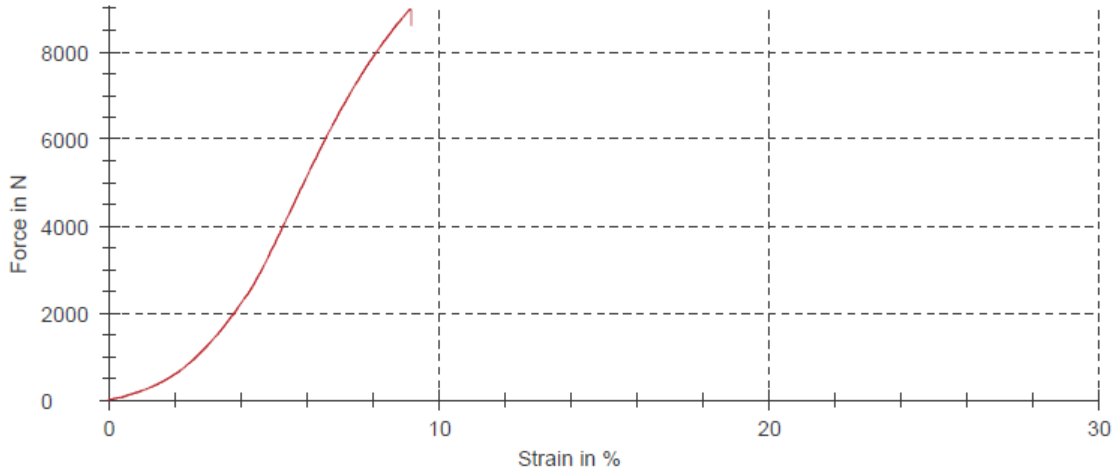


Şekil 4.3. M8 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	8980	7,5	-	-

Series graph:

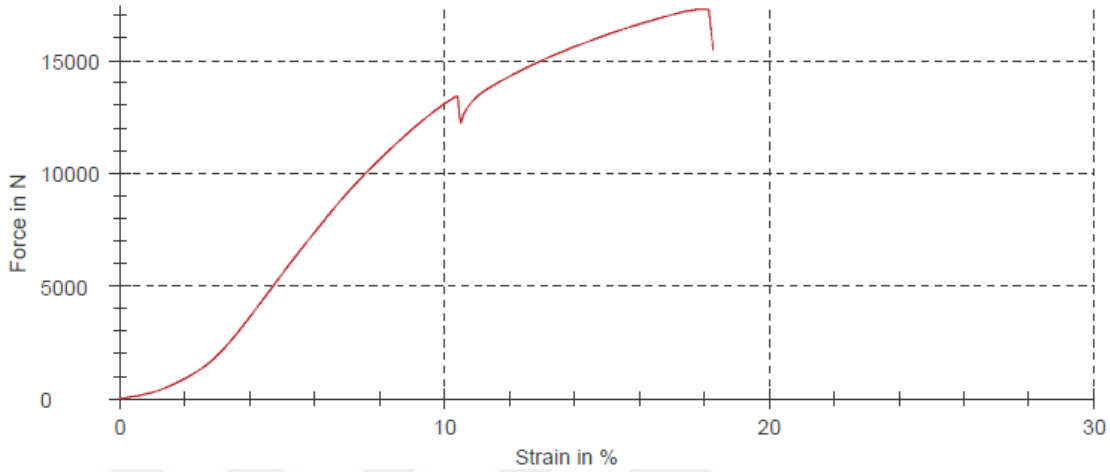


Şekil 4.4. M8 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	17300	16,1	15500	16,3

Series graph:

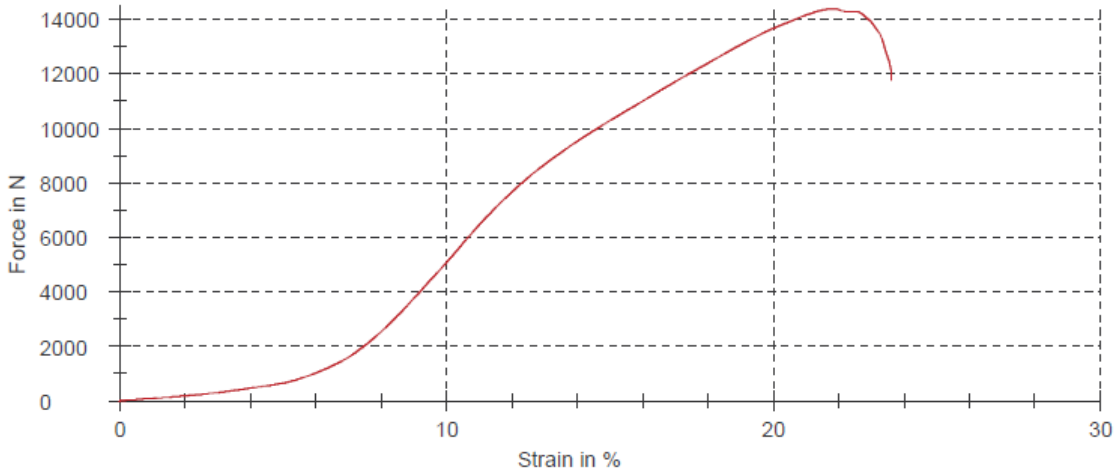


Şekil 4.5. M10 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	14400	17,9	11800	19,4

Series graph:

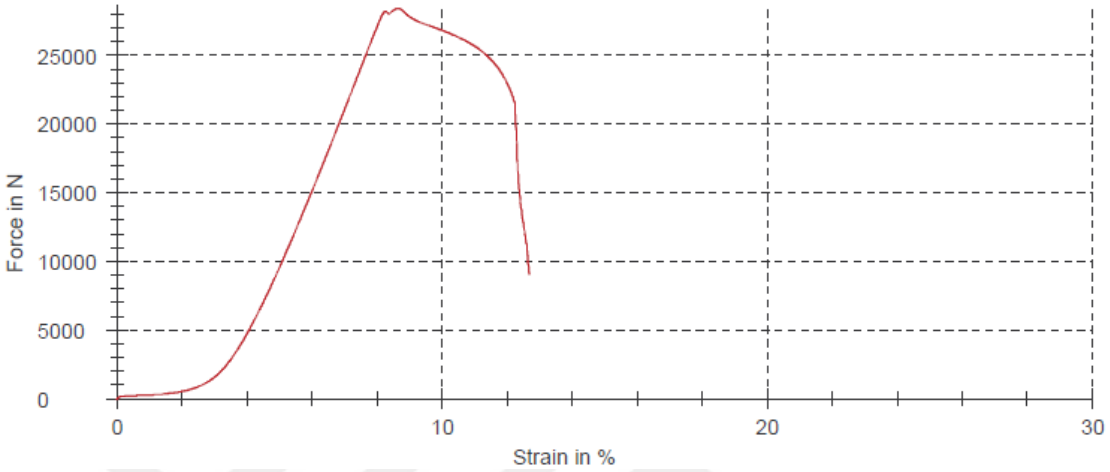


Şekil 4.6. M10 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
2	28400	8,6	9030	12,7

Series graph:

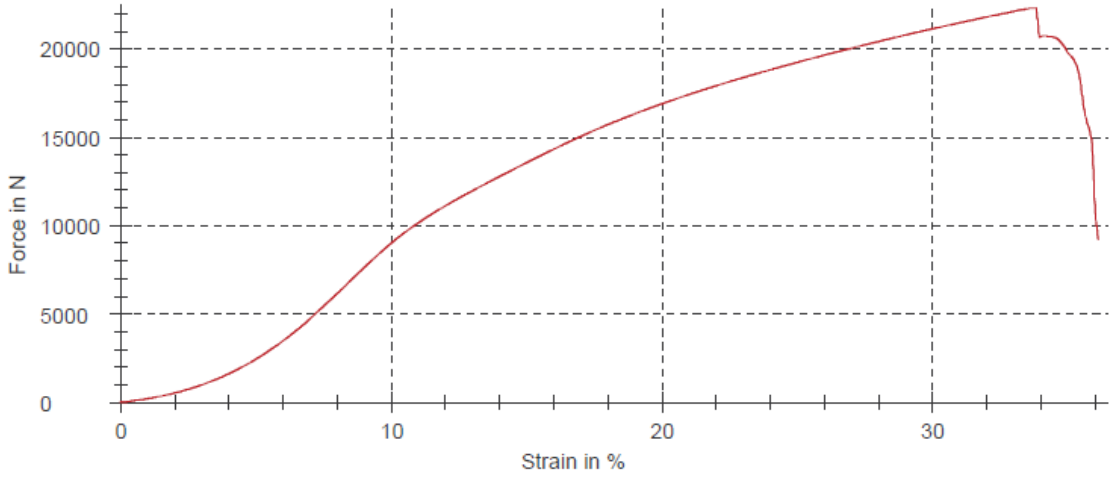


Şekil 4.7. M12 somun kaynaklı numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Test results:

No.	F_{max} N	dL at F_{max} mm	F_{Break} N	dL at break mm
1	22300	27,1	9230	29,0

Series graph:



Şekil 4.8. M12 sürtünmeli delme uygulanmış numuneye ait çekme testi sonuç tablosu ve grafiği

Çizelge 4.2 Bir otomotiv üreticisinin kaynak somunlu parçaların çekme testinde beklediği dayanım tablosu

Kaynak Somunu Çapı	M6	M8	M10	M12
İstenen Minimum Çekme Kuvveti (N)	2300	2900	3900	5500

Çekme testinde üretici firmanın M6 delikte istediği çekme kuvveti değeri minimum 2300 N olarak belirtilmiştir. M6 sürtünmeli delme uygulanan numunenin çekme testinde ölçülen çekme kuvveti maksimum 6690 N olup 2,9 kat emniyetli olarak firma talebini karşıladığı görülmektedir.

M8 için firma şartnamesinde istenen değer 2900 N olarak belirtilmiştir. M8 sürtünmeli delme uygulanan numunenin çekme testinde ölçülen çekme kuvveti maksimum 8980 N olup 3,1 kat emniyetle şartname gerekliliğini karşıladığı görülmektedir.

M10 için firma şartnamesinde istenen değer 3900 N olarak belirtilmiştir. M10 sürtünmeli delme uygulanan numunenin çekme testinde ölçülen çekme kuvveti maksimum 14400 N olup 3,7 kat emniyetle şartname gerekliliğini karşıladığı görülmektedir.

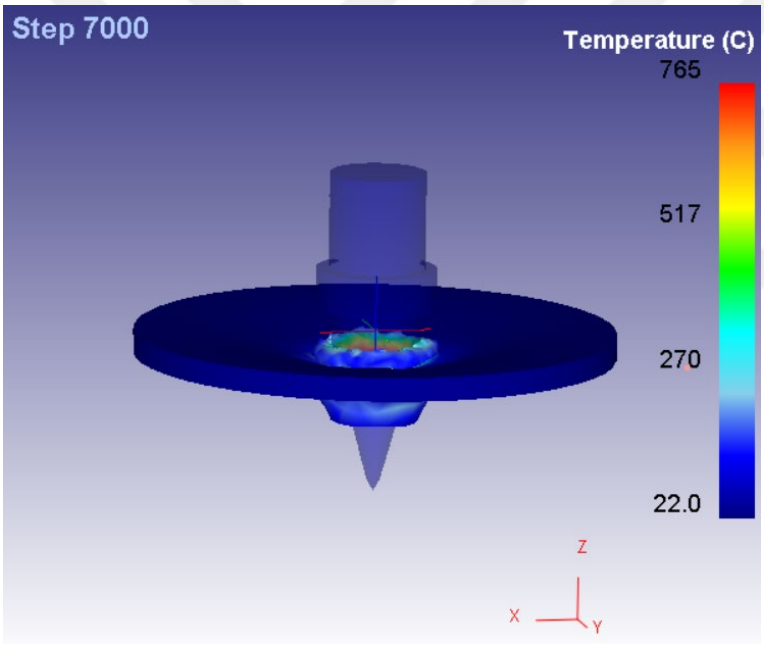
M12 için şartnamede istenen değer 5500 N olarak belirtilmiştir. M12 sürtünmeli delme uygulanan numunenin çekme testinde ölçülen çekme kuvveti maksimum 22300 N olup 4 kat emniyetle şartname gerekliliğini karşıladığı görülmektedir.

Numunelerin test sonuçları, tez çalışması sonucu lazer profil kesim makinesine opsiyon olacak olan sürtünmeli delik delme ünitesi ile uygulanacak prosesin montaj delikleri için talep edilen istediği gereklilikleri karşılayabileceğini ve otomotivde yaygın olarak kullanılan somun kaynağı yöntemine mukavemet açısından alternatif olabileceğini göstermiştir. Sürtünmeli delme prosesinin uygulama aşamasında farklı parametre kombinasyonları ile daha kaliteli ve mukavemeti yüksek delik bölgelerinin elde edilmesinin mümkün olacağı öngörülmektedir.

İlerideki yapılabilecek olan çalışmalar ile birlikte lazer profil makinesine ilave bir opsiyon olacak sürtünmeli delik delme ünitesinin kullanımı ile işçilik, malzeme ve zaman maliyetiyle alakalı avantajları ortaya koymak mümkün olacaktır.

4.2. M12 Sürtünmeli Delme Proses Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Gerilme ve sıcaklık dağılımları, sürtünmeli delmede sürtünmenin iş malzemesini nasıl ısıttığını ve yumuşattığını göstermektedir. Yüksek sıcaklık, temas bölgesindeki iş malzemesini yumuşatır ve kovan oluşumunu gerçekleştirmektedir. Analiz sonucu Şekil 4.9 'da iş parçasında sürtünmeli delme işleminin oluşturduğu kovan yapısı gösterilmiştir.

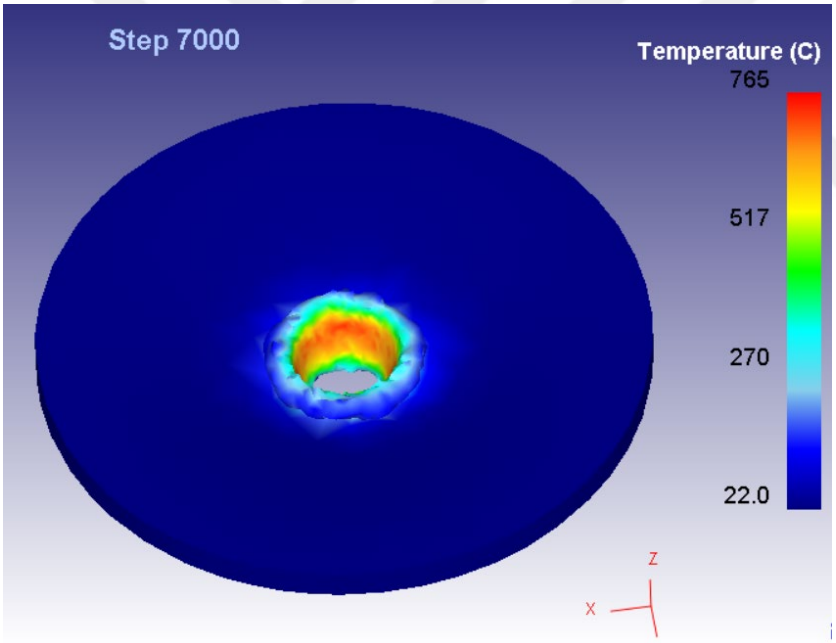


Şekil 4.9 Sürtünmeli delme analizi sonucu oluşan kovan (burç) yapısı

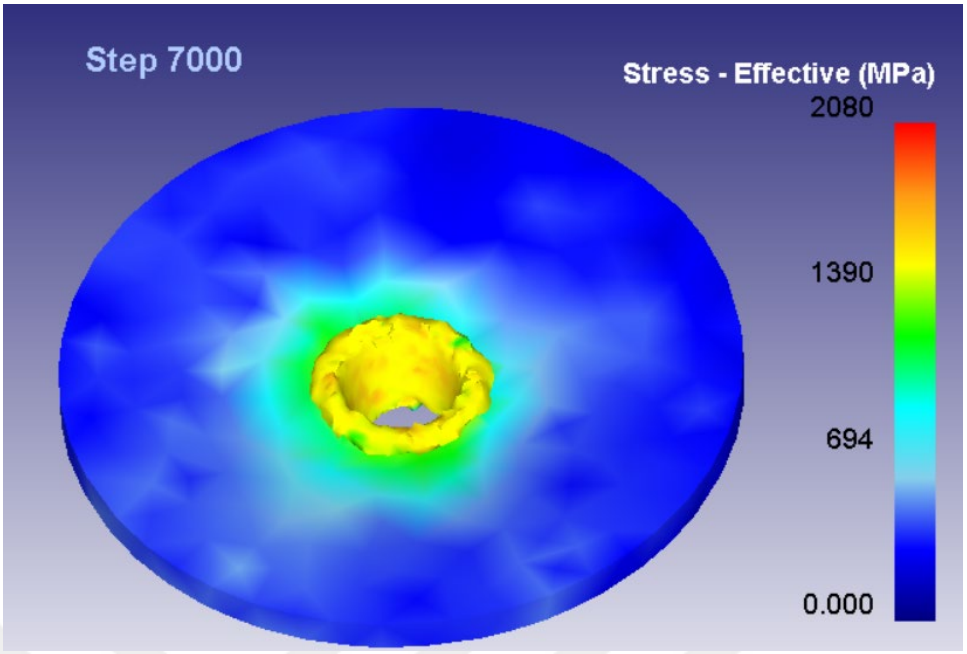
Şekil 4.10'da iş parçası yüzeyinde sıcaklık değişimi ve Şekil 4.11'de iş parçası üzerindeki eşdeğer gerilmenin değişimi verilmiştir. Takımın iş parçasına temas ettiği bölge maksimum gerilim alırken iş parçasının kenarları gerilimden etkilenmez ve mavi renkte görünmektedir. Şekil 4.12 'de analiz sonucu oluşan efektif gerinim dağılımı belirtilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değeri, maksimum gerilme ve gerinim değerleri seçilecek olan takım ucu ve spindle

motor ürünlerinin sahip olması gerektiği özelliklerinin belirlenmesi noktasında önemli ön bilgiler vermektedir.

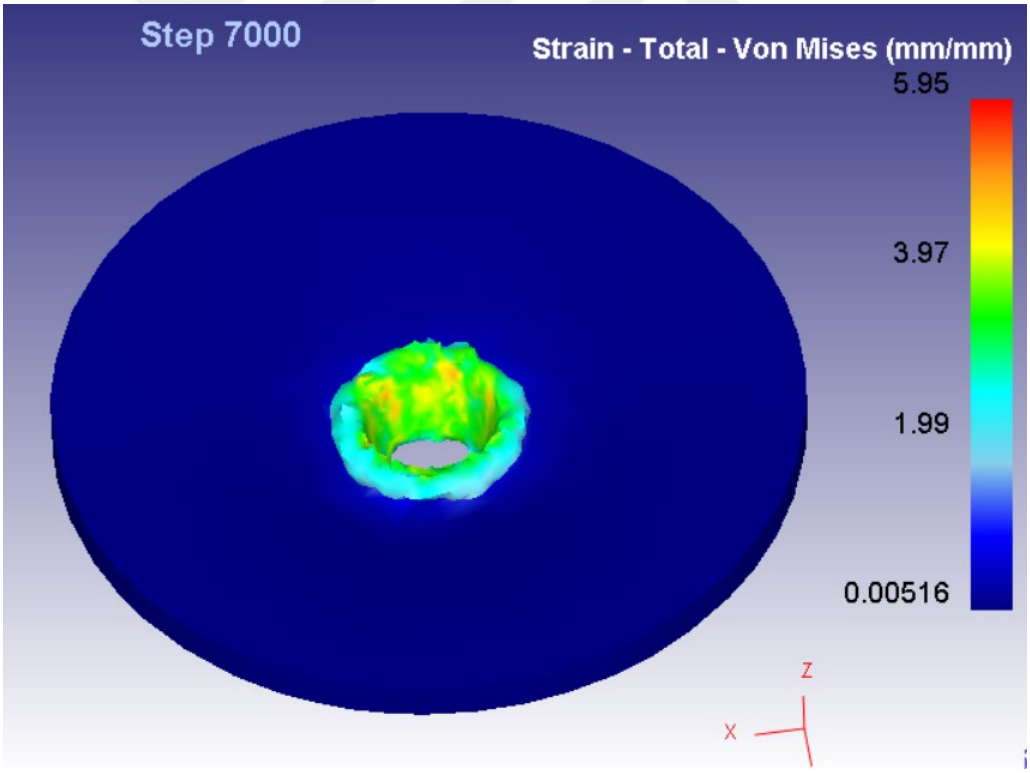
Analiz sonucuna göre iş parçasında oluşan maksimum sıcaklık değeri takım ucu ile temas yüzeyinde 764,8 °C'dir. Uygulamada farklı kalınlıklar ve farklı kimyasal bileşime ve dayanıma sahip malzemelerin delinmesinde bu sıcaklık değeri daha da fazla olabilir. Buna göre seçilecek olan takım uçlarının yüksek sıcaklık ve aşınma dayanıma sahip olması gerektiği ortadadır. Tasarlanacak sürtünmeli delme ünitesinde seçilecek olan spindle motor, takım tutucu oluşacak aşırı ısınma sebebiyle zarar görmemesi ve uzun ömürlü olabilmesi için soğutma konusu ciddi önem arz edecektir. Bu problemin önüne geçmek adına tasarımda kullanılacak olan spindle motora uygun soğutucu sistemi kullanılması öngörülmüştür.



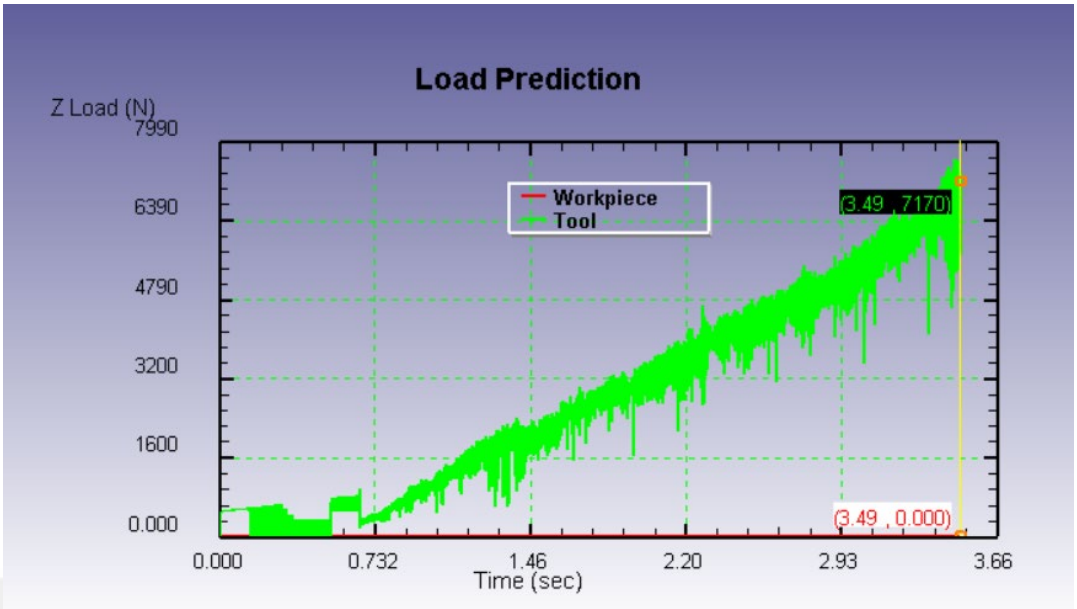
Şekil 4.10. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası sıcaklık dağılımı



Şekil 4.11. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası gerilme dağılımı



Şekil 4.12. Sürtünmeli delme analizi sonucu iş parçası gerinim dağılımı



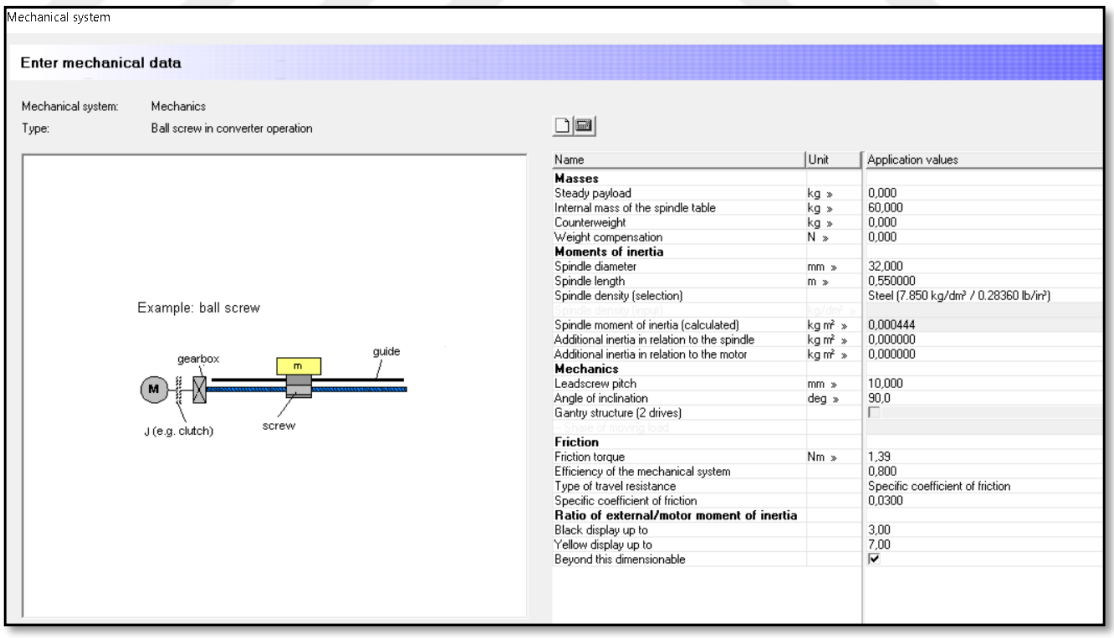
Şekil 4.13. Sürtünmeli delme analizi sonucu oluşan eksenel yük grafiği

Şekil 4.13'te analiz sonucu elde edilen eksenel yük grafiği tasarımda delinecek maksimum delik olan M12 delik için takımda oluşan eksenel yük dağılımını göstermektedir. Analize göre takımda oluşan maksimum eksenel kuvvet değeri 7960N olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerin literatür çalışmalarında delik çapına göre M12 delik için verilmiş olan itme kuvveti değerleri incelendiğinde tutarlı olduğu görülmüştür. Bu maksimum eksenel yük değeri tasarımda kullanılacak olan vidalı mil, lineer kızak, lineer kızak arabalarının hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Maksimum yük değerine göre gerekli tork hesaplamaları yapılarak uygun redüktör ve motor seçilmesi sağlanmıştır.

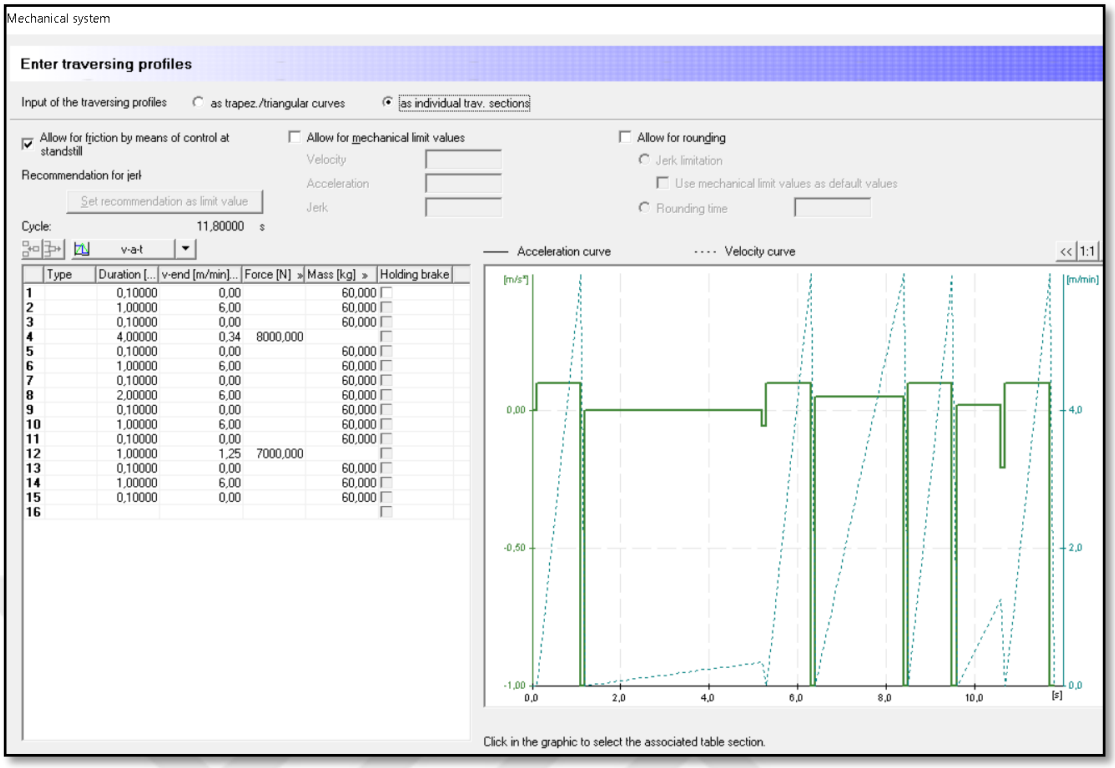
Tez sonrası elde edilecek sistem tasarımının hayata geçirilmesi aşaması gerçekleştiği durumda sürtünmeli delme prosesinin benzer proses analizleri ile optimum parametrelerin elde edilmesi mümkün olacaktır. Aynı zamanda takım ömrü ve sistem komponentlerin çalışma ömürleri uzatılabilecektir. Ürünün geliştirme safhasında sonlu elemanlar analiz yönetimi kullanılarak farklı kapasitelerde sürtünmeli delik delebilen sistem tasarımlarının geliştirilmesi ve doğru ürünlerin seçimi sağlanabilecektir.

4.3. Sürtünmeli Delme Ünitesi Motor Seçiminin Doğrulanması

Sürtünmeli delme ünitesinde toplam M12 delik delme sırasında oluşacak ve analitik olarak maksimum moment hesabı yapılarak seçilen Siemens marka 1FK2205-4AF10-0MB0 model servo motorun Siemens Sizer yazılımında doğrulaması yapılmıştır. Yazılımda öncelikle sisteme vidalı milli ve lineer kızak araba ile yataklamalı mekanik hareket sistemi tanımlanmıştır (Şekil 4.14). Sürtünmeli delme ünitesinin sahip olduğu toplam kütle, vidalı mil çapı, vidalı mil boyu, vidalı mil adımı, sistem eğim açısı, sürtünme katsayısı değerleri girilmiştir. Yazılımdaki servo motor kontrolünde sistemin, vidalı milin ve redüktörün atalet momentleri de dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Yazılımda gerekli girdilerin girilmesi sonunda gelen motor veri doğrulama sayfasında, toplam sistem atalet momentinin seçilen motorun atalet motoruna oranı değer olarak gelmektedir. Seçilen motorun sistemi emniyetli ve kararlı bir şekilde hareket ettirebilmesi için bu oranın Siemens kataloglarında en fazla 3 olması önerilmiştir. Sürtünmeli delme ünitesi için seçilen motor için bu oranın 3'ün altında olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.14. Sürtünmeli delme ünitesine ait mekanik girdi sayfası



Şekil 4.15. Sürtünmeli delme ünitesi hareket profili sayfası

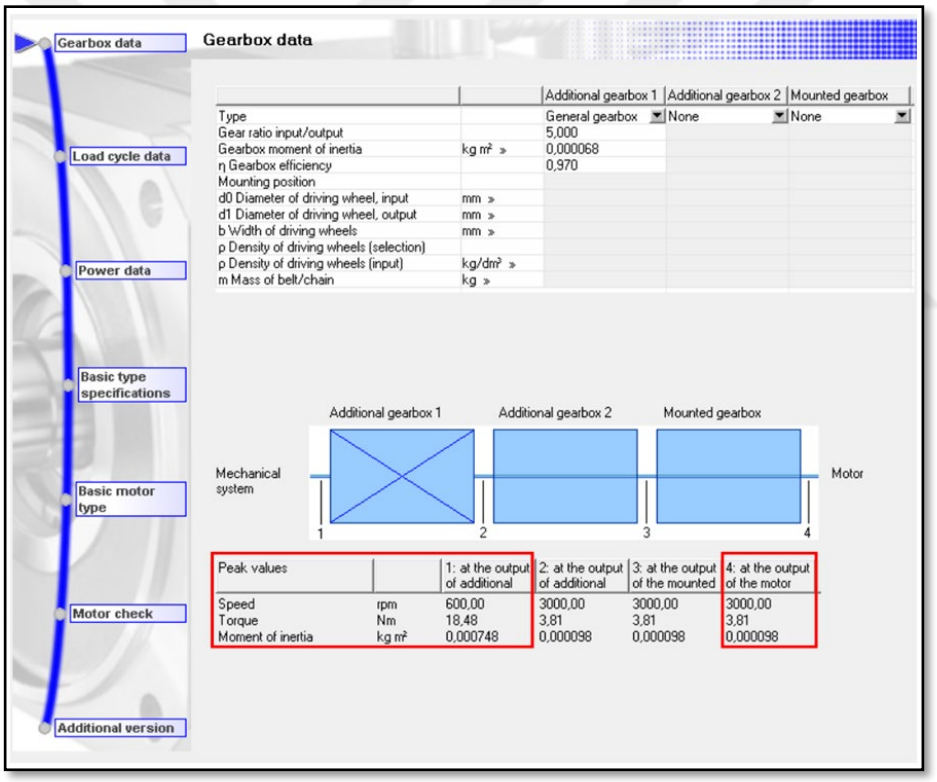
Yazılımda sürtünmeli delme ünitesinin ilk duruştan harekete geçme, delik delme, takım değiştirme, diş çekme, tekrar 0 konumuna dönme ve durma operasyonlarını ifade eden bir proses çevrimi girilerek sistem için hareket profili oluşturulmuştur. M12 delme esnasında 8000 N, kılavuz çekme esnasında 7000N kuvvet tanımlaması yapılmıştır. M12 delme için yazılan örnek çevrim Çizelge 4.3'te belirtilmiştir. Bu hareket profili için elde edilen hız-zaman ve ivme zaman grafikleri Şekil 4.15 'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Sürtünmeli delme için örnek hareket çevrim tablosu

No	Sürtünmeli delme ünitesi (Z1) eksen hareket çevrimi
1	0 noktasında duruş
2	Boşta delik noktasına gitme
3	Anlık duruş
4	M12 Sürtünmeli delik delme
5	Anlık duruş
6	Takım değiştirme istasyonuna gitme

Çizelge 4.3 Sürtünmeli delme için örnek hareket çevrim tablosu (devam)

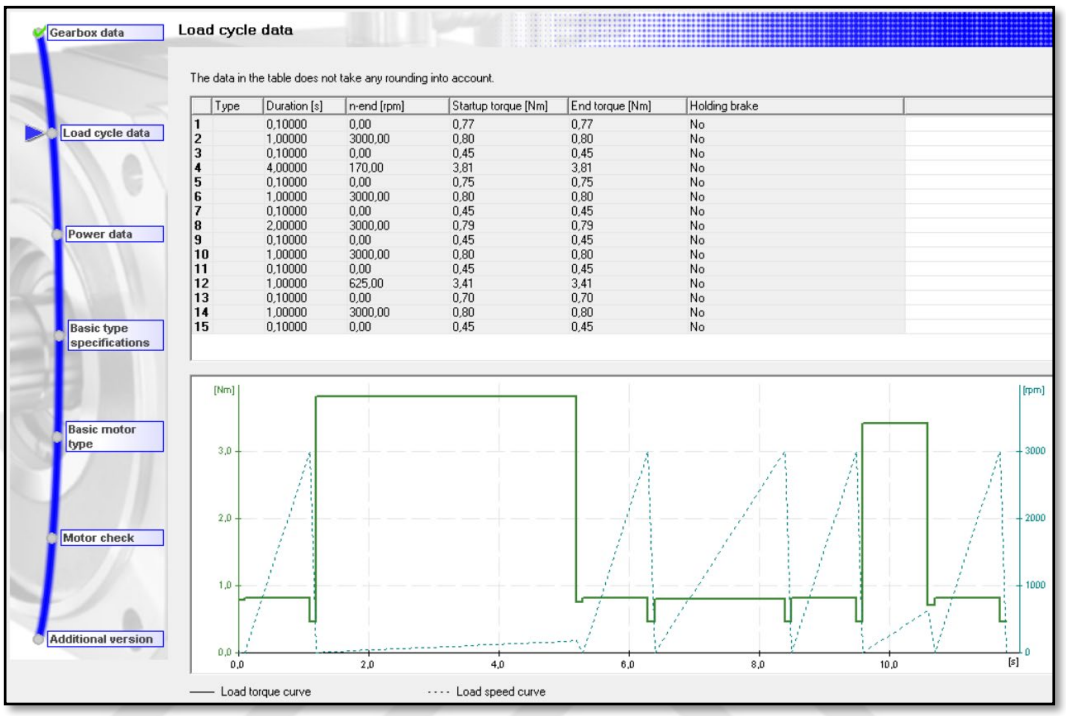
7	Anlık duruş
8	Takım değiştirme
9	Anlık duruş
10	Delik noktasına gitme
11	Anlık duruş
12	Diş çekme
13	Anlık duruş
14	0 noktasına geri gitme
15	Duruş



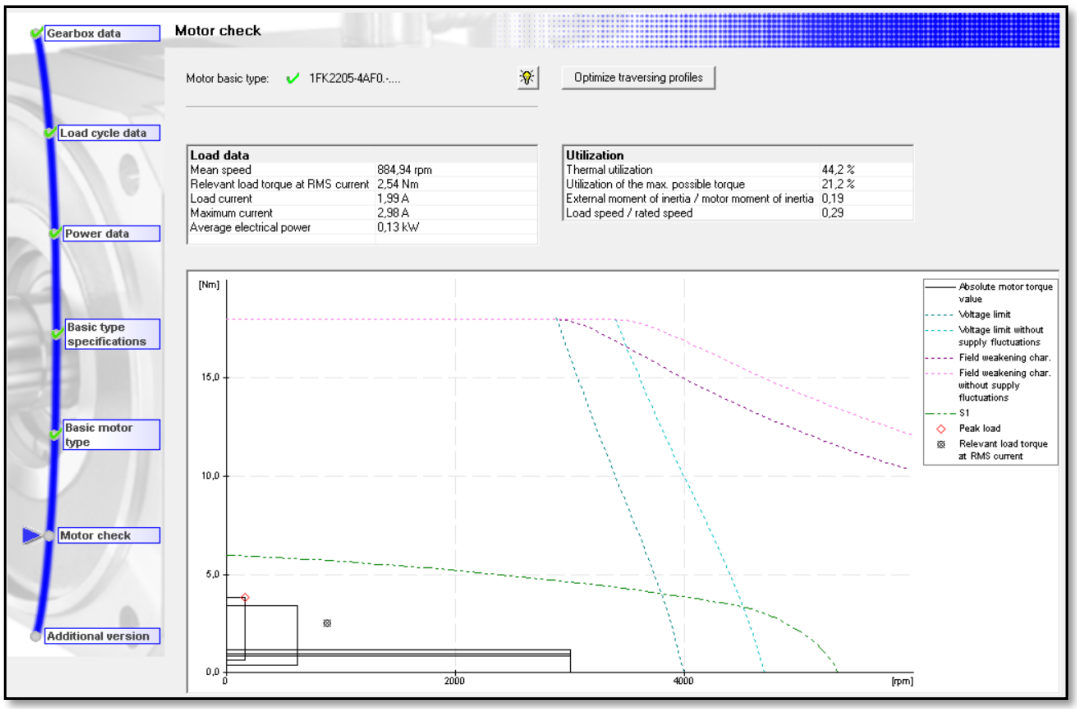
Şekil 4.16. Sürtünmeli delme ünitesi planet redüktör veri girdisi ve mekanik sistem sonuç sayfası

Seçilen planet redüktöre ait çevrim oranı, atalet momenti ve verim değerleri redüktör veri kısmına girilmiştir. Girilen bu verilere göre elde edilen motor ve Y-Z eksen grubuna gelen toplam tork, hız ve atalet momenti değerleri Şekil 4.16'da

belirtilmiştir. Analitik hesaplamalar ile elde edilen M_t = 16.14 Nm toplam sistem moment değeri, Sizer yazılımında M = 18.48 Nm olarak yakın değerde bulunmuştur.



Şekil 4.17. Sürtünmeli delme ünitesi motorunun çevrim boyunca moment ve hız verisi sayfası



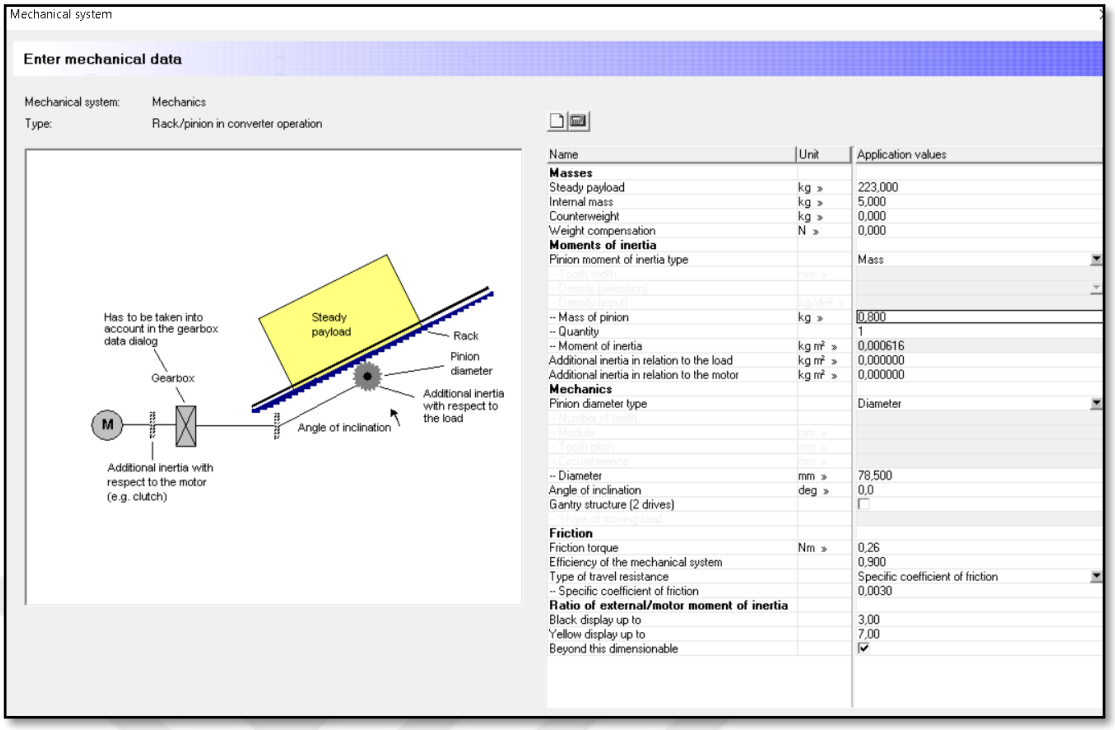
Şekil 4.18. Sürtünmeli delme ünitesi motor seçimi sonuç sayfası

Girilen sistem verileri doğrultusunda motorda çevrim boyunca oluşan tork ve dönme hızı değerleri ile moment - zaman ve hız – zaman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.17).

Seçilen Siemens 1FK2205-4AF10-0MB0 model servo motor için Sizer programında elde edilen sonuç veri sayfası Şekil 4.18'de belirtilmiştir. Sonuç sayfasında toplam sistem atalet momentinin motor atalet momentine oranı 0,19 olarak elde edilmiştir. Siemens firmasının bu değerin 3'ü aşmaması gerektiği konusundaki önerisinin sürtünmeli delme ünitesi motorunu için için sağlandığı tespit edilmiştir. Motorun önerilen termal sıcaklık oranını ve maksimum tork kullanımı değerlerini aşmadığı için seçimin sistem için uygun olduğu doğrulanmıştır. Yapılan analitik hesaplamalar ve Sizer yazılımı ile seçim doğrulaması yapılan servo motor, St37 'den daha farklı ve yüksek mukavemet değerlerine sahip malzemeli profiller için kullanılabilme ihtimali göz önünde bulundurularak ihtiyaçtan yüksek kapasiteli olarak seçilmiştir.

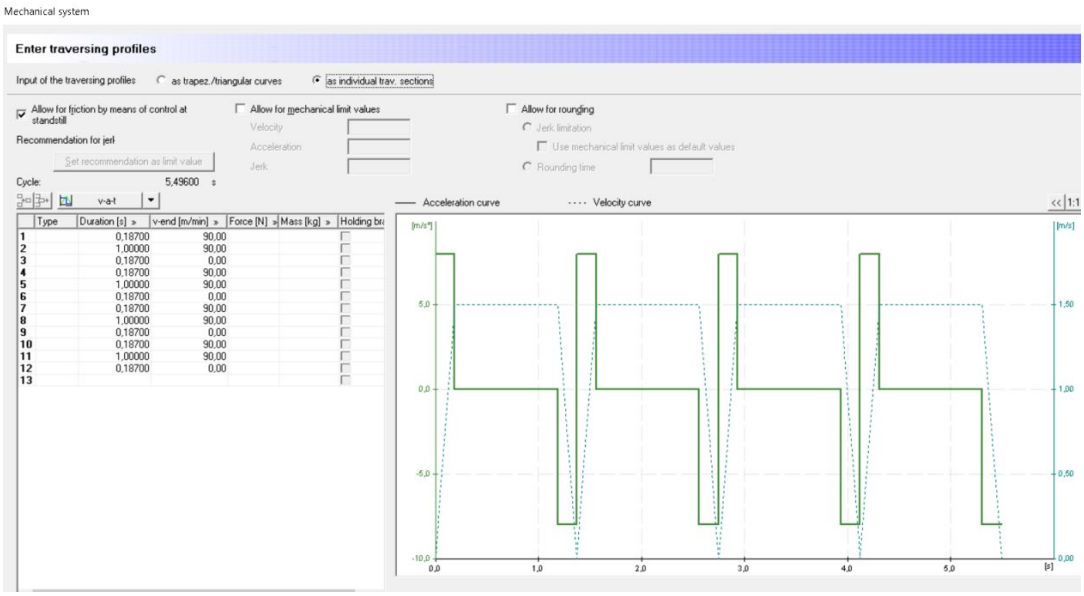
4.4. Y Eksen Motor Seçiminin Doğrulanması

Y-Z eksen grubunun toplam ağırlığını öngörülen maksimum ivme ile hareket ettirebilmesi için analitik olarak moment hesabı yapılan ve seçilen Siemens marka 1FK2206-4AF00-0MB0 model servo motorun Siemens Sizer yazılımında doğrulanması yapılmıştır. Yazılımda öncelikle sisteme uygun kremayer pinyonlu mekanik hareket sistemi tanımlanmıştır (Şekil 4.19). Y-Z eksendeki toplam kütle, pinyon çapı, pinyon kütlesi, sistem eğim açısı, sürtünme katsayısı değerleri girilmiştir. Yazılımdaki hesaplamalarda sistemin, pinyonun ve redüktörün atalet momentleri de dikkate alınmaktadır. Seçilen motorun sistemi emniyetli ve kararlı bir şekilde hareket ettirebilmesi için sistem ataletinin, motor ataletine oranı Siemens kataloglarında en fazla 3 olması önerilmiştir. Y-Z eksen grubunda kullanılacak motor için bu oranın 3'ün altında olmasına dikkat edilmiştir.

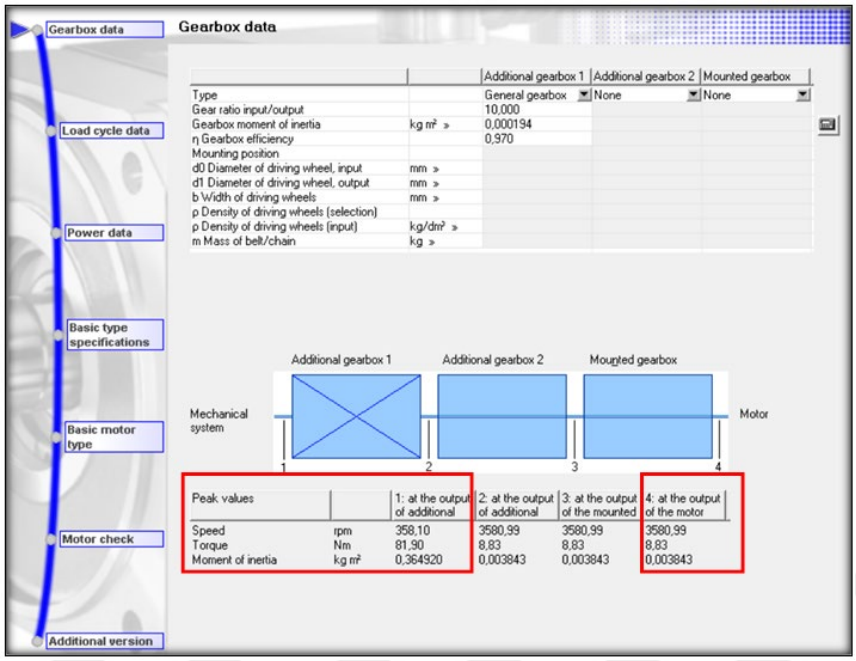


Şekil 4.19. Y-Z eksen grubuna ait mekanik girdi sayfası

3. bölümde de ifade edildiği üzere Y eksenin hareketi için V_{max} = 90 m / dak hız ve a_{max} = 8 m/ s^2 ivme değeri ön görülmüştür. Belirlenen hız ve ivme değerleri ile sistemin örnek bir çevrimi Sizer yazılımında tanımlanmıştır. Tanımlanan bu hareket profiline göre ivme – zaman ve hız zaman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.20).

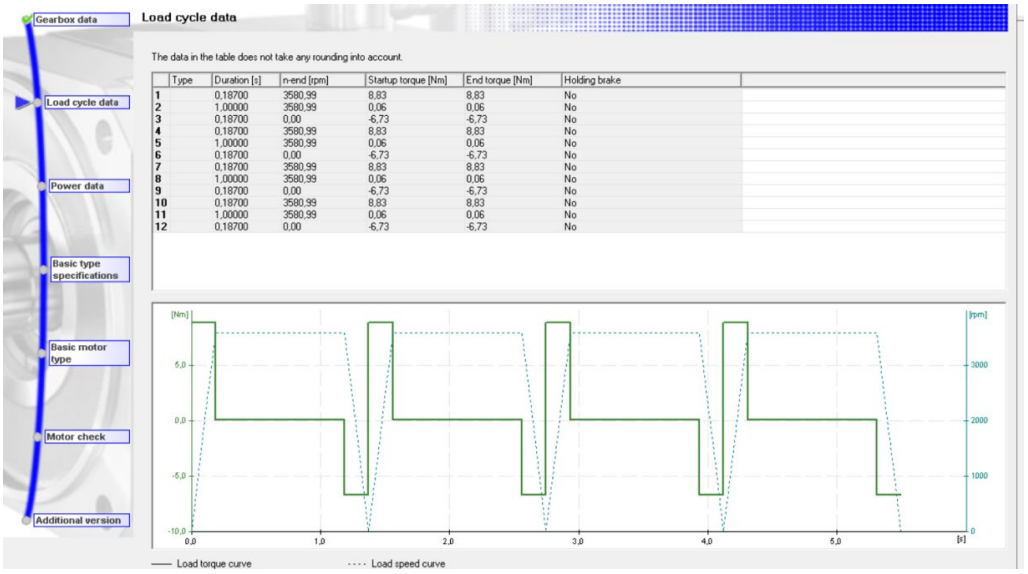


Şekil 4.20. Y eksendeki hareket profili sayfası



Şekil 4.21. Y eksen grubu planet redüktör veri girdisi ve mekanik sistem sonuç sayfası

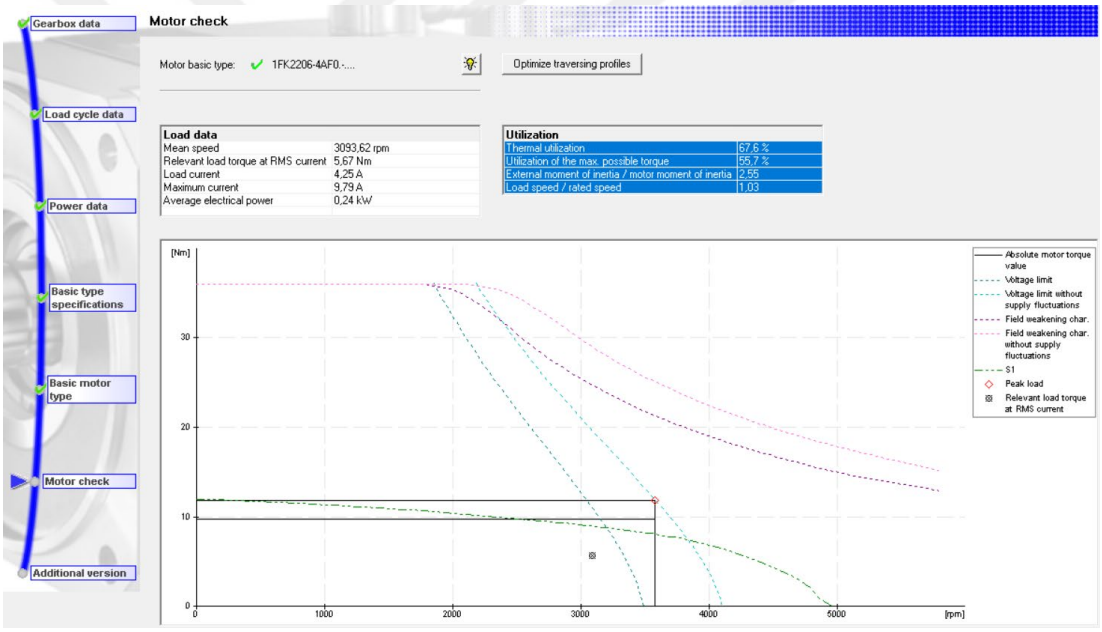
Seçilen planet redüktöre ait çevrim oranı, atalet momenti ve verim değerleri redüktör veri kısmına girilmiştir. Girilen bu verilere göre elde edilen motor ve Y-Z eksen grubuna gelen toplam tork, hız ve atalet momenti değerleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Analitik hesaplamalar ile elde edilen M_t = 80,5 Nm toplam sistem moment değeri, Sizer yazılımında M = 81,9 Nm yakın değeri elde edilerek doğruluğu ispatlanmıştır.



Şekil 4.22. Y eksen motorunun çevrim boyunca moment ve hız verisi sayfası

Girilen sistem verileri doğrultusunda motorda çevrim boyunca oluşan tork ve dönme hızı değerleri ile moment - zaman ve hız – zaman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.22).

Seçilen Siemens 1FK2206-4AF00-0MB0 model servo motor için Sizer programında elde edilen sonuç veri sayfası Şekil 4.23'te belirtilmiştir. Sonuç sayfasında toplam sistem atalet momentinin motor atalet momentine oranı 2,55 olarak elde edilmiştir. Siemens firmasının bu değerin 3'üü aşmaması gerektiği konusunda önerisinin sistem tasarımında kullanılan Y-Z eksen motoru için sağlandığı gösterilmiştir. Motor için önerilen termal sıcaklıkların ve maksimum tork kullanımı değerlerinin aşılmadığı için seçilen motorun sistem için uygun olduğu doğrulanmıştır.



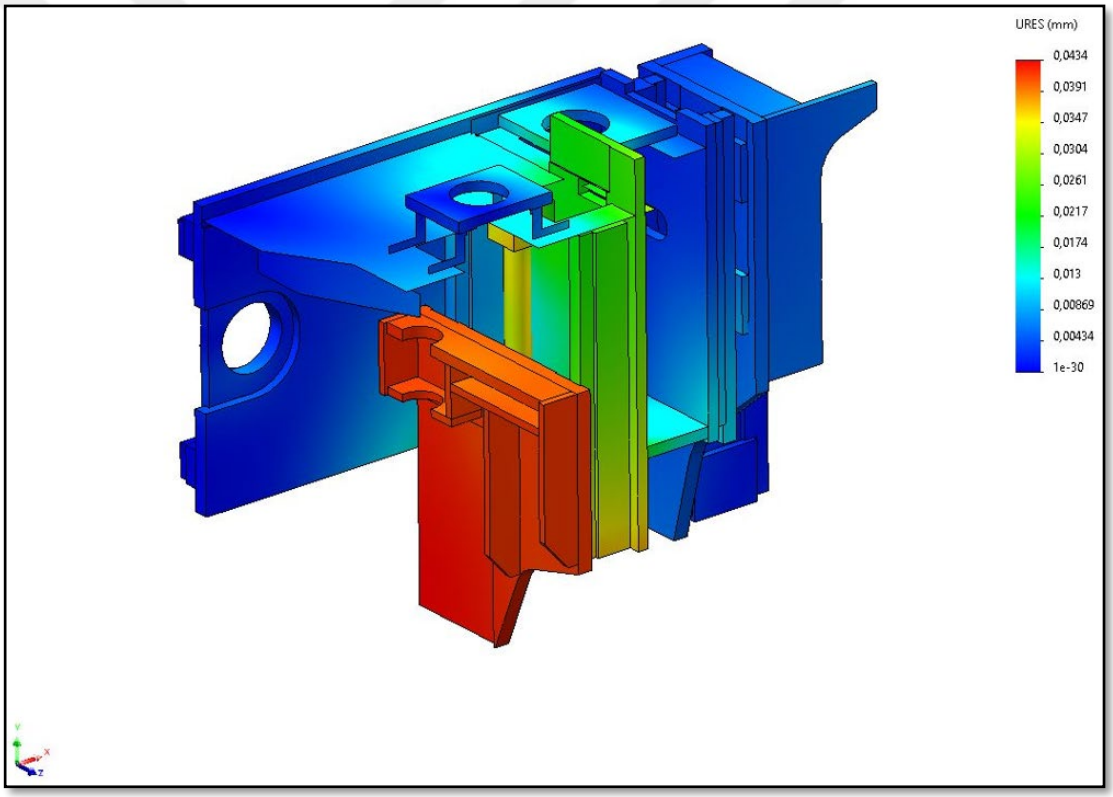
Şekil 4.23. Y eksen motor seçimi sonuç sayfası

4.5. Y-Z Eksen Gövdesi Statik Analizi Sonuçları

M12 delme sırasında spindle ekseninden gelecek 8000 N kuvvet ve Y-Z eksen gövde ve alt malzemelerinden gelen ağırlık kuvveti sisteme etki etmektedir. 3. bölümde açıklandığı üzere tasarımı yapılan Y-Z eksen gövdesi malzemesi olarak St44 çeliği seçilmiştir. Seçimin doğrulanması için belirlenen sınır şartları doğrultusunda statik

analiz çalışması yapılmıştır. Gövdenin AlMg3 (5754) alüminyum alaşımı ve St44 olduğu durumları için sehim ve analiz değerleri elde edilmiştir.

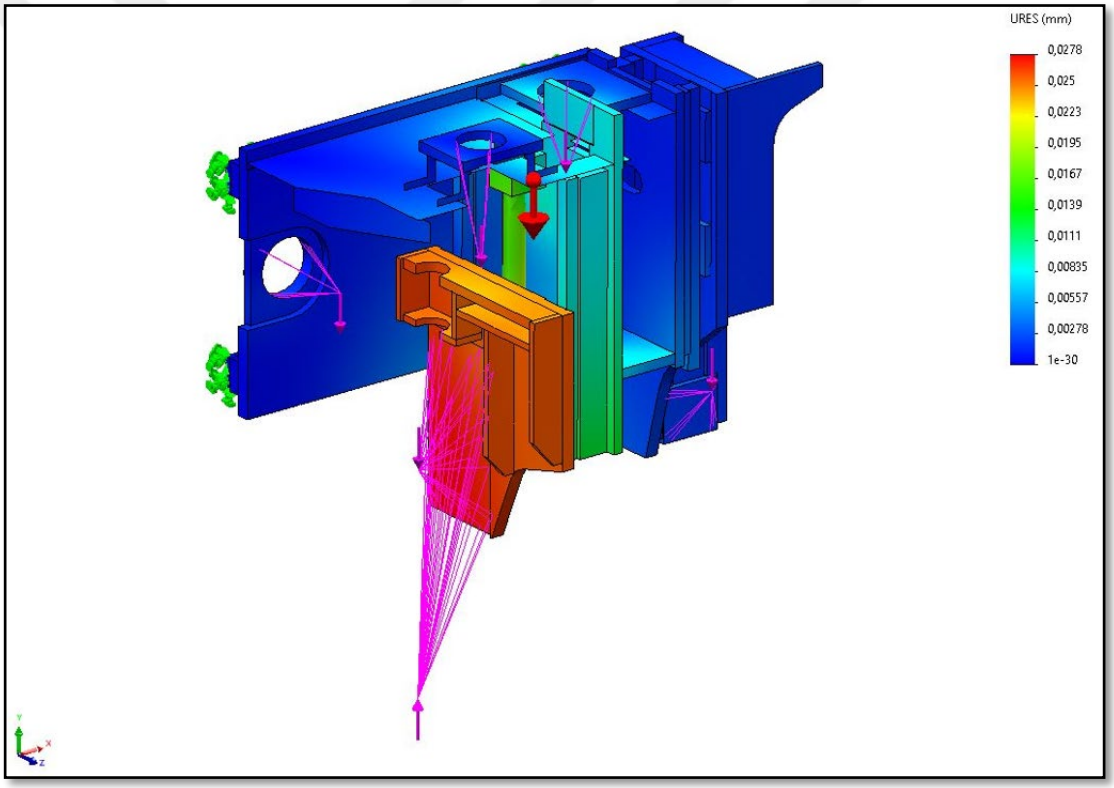
Y-Z eksen gövdesine AlMg3 ataması yapıldığında elde edilen sehim sonuçları Şekil 4.24' te verilmiştir. Gövdede maksimum 0,0434 mm lik maksimum sehim değeri oluştuğu gözlemlenmiştir. Yükün uygulandığı spindle eksenine yakın olan spindle gövdesinde, vidalı mil üzerinde, vidalı mil yataklarında ve vidalı mil yataklarının Y eksen gövdesinde bağlandığı bölgelerde sehim değerinin yoğun olduğu bu bölgelerden uzaklaştıkça sehimin 0,01mm den düşük olduğu görülmüştür. AlMg3 malzemeli gövdede bile konstrüksiyonun yeteri kadar rijit olduğu, kalıcı deformasyon oluşmayacağı görülmüştür.



Şekil 4.24. AlMg3 malzeme tanımlanan Y eksen gövdesinde oluşan sehim

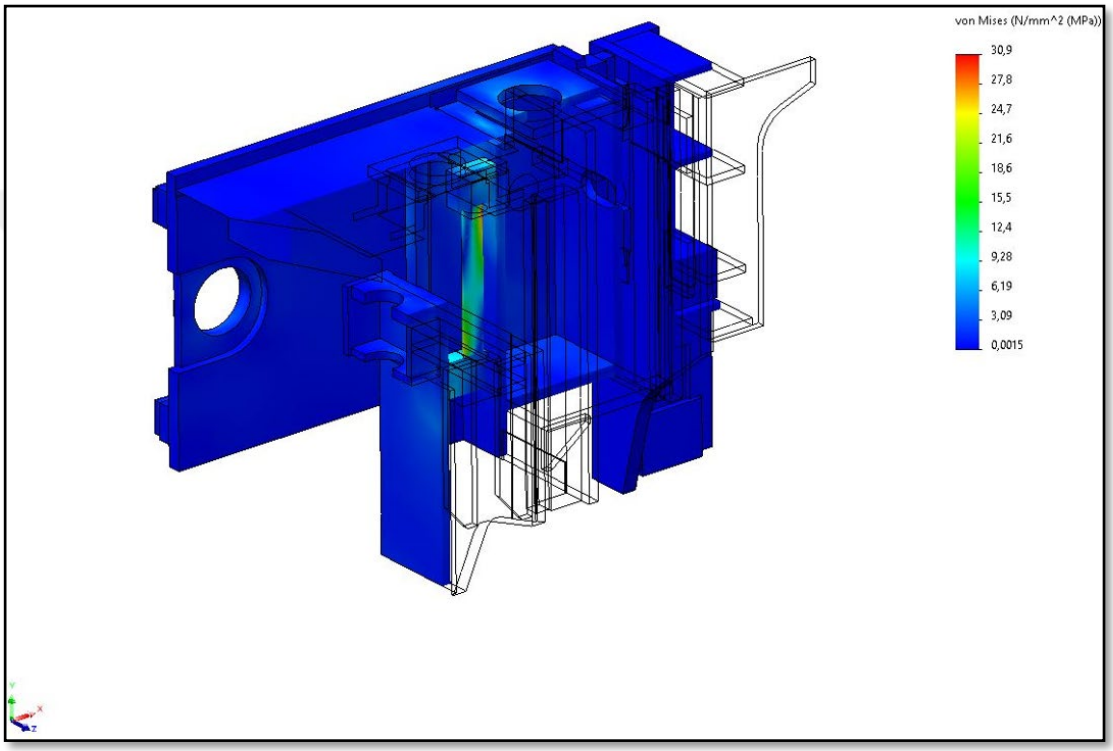
Y-Z eksen gövdesi malzemesi olarak St44 seçildiği durumda elde edilen sehim sonuçları Şekil 4.25' te gösterilmiştir. Elde edilen maksimum sehim değeri 0,0278 mm çıkmıştır. Alüminyum gövde sonuçlarında olduğu gibi yükün geldiği nokta olan spindle ekseninden uzaklaştıkça sehimin çok düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Vidalı mil yataklarının bağlı olduğu kısım çelik olduğu durumda daha az esneme

yaptığı ve bu sebeple sürtünmeli delme ünitesindeki Z1 eksen gövdesindeki sehimin daha az çıktığı tespit edilmiştir. Her iki malzemeli gövde için de sehim sonuçları kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat alüminyum gövdedeki sehimin, çelik gövdedeki sehime göre %56 daha fazladır. Bölüm 3'te anlatıldığı üzere makinede delik delmede aranacak olan ± 0,2 mm pozisyon hassasiyeti, tekrarlanabilirlik ve diklik hassasiyetlerinin elde edilebilmesi için gövdedeki sehimlerin minimum seviyede olması önemlidir. Bu yüzden Y-Z eksen gövde malzemesi olarak seçilen St44 çelik seçiminin yerinde bir karar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca gövdenin üretim maliyeti açısından da değerlendirildiğinde St44 malzemeli gövde, alüminyum alaşımlı malzemeye göre çok daha uygun olarak imal edilebilecektir.



Şekil 4.25. St 44 malzeme tanımlanan Y eksen gövdesinde oluşan sehim

Analiz sonucuna göre gövdede vidalı mil üzerinde ve vidalı mil yataklarında maksimum 30,9 Mpa değerinde bir gerilme oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.26). Elastik bölgedeki bu gerilme değeri konstrüksiyon mekaniği açısından problem teşkil etmeyecektir. Gövde tasarımında değişiklik olmadığı için gövde malzemesi alüminyum da olsa çelik te olsa aynı gerilim değerini vermektedir. Malzemenin değişikliği Elastisite modülünden dolayı sehime etki etmektedir.



Şekil 4.26. Y eksen gövdesi gerilme sonuçları

5. SONUÇ

Tez kapsamında henüz çok yaygın olmayan sürtünmeli delik delme prosesi ile alakalı yapılmış olan teorik, deneysel ve analiz çalışmaları derinlemesine araştırılıp incelenmiştir. İncelenen literatür çalışmaları doğrultusunda prosesin ince et kalınlıklı sac veya profillerde montaj delik bölgelerinin elde edilmesi için avantajlı bir yöntem olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar ince et kalınlıklı malzemelerde yaygın olarak kullanılan kaynak somunu kaynatılması, perçin somunu çakma gibi proseslere alternatif olabilecek bir yöntem olduğunu anlaşılmıştır. Özellikle seri imalatta bu yöntemlere kıyasla malzeme, zaman ve işçilik maliyetleriyle alakalı avantaj yaratabileceği tespit edilmiştir.

İncelenen literatür çalışmaları, prosesin uygulandığı ince malzemelerdeki kovan yapısı kalitesini etkileyen bir çok parametrenin olduğunu ve yapılan çalışmaların genellikle farklı malzemelerde farklı parametreler ile sonuçların incelenmesi üzere olduğunu göstermektedir. Proseste en fazla önem arz eden parametrelerin takım ucu malzemesi, takım geometrisi ve koniklik açısı, dönme hızı, ilerleme hızı, iş parçası malzemesi ve kimyasal bileşimi, iş parçası kalınlığı ve delik çapı parametrelerin olduğu anlaşılmıştır. Bu parametrelerin farklı kombinasyonlarıyla prosesin uygulanması sonrası oluşan kovan yapısı, kovan yüksekliği, delik bölgesi sertlikleri, takımdaki itme kuvveti ve tork değerleri, malzeme sıcaklığı, delik yüzey pürüzlülüğü, delik bölgesinde oluşan gerilme ve deformasyonlar, delik bölgelerinin sahip olduğu kopma muakavemeti, takım aşınması gibi sonuçların karşılaştırılması incelenmiştir. Bu yüzden sürtünmeli delme prosesinin araştırmaya ve geliştirmeye açık bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Prosesin daha iyi anlaşılabilmesi ve müşteri mukavemet gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığını incelemek üzere deneysel çalışmalar yapılmıştır. 2 mm et kalınlığında 60x60 mm kesit ve 100mm boyunda 8 adet St 37 profil numune hazırlanmıştır. Profillerin 4 adetine projeksiyon kaynak makinesinde M6, M8, M10 ve M12 kaynak somunları kaynatılmıştır. Diğer 4 adet profile M6, M8, M10 ve M12 sürtünmeli delme yöntemi ile delikler delinerek kılavuz çekilmiştir. Hazırlanan numunelerdeki deliklere M6, M8, M10 ve M12 altıköşe civatalar takılarak çekme

cihazında koparma testleri yapılmıştır. Çekme testi cihazından elde edilen kopma kuvveti değerleri, üretici bir otomotiv firmasının somun kaynaklı parçalarda beklediği minimum yük değerleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kaynak somunlu numunelerde elde edilen kopma kuvveti değerleri, sürtünmeli delme ile delinmiş numunelerin değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Fakat sonuçlar iki proseste de tüm numunelerin, beklentiden yüksek kuvvet değerlerine dayanabildiği ve sürtünmeli delme prosesinin geleneksel somun kaynatma prosesine alternatif olabileceğini göstermiştir. Sürtünmeli delme prosesi için yapılabilecek optimizasyon çalışmaları ile birlikte daha kaliteli ve yüksek kopma kuvvetlerine sahip delik bölgeleri elde edilebileceği öngörülmektedir.

Yapılan araştırmalarda tam otomatik lazer profil kesim makinelerinde sürtünmeli delme prosesinin uygulanması ile alakalı bir çalışma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Otomatik yükleme, otomatik boy ölçüm, otomatik ve hassas lazer kesim yapan lazer profil kesim makineleri için ilave bir sürtünmeli delik delme ünitesi ile bu prosesin de otomatik olarak uygulanması makineye avantajlı bir opsiyon olacağı düşünülmüştür. Bu yüzden tez kapsamında lazer profil kesim makinesi için sürtünmeli delik delme ünitesini (Z1 Eksen) ve lazer kesim ünitesini (Z2 ekseni) taşıyan Y-Z grubunun Solidworks yazılımında tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sürtünmeli delik delme ünitesinde delinecek delik kapasitesi M6, M8, M10 ve M12 olarak belirlenmiştir. Tasarım öncesinde M12 sürtünmeli delme prosesi Deform-3D yazılımında proses analizi yapılmıştır. Analiz sonrasında delik bölgesindeki sıcaklık, gerilme, gerinim ve maksimum itme kuvveti değerleri elde edilmiştir. İş parçasında oluşan maksimum 764,8 °C olarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık nedeniyle sürtünmeli delme ünitesinde kullanılacak spindle motorun sıvı soğutmalı olarak seçimi yapılmış, takım tutucuların ve takımların yüksek sıcaklığa dayanıklı olması gerektiği anlaşılmıştır. Analiz sonucundan elde edilen oluşacak 7960 N maksimum itme kuvveti değeri literatür çalışmalarının sonuçları ile değerlendirilerek tutarlı olduğu görülmüştür. Sürtünmeli delme ünitesindeki ürün seçimlerinde maksimum proses kuvveti olarak 8000 N değeri alınmıştır. Tasarımda kullanılan lineer kızak arabalarının, vidalı millerin, servo motorların, redüktörler ve diğer mekanik elemanlar analitik hesaplamalar ile seçimleri yapılmıştır. Seçilen komponentlerin ilgili paket programlarda doğruluk kontrolleri yapılarak sistemin belirlenen şartlarda

çalışabilmesi için emniyetli sistem tasarımı amaçlanmıştır. Lazer kesim makinelerinde hız ve ivme beklentilerinden dolayı hafif olması istenmekte ve Y-Z eksen gövde konstrüksiyon malzemesi olarak genelde alüminyum tercih edilmektedir. Fakat lazer profil kesim makinelerinde maksimum profil ölçüsü maksimum 170-300 mm ölçülerinde olduğu için Y eksen yönündeki kurs kısadır. Bu nedenle Y eksen yönünde sac lazer makinelerine kıyasla, yüksek hız ve ivme ihtiyacı olmamaktadır. Bu yüzden sürtünmeli delme ünitesini barındıran Y-Z eksen grubu gövde konstrüksiyonunda St 44 malzemesi kullanılmıştır. Y-Z eksen grubu gövde konstrüksiyon malzemesine sırasıyla St 44 ve AlMg3 malzemesleri atanarak maksimum yükteki durum için statik analizler yapılmıştır. Analizler Solidworks Simulation yazılımında gerçekleştirilmiştir. Sürtünmeli delme ünitesindeki maksimum proses kuvveti ve Y-Z eksen grubu toplam ağırlığından dolayı oluşan sehim ve gerilme değerleri incelenerek, Y eksen gövde konstrüksiyonunda yapılan malzeme seçiminin doğruluğu değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2005. Zwick Roell Materials Testing Machine. https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/08_437_Single_screw_testing_machine_PI_EN.pdf - (Erişim tarihi: 17.08.2020)

Anonim, 2013. Rexroth Linear Motion Technology Handbook. http://www.lhtech.com/pdf/automation/mechanical/ball-screw/LMHB_Intro -(Erişim tarihi: 21.04.2020)

Anonim, 2014. Laser cutting. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cutting - (Erişim tarihi: 20.06.2020)

Anonim, 2016. Durmazlar Makine Boru-Profil Lazer Benchmark Çalışması, 2016.

Anonim, 2018. HSD marka spindle motor ürün teknik dökümanı 2018 / 2019.

Anonim, 2019. HD-TC Serisi Lazer Boru ve Profil Kesme Kataloğu. https://www.durmazlar.com.tr/urunler/lazer-kesim-makinalari/hd-tc-profil-boru-kesme-fiber-laser/ (Erişim tarihi: 15.06.2020)

Anonim, 2020a. Üniversal Kalıpçı Frezeler. http://www.guvenalmakina.com.tr/pdf/2020/UNIVERSAL_FREZELER_KATALOG_2020.pdf - (Erişim tarihi: 30.06.2020)

Anonim, 2020b. Planet Redüktörler WITTENSTEIN alpha Product Catalog. https://www.wittenstein.com.tr/ueruenler/servo-reduektoerler/duesuek-dis-bosluklu-planet-reduektoerler/ (Erişim tarihi: 10.05.2020)

Anonim, 2021a. Ball Rail Systems. https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/linear-motion-technology/linear-screw-assemblies/ball-screw-assemblies/nuts/miniature-series/flanged-single-nut-fem-e-b - (Erişim tarihi: 30.04.2021)

Anonim, 2021b. Siemens Servomotors for SINAMICS. https://mall.industry.siemens.com/mall/en/kr/Catalog/Products/10354899 -(Erişim tarihi: 30.05.2021)

Anonim, 2021c. Megadyne Timing Belts Catalogue. https://megadynegroup.com/files/resources/attachments/md_manu_isoran_2021_02_web_en.pdf - (Erişim tarihi: 30.03.2021)

Anonim, 2021d. KTR Drive Technology Catalogue. https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Tools_Downloads/kataloge/DriveTechnology.pdf - (Erişim tarihi: 30.03.2021)

Avcıl, Ö.A. 2006. Dişli çarkların standartlara göre hesaplanması ve bilgisayar destekli tasarımla kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi,* Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Bal, M. 2020. Termal Sürtüntünmeli Delme İşleminde Kovanın Geometrik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi,* Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.

Boopathi, M., Shankar, S., Manikandakumar, S., Ramesh, R. 2013. Experimental investigation of friction drilling on brass, aluminium and stainless steel. *Procedia Engineering,* 64: 1219 – 1226.

Büyükşahin, U. 2005. 3 Eksenli CNC tezgah tasarımı ve uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi.* Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Çavdar, K., Tanrısever, T. 2013. Farklı Malzemelerin Lazerle Kesilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2): 79-99.

Demir, Z. 2012. A7075-T651 alüminyum alaşımının ve St37 çelik malzemesinin sürtünmeli delme yöntemi ile delinmesinin deneysel incelenmesi. *Doktora Tezi,* Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.

Demir, Z., Ozek, C. 2013. Sürtünmeli delme işleminde vida sıyırma kuvvetinin araştırılması. 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 07-09 Kasım 2013, Kuşadası, Aydın.

Doğru, N. 2010. AISI 1010 çelik malzemenin sürtünmeli delme yöntemiyle delinmesinde delme karakteristiklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi,* Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.

Dönmez, R. 2019. İnce lazerli profil kesim tezgâhları için bağımsız çeneli hidrolik ayna tasarımı ve prototip imalatı. *Yüksek Lisans Tezi,* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

El-Bahloul, S.A., Shourbagy, H.E., Al-Makky, M.Y., El-Midany, T.T. 2013. Thermal friction drilling (A review). 15th Aerospace sciences&aviation technology, ASAT-15, 28-30 May, 2013, Military Technical College, Kobry Elkobbah, Cairo, Egypt.

El-Bahloul, S.A., Shourbagy, H.E., El-Midany, T.T. 2015. Optimization of thermal Friction drilling process based on Tahuchi Method and Fuzzy Logic Technique. *International Journal of Science and Enginnering Applications*, 4(2): 55-59.

Hacaloğlu, T., Kaftanoğlu, B. 2019. Karbür Uçlar ve Titanyum Nitrür (TiN) Kaplamalı Karbür Uçlar ile Titanyum Alaşımı (Ti6Al4V) ve AISI 1045 Çeliği Arasında Sürtünme ve Aşınma Performansı Araştırması. *Atılım Üniversitesi Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 17(2): 57-64.

Kaya, T.M., Aktas, A., Beylergil, B., Akyıldız, H.K. 2014. An experimental study on friction drilling of St12 steel. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38(3): 319-329.

Krasauskas, P. 2011. Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process. *Mechanika,* 17(6): 681-686.

Krasauskas, P., Kilikevicius, S., Cesnavicius, R., Pacenga, D. 2014. Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process. *Mechanika,* 20(6): 590-595.

Miller, S.F., Tao, J., Shih, A.J. 2006a. Friction drilling of cast metals. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 46: 1526 – 1535.

Miller, S.F. 2006b. Experimental Analysis and Numerical Modeling of the Friction Drilling Process. *Ph.D. Thesis,* The University of Michigan, Mechanical Engineering, USA.

Miller, S.F., Tao, J., Shih, A.J. 2007. Thermo-mechanical finite element modeling of the friction drilling process. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering,* 129: 531-538.

Ozek, C., Demir, Z. 2013. Investigate the friction drilling of alüminium alloys according to the thermal conductivity**.** *TEM Journal*, 2(1): 93-101.

Özdemir, Y.T 2021. Mikro Talaşlı İmalat İşlemleri İçin CNC Freze Tezgaının Statik Yapısal Analizi. *Yüksek Lisans Tezi,* Bilecek Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik..

Pantawane, P.D., Ahuja, B.B. 2011. Experimental investigations and multi objective optimization of friction drilling process on AISI 1015. *International Journal Of Applied Engineering Research, Dindigul*, 2(2): 448-461.

Prabhu, T., Arulmurugu, A. 2014. Experimental and analysis of friction drilling on aluminium and copper. *International Journal Of Mechanical Engineering And Technology (IJMET)*, 5(5): 130-139.

Raju, B.P., Swamy, M.K. 2012. Finite element simulation of friction drilling proess using Deform-3D. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2(6): 716-721.*

Rao, K.H., Gopichand, A., Kumar, N.P., Jitendra, K. 2017. Optimization of machining parameters in friction drilling process. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology,* 8(4): 242-254.

Sözügüzel, D. 2007. İnce cidarlı CM22NBK malzemesi için sıvayarak delik delme (flow drill) prosesi ile diş açma ve alternatif malzeme analizi. *Yüksek Lisans Tezi,*

Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Villumsen, S.L. 2016. Process time optimization of robotic remote laser cutting by utilizing customized beam patterns and redundancy space task sequencing. *Ph.D. Thesis,* Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Denmark.

Yuce, C., Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N. 2016. The optimization of process parameters and microstructural characterization of fiber laser welded dissimilar HSLA and MART steel joints. *Metals 2016,* 6: 245.

Yuce, C., Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G. 2017. The effect of process parameters on the microstructure and mechanical performance of fiber laser-welded AA5182 aluminium alloys. *Journal of Mechanical Engineering,* 63(9): 510-518.