T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEKİZ İSTASYONLU CNC TRANSFER TEZGAHININ AYNA SİSTEMİNİN TERMOMEKANİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Akram Ahmed Qaid Saeed AL-BATOL

DANIŞMAN
Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma 05.02.2021 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK
Marmara Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi

Doç. Dr. Özdoğan KARAÇALI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete 'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU' ya teşekkür ederim.

Maddi manevi desteklerini esirgemeyen babam ve annem Ahmed ve Fakhria AL-BATOL'a, canım kardeşlerime ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez, 3180826 numaralı TÜBİTAK TEYDEB projesi ile desteklenmiştir. Bir kısmı tez çalışmalarını da kapsayan "Çok İş Miline Sahip Kamlı Servo Transfer Makinesi " konulu bu proje, Turmach Makine İmalat Sanayi ve Diş Ticaret A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tez çalışmamda katkıda bulunan firma yetkilisi Mehmet DEMİREZEN'e ve TÜBİTAK kurumuna teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2021 **Akram Ahmed Qaid Saeed AL-BATOL**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**

İÇİNDEKİLER ..... **v**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**

TABLO LİSTESİ ..... **x**

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**

ÖZET ..... **xiii**

SUMMARY ..... **xiv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. AYNA SİSTEMİNİN TEMEL YAPISI 2

1.1.1. Ayna İş Milinin Gövdesi 3

1.1.2. Rulman Yatakları 3

1.1.3. Motor 5

1.1.4. Mil 6

1.2. AYNA İŞ MİLİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU 6

1.3. ÇALIŞMANIN AMACI 7

2. GENEL KISIMLAR **8**

3. MALZEME VE YÖNTEM **11**

3.1. DELİK DELME İŞLEMLERİNDE KULLANILAN FORMÜLLER 11

3.2. AYNA İŞ MİLİ TASARIMINDA KULLANILACAK MALZEMELER 15

3.3. AYNA İŞ MİLİNİN TASARLANMASI VE ANALİZLERİ 16

3.3.1. Ayna İş Milinin Modellenmesi 16

3.3.2. Ayna İş Milinin Analizleri 18

4. BULGULAR 22

4.1. STATİK ANALİZİ 22

4.1.1 Nümerik Yaklaşımları ile Statik Analizi 22

4.1.2 Analitik Yaklaşımları ile Statik Analizi 27

4.2. Yorulma Analizi 29

4.3. Modal Analiz 33

4. 4. Termal Gerilme Analizi 40

4.4.1. Termal Gerilme Sonuçları 41

4.4.2. Termal Yer Değiştirme Sonuçları 42

4.4.3. Termal Gerinim Sonuçları 44

4.5. Topoloji Optimizasyonu 45

4.5.1. Topoloji Von Mises Analizi 46

4.5.2. Topoloji Yer Değiştirme Analizi 47

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 50

KAYNAKLAR 52

EKLER 55

ÖZGEÇMİŞ 57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Ayna Sistemi ünitesi (Kutlu, 2016). 1
Şekil 1.2: Ayna Sistemi'nin temel yapısı (Hyundai WIA , 2015). 2
Şekil 1.3: AİM gövdesi (Dynomax, 2011). 3
Şekil 1.4: Harici (dış) motorlu AİM (Hurco, 2014). 5
Şekil 3.1: Kesme hızı ve ilerleme hızı (Saygı, 2015). 12
Şekil 3.2: Matkabın torku ve ilerleme kuvveti (Saygı, 2015). 13
Şekil 3.3: Kesme net gücü ve tork (Sandvik, 2020). 14
Şekil 3.4: İlerleme kuvveti (F_t), asıl kesme kuvveti (F_C), bileşke kuvveti (F_B), radyal kuvveti (Fr) ve talaş kaldırma kuvvetinin (F) gösterimi (Özbey, 2015). 15
Şekil 3.5: SolidWorks ortamında gösterilmiş olan 8 istasyonlu CNC tezgâhı. 17
Şekil 3.6: AİM'nin görünümü. 18
Şekil 3.7: AİM için istenilen analizi seçme. 18
Şekil 3.8: AİM için Alaşım 4140 (42CrMo4), 20MnCr5 ve Ck45 çeliği malzeme seçiminin yapılması. 19
Şekil 3.9: Ayna İş Mili için yüklemeler ve sabitlemeler. 20
Şekil 3.10: Çözüm işlemi. 20
Şekil 3.11: Ayna İş Milinin tamamlanan ağ gösterimi. 21
Şekil 4.1: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçları. 22
Şekil 4.2: 20MnCr5 malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçlar. 23
Şekil 4.3: Ck45 çeliği malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçları. 23
Şekil 4.4: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları. 24
Şekil 4.5: 20MnCr5 malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları. 24
Şekil 4.6: Ck45 çeliği malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları. 25
Şekil 4.7: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için gerinim değerleri. 25
Şekil 4.8: 20MnCr5 malzemesi için gerinim değerleri. 26
Şekil 4.9: Ck45 çeliği malzemesi için gerinim değerleri. 26
Şekil 4.10: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için yorulma analiz sonuçları. 30

Şekil 4.11: 20MnCr5 malzemesi için yorulma analiz sonuçları. 31
Şekil 4.12: C45 malzemesi için yorulma analiz sonuçları. 32
Şekil 4.13: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 1555.8 Hz. mod şekli. 33
Şekil 4.14: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 2533.9 Hz. mod şekli. 33
Şekil 4.15: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 2541.5 Hz. mod şekli. 34
Şekil 4.16: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin Hz. mod şekli. 34
Şekil 4.17: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 5963.6 Hz. mod şekli. 35
Şekil 4.18: 20MnCr5 malzemesinin 1549.9 Hz. mod şekli. 35
Şekil 4.19: 20MnCr5 malzemesinin 2534.3 Hz. mod şekli. 36
Şekil 4.20: 20MnCr5 malzemesinin 2541.9 Hz. mod şekli. 36
Şekil 4.21: 20MnCr5 malzemesinin 5927.7 Hz. mod şekli. 37
Şekil 4.22: 20MnCr5 malzemesinin 5964.6 Hz. mod şekli. 37
Şekil 4.23: Ck45 çeliği malzemesinin 1565 Hz. mod şekli. 38
Şekil 4.24: Ck45 çeliği malzemesinin 2569.2 Hz. mod şekli. 38
Şekil 4.25: Ck45 çeliği malzemesinin 2576.8 Hz. mod şekli. 39
Şekil 4.26: Ck45 çeliği malzemesinin 6009.7 Hz. mod şekli. 39
Şekil 4.27: Ck45 çeliği malzemesinin 6046.8 Hz. mod şekli. 40
Şekil 4.28: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları. 41
Şekil 4.29: 20MnCr5 malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları. 41
Şekil 4.30: Ck45 çeliği malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları. 42
Şekil 4.31: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları. 42
Şekil 4.32: 20MnCr5 malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları. 43
Şekil 4.33: Ck45 çeliği malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları. 43
Şekil 4.34: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal gerinim değerleri. 44
Şekil 4.35: 20MnCr5 malzemesi için termal gerinim değerleri. 44
Şekil 4.36: Ck45 Çeliği malzemesi için termal gerinim değerleri. 45
Şekil 4.37: Alaşım 4140 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri). 46
Şekil 4.38: 20MnCr5 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri). 46
Şekil 4.39: Ck45 çeliği malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri). 47
Şekil 4.40: Alaşım 4140 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri). 47
Şekil 4.41: 20MnCr5 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri). 48

Şekil 4.42: Ck45 çeliği malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri). 48
Şekil 5.1: a) TÜBİTAK destiği ile üretilen makine gösterimi. 55
Şekil 5.1: b) TÜBİTAK destiği ile üretilen makine gösterimi. 56

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Mekanik Özellikleri. 15
Tablo 3.2: Kimyasal bileşim kütle yüzdesi. 15
Tablo 3.3: Malzemelerin kullanım alanları. 16
Tablo 4.1: Ayna İş Milinin statik sonuçları. 27
Tablo 4.2: Ayna İş Milinin analitik statik sonuçları. 28
Tablo 4.3: Ayna İş Milinin statik sonuçlarının nümerik ve analitik karşılaştırılması. 29
Tablo 4.4: AİM'nin termal gerilme sonuçları. 45
Tablo 4.5: Optimize edilmiş ve edilmemiş tasarımların topoloji analizlerinin sonuçları. 49

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{V_C}$	: Kesme Hızı (m/dak)
$\boldsymbol{\omega}$	: Açısal Hız (rad/sn)
r	: Yarıçap
Dc	: Dönen Parçanın Çapı (mm)
n	: İş Mili Hızı veya Devri (dev/dak)
$\mathbf{V_f}$	: Penetrasyon Hızı veya Parçaya Nüfuziyet Hızı(mm/dak)
$\mathbf{f_n}$	: İlerleme (mm/dev)
Zc	: Dış veya Ağız Sayısı
$\mathbf{f_z}$	: Kesici Dış Başına İlerleme Sayısı
Q	: Talaş Kaldırma Oranı (cm^3/dak)
Mc	: Tork (Nm)
$\mathbf{r_a}$	: Talaş Alanının Merkezine Olan Yarıçapı (mm)
$\mathbf{F_C}$	: Teğetsel Kesme Kuvveti (N)
Kc	: Spesifik - Özgül Kesme Kuvveti (N/mm^2 - MPA)
$\boldsymbol{K_{c1.1}}$	: Bağıl Kesme Kuvveti (N/mm^2)
h	: Talaş Kalınlığı (mm)
$\mathbf{m^c}$	: Kc Eğrisinin Yükselişi
$\mathbf{P_C}$	: Kesme Net Gücü (KW)
P	: Motorun Güç Kaybı (KW)
η	: Tezgah Verimlilik Oranı
$\mathbf{F_t}$	: İlerleme Kuvveti (N)
$\mathbf{F_B}$	: Bileşke Kuvvet (N)
$\mathbf{F_r}$	: Radyal Kuvvet (N)
F	: Talaş Kaldırma Kuvveti (N)
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor

S : Kükürt
Cr : Krom
Mo : Molibden
Ni : Nikel
V : Vanadyum
% : Yüzde

Kısaltmalar	**Açıklama**
AISI	: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü Standartları
AİM	: Ayna İş Mili
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CNC	: Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)
Dak	: Dakika
Dev	: Devir
GPa	: GigaPaskal
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)
REH	: Rastgele Erişimli Hafıza
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
Hz.	: Hertz (Frekans Birimi)
kg	: Kilogram
kW	: KiloWatt
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: MegaPaskal
N	: Newton
N.m	: Newton Metre
dev/dk.	: Dakikadaki Devir Sayısı
SAE	: Amerikan Otomotiv Mühendisleri Odası
TMM	: Transfer Matrisi Metodu

ÖZET

SEKİZ İSTASYONLU CNC TRANSFER TEZGAHININ AYNA SİSTEMİNİN TERMOMEKANİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akram Ahmed Qaid Saeed AL-BATOL

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Bu tez çalışmasında, seri imalatta kullanılan ve genelde çubuk malzemelere hassas kanal ve deliklerin açılmasını sağlayan, ancak halihazırda yurtdışından temin edilirken Türkiye'de Tübitak-Teydeb desteğiyle tasarlanması ve imalatı hedeflenen sekiz istasyonlu bir CNC transfer tezgâhı için gerekli Ayna İş Mili (AİM)'ne ait katı modelleme, statik, dinamik, termal ve yorulma analizleri ile beraber topoloji optimizasyonu gibi Ar-Ge tasarım faaliyetleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Ayna sisteminin yapısı hakkında literatür araştırması yapılmış ve ardından işleme sırasında sistemin ana makine elemanı olan AİM'ne etkiyen kuvvetler hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Siemens NX® programında modellenen AİM'nin analizlerinin gerçekleştirilmesi için üç boyutlu katı modeli SolidWorks® Simulation Premium yazılımına nakledilmiştir. Sonlu Eleman Analizlerinde (SEA) kullanılacak çelik alaşımları Alaşım 4140, 20MnCr5, Ck45 ile sınırlandırılmıştır. Söz konusu AİM'nin daha sonra Statik, Modal, Mukavemet, Isıl ve Makine Elemanları analitik yaklaşımlarına dayanan von Mises gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmıştır. Son olarak analiz sonuçlarını her malzeme için ayrı ayrı karşılaştırarak ve değerlendirerek, ayna sistemi için en uygun malzeme belirlenmiştir.

Ocak 2021, **71** sayfa.

Anahtar kelimeler: Ayna İş Mili, Termomekanik, Statik ve Modal Analizleri, SolidWorks

SUMMARY

THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF THE SPINDLE SYSTEM OF AN EIGHT STATIONS-CNC TRANSFER MACHINE TOOL

M.Sc. THESIS

Akram Ahmed Qaid Saeed AL-BATOL

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

In this thesis, design activities such as solid modeling, static, dynamic, thermal and fatigue analysis as well as topology optimization have been performed on the Spindle System of an Eight Station-CNC Transfer Machine Tool used mass production. Generally they enable drilling sensitive channels and holes on round parts. While already imported from abroad, Turkey is targeted to design and produced it locally by the support from Tübitak-Teydeb.

First, a literature survey was made on structures of spindle systems. And then general information about the forces acting on a Spindle Shaft, which is the main machine element of the system, during operation. In order to perform the analysis of the Spindle designed on the Siemens NX® program, the three-dimensional solid model was transferred to SolidWorks® Simulation Premium software. The steel Alloys to be used in Finite Element Analyses are limited to Alloy 4140, 20MnCr5, Ck45. Aforementioned, Von-Mises stress and strain values were calculated based on static, modal, strength, thermal and machine elements as well as analytical approaches on the Spindle Shaft. Finally, the most suitable material for the design of the shaft was determined by evaluating the analysis' results separately for each material.

January 2021, **71** pages.

Keywords: Spindle, Thermomechanical, Static and Model Analysis, SolidWorks

1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı prototipleme gibi yeni birçok üretim tekniği geliştirilmesine rağmen metal kesme ve talaş kaldırma işlemleri imalatın ana unsuru olmaya devam etmektedir. Üretim doğrultusunda, takım tezgahı endüstrisi sürekli gelişmektedir. Teknolojik gelişmeler metal kesme – talaş kaldırma işlemlerini daha düşük maliyetlerle, hızlı ve daha güvenilir hale getirmiştir. Sonuç olarak daha az teslimat süresi ile ucuz ürünler elde edilmiştir.

Geçmişten günümüze kadar, metal kesme işleminin temel prensipleri ve takım tezgahlarının ana mekanik bileşenleri geliştirilerek aynı kalmıştır. 25 yıl önce olduğu gibi bir takım tezgahının hala AİM hareketli eksenler ve kesici bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler arasında AİM'in metal kesme işlemindeki çok etkin görevi nedeniyle takım tezgahlarında neredeyse en önemli bileşenlerden biridir. Ayna iş milleri farklı takım tezgâhları (frezeleme, torna vb.) için yapısal ve tasarım bakımından farklılık gösterse de hepsinde aynı temel amaca hizmet eder. Kesme işlemini gerçekleştirmek için iş parçası veya kesici takımından birisi sabit kalır; diğeri yeterli tork ve hız ile dönmektedir.



Şekil 1.1: Ayna Sistemi ünitesi (Kutlu, 2016).

Yıllarca takım tezgâhları çeşitli endüstrilerin önemli bir parçası olmuştur. Alman Müzesi'nde yaklaşık 200 yıllık ahşap ve metal işleme tornaları bulunmaktadır. Bu nedenle AİM takım tezgahlarında hep vardı ancak döndürme işleminde kullanılan teknikler, tasarım açısından farklılık göstermiştir.

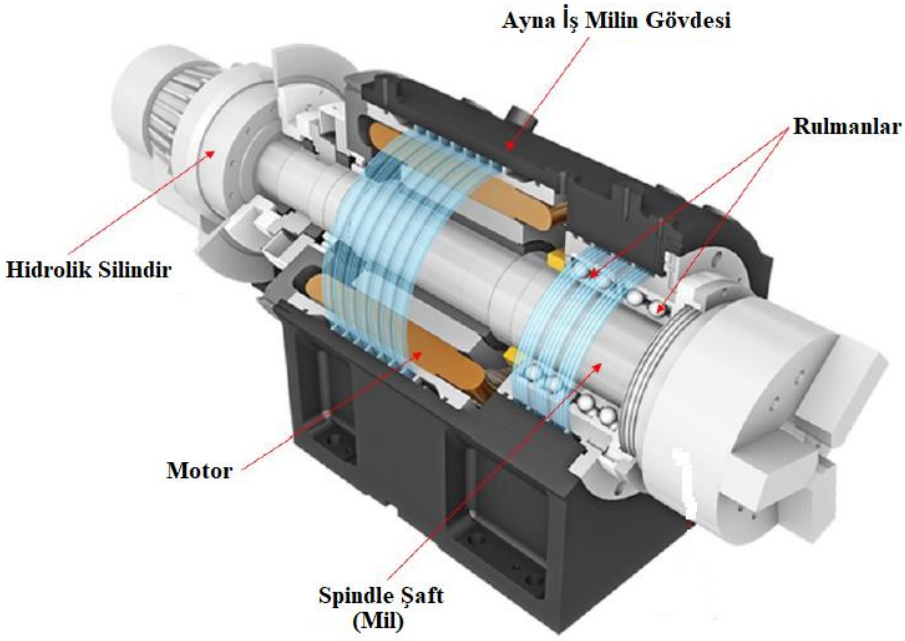
AİM sisteminin takım tezgahlarındaki ana işlevi şöyle sıralanabilir:

- Kesiciyi veya iş parçasını döndürmek,
- Kesme işlemini gerçekleştirmek için kesiciye veya iş parçasına gerekli güç ve hızı sağlamak,
- Kesme işlemi sırasında üretilen kesme kuvvetlerine karşı dayanıklılık göstermek.

1.1. AYNA SİSTEMİNİN TEMEL YAPISI

Şekil 1.2'de görüldüğü gibi sistem temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- AİM'nin gövdesi
- Rulman yatakları
- Motor
- Mil "Spindle Shaft"

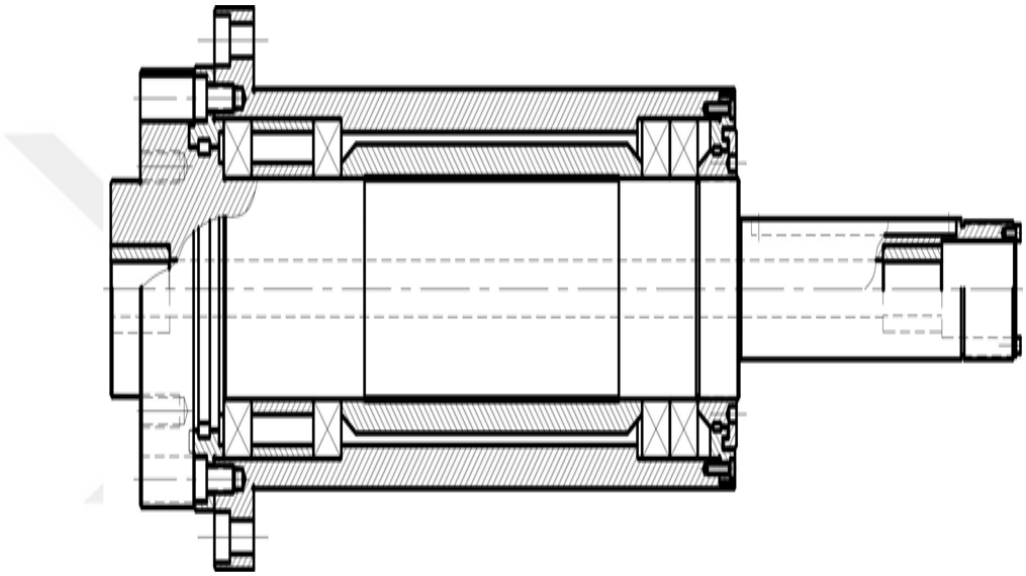


Şekil 1.2: Ayna Sistemi'nin temel yapısı (Hyundai WIA , 2015).

1.1.1. Ayna İş Milinin Gövdesi

AİM'nin gövdesi, iş mili ve temel bileşenleri birbirine bağlayan ünitedir. Yani AİM, mil (Spindle Shaft), rulmanlar ve diğer parçalar Şekil 1.2'de gösterildiği gibi gövdenin içine monte edilmiştir.

AİM gövdesinin temel görevi, rulman yataklarını yerine yerleştirmek ve desteklemektir. Kesme işlemi sırasında AİM üzerindeki üretilen tüm kuvvetler gövde aracılığıyla takım tezgahlarına aktarılır, onun için gövde çok güçlü ve sert olmalıdır (Dynomax, 2011).



Şekil 1.3: AİM gövdesi (Dynomax, 2011).

1.1.2. Rulman Yatakları

Rulman, AİM'ni sabitlemek için ve mevcut yükleri taşımak için metal kesme işlemine ve iş mili tasarımına bağlı olarak genelde iki gruptan oluşur; biri iş milinin önünde, diğeri arka kısmında bulunmaktadır.

Rulman yatağı yüksek hızlı AİM tasarımı için oldukça önemlidir. Rulman tipinin seçimi yapılırken aşağıdaki maddelere dikkat edilmelidir; aksi takdirde AİM çalışmaz.

- Yük taşıma kapasitesi

Rulman seçimi için en önemli kriter, dayanabilmesi gereken yük miktarıdır. Takım tezgahlarındaki yük miktarı kullanılacak yatakların tipinde önemli bir etkendir. Üstelik, bir rulman yatağının tahammül edeceği muhtelif yükler onun performansını büyük ölçüde

etkileyebilmektedir. Bu nedenle rulman yatağı seçerken bu kriter göz önüne alınmalıdır (DökümTek, 2020).

- Doğruluk

Rulman yatağı seçimi yapılırken ikinci mertebede önemli kriter doğruluk ihtiyacıdır. CNC tezgahlarında yüksek hassasiyetli rulmanlara ihtiyacı vardır.

- Hizalama

Hizalama kriteri de önemlidir, çünkü doğru olmayan hizalamanın tolere edilmemesi nedeniyle taşıma başarısızlığı ortaya çıkabilir.

- Boyut

Genellikle tasarım ihtiyacına göre rulman çapı belirlenerek istenen özelliklere uygun olmalıdır.

- Yağlama

Yağlama, rulman yatağının performansını artırmak, ömrünü uzatmak ve rulmanı desteklemek için gereklidir.

- Çalışma hızı

Çalışma hızı, rulman yük taşma kapasitesi, boyutu, yağlama ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektir. Rulmanın hız performansına etki eden ana faktör, yağlama miktarı ve türüdür.

- Dayanıklılık

Rulman yatağında temas ettiği yüzeyler boyunca sertliğin ve sıcaklığın tesiriyle deformasyonlar meydana gelebilir. Bu yüzden rulman yatağı yeteri kadar dayanıklılığa sahip olmalıdır.

Yüksek hassasiyetli rulmanların dünya çapında çeşitli üreticiler tarafından temin edilmesi oldukça kolay olmuştur. Yüksek hızlı ayna iş millerinde kullanılan rulman tipleri arasında silindirik makaralı, konik makaralı, oynak bilyeli rulmanlar bulunmaktadır.

Rulman seçiminde nihai kararı belirleyen birçok faktör vardır. Halbuki en yüksek hıza sahip olması istenen bir AİM, maksimum sertliğe sahip olmayacaktır ve en yüksek sertliğe sahip olan bir AİM yatak ömründen ödün vermeden yüksek hızlarda çalışamaz. Bu nedenle, tasarımcılar

tarafından mümkün olan en verimli konstrüksiyona ulaşmak için uygun varsayımlar yapılmalıdır. (Dynomax, 2011).

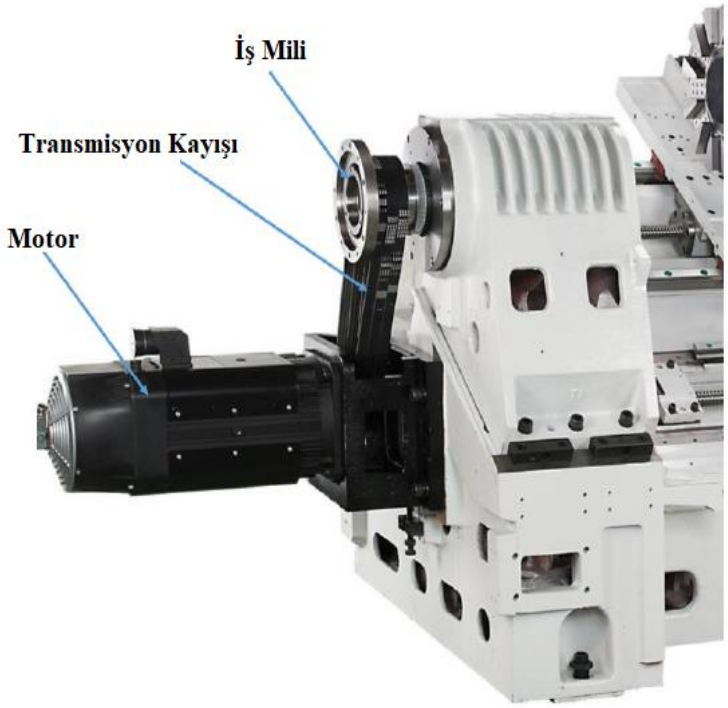
1.1.3. Motor

Takım tezgahlarındaki AİM bazı özel durumlar dışında bir elektrik motoru aracıyla çalışır. Ancak motordan elde edilen gücün AİM'ne iletimi farklı yöntemlerle gerçekleşebilir. Bu yöntemler kullanılan motorların tipine göre iki sınıfa ayrılabilir:

1) Harici (Dış) Motorlar

Bu durumda AİM dışarıdan takılan motor tarafından çalıştırılır ve motor, AİM sisteminden tamamen bağımsızdır. Motor ve AİM arasındaki bağlantı doğrudan bağlama sistemi veya Şekil 1.4'te gösterildiği gibi bir kayış, zincir veya dişli transmisyon sistemi ile sağlanmaktadır.

Harici motorlu ayna iş milleri, uygun fiyatlarına ve farklı güç / tork çıkışlarına izin veren esnek yapısına sahip olması nedeniyle son on yıla kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat zincir/kayış transmisyon sisteminden AİM üzerindeki ek yükler ve düşük verimliliği nedeniyle bu tip AİM'nin kullanımı sınırlandırılmıştır. (Kutlu, 2016)



Şekil 1.4: Harici (dış) motorlu AİM (Hurco, 2014).

1) Dahili (İç / Birleşik) Motorlar

Teknolojik gelişmeler son 20 yılda AİM için dahili motorların geliştirilmesine yol açmıştır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi iç motoru AİM üzerine ve gövde içine monte edilmiştir. Bu tip ayna iş miller, dış motorlu ayna iş millere göre daha fazla avantajlara sahiptir. AİM yüksek dönme hızına ulaşılmasını sağlar. Yataklar üzerinde ekstra yük yoktur. İç motorlu ayna iş millerinde fiziksel temas olmadığı için de kayış / zincir / dişli transmisyon sistemlerden oluşan titreşimler söz konusu değildir. Oluşan ısı neticesinde iç motoru soğutma gerekliliği ve dış motorlara kıyasla yüksek maliyeti sebebiyle bu tip motorların kullanımı kısıtlanmıştır (Kutlu, 2016).

1.1.4. Mil

Şekil 1.2'de gösterildiği gibi mil, Ayna sisteminin gövdesinde olduğu gibi bileşenleri birbirine bağlar ve rulmanları yerleştirir. Takım tezgahlarında mil, dönen parça ve kesme işlemi sırasında oluşan yüklere dayanan ilk bileşen olduğundan sağlamlığı Ayna sisteminin hem statik hem de dinamik davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Nihayetinde takım tezgahının performansı etkilenir.

1.2. AYNA İŞ MİLİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Yüksek hassasiyetli AİM tasarımı aşağıdaki gereksinimlere dayanarak yapılmalıdır:

- İstenen AİM gücü
- Maksimum AİM yükleri, diğer bir deyişle kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetler
- Maksimum AİM hızı
- AİM tipi (dış veya iç motorlu)
- Milin boyutu ve kapasiteleri
- Piyasada satın alınacak bileşenlerin bulunabilirliği
- Maliyet

Böylece tahrik motoru, rulmanlar ve ilgili bileşenlerin seçimi ile rulman konfigürasyonunun tasarımı, AİM'nin performansı, güvenilirliği ve hizmet ömrü üzerinde çok önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, tasarım sırasında dikkate alınması gerekenler, rulmanların yağlanması, gerekli ünitelerin (rulmanlar, motor, vb.) soğutulması gibi başka faktörler de vardır "Abele ve diğ. (2010)".

1.3. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın ana amacı, AİM sisteminin termomekanik ve titreşim analizlerinin incelenmesidir. Özellikle yüksek hassasiyete sahip olan ve yüksek hızla çalışan tezgahlar için titreşim önemli “Liu, ve diğ. (2011)” olduğundan, sıcaklık dahil kesmeden kaynaklanan yüklemelerin boyutsal tolerans değişimlerine etkisi modellenmelidir.

Bu çalışmada, CNC transfer tezgahının tasarımı için Siemens NX kullanılmış olup analiz işlemlerinde tambur çenesindeki kesici uca denk gelen kesme kuvveti ile burulma momentinin AİM’ne uygulanması ile statik, termomekanik ve modal analizleri mevcut SolidWorks Simulation Premium paket programı kullanılarak hem malzeme ve standart parça seçimleri hem de direngenlik sağlayacak geometri belirlenecektir.

2. GENEL KISIMLAR

Arali ve Kulkarni (2014) yaptıkları çalışmada, CNC torna AİM'nin yorulma ömrünü artırmak ve maliyetini azaltmak için analizler yapmışlardır. Analizlerde gücü 7.5kW ve devir sayısı 4000 dev/dk olan AİM kullanılmıştır. Toplam deformasyon, eşdeğer gerilme ve güvenlik faktörü hesaplanmıştır. Yorulma ömrü tahmini, SEA ve analitik yöntemlere göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, yapılan statik analizlerinde deformasyonun çok küçük ve yaklaşık olarak teorik değerlere eşit olduğu gösterilmiştir. Ön ve arka rulman yataklarının ömrü sırasıyla 9198.7 ve 15,586.3 saattir. Teorik olarak hesaplanan emniyetin faktörü 3.9'dur ve SEA yöntemiyle 3.3173'tür.

Liu ve diğ. (2011), çalışmalarında yüksek hızlı motor tahrikli Ayna sisteminin özellikleri araştırılmış, ANSYS programını kullanarak yüksek hızlı ve hassasiyetli motorlu AİM üzerinde modal analiz, harmonik tepki analizi ve termal analiz yapmışlardır. Model olarak, Anyang Xinsheng Machine Tool Co. Ltd. tarafından üretilen CX8075 yüksek hızlı motor tahrikli AİM kullanılmıştır. Sonuç olarak, AİM'nin direngenliği 207.66N/μm olarak çıkmıştır, bu değer ise motor tahrikli AİM'nin çok rijit olduğunu göstermektedir. Modal analiz sonuçları ise, AİM'nin 1. moda göre doğal frekansının 1054.6Hz olduğunu yani 1. modun kritik dönme hızının (63276 dev/dk), motor tahrikli AİM maksimum dönüş hızından (12000 dev/dk) uzak olduğunu göstermiştir. Termal analiz sonucunda termal deformasyon değeri 6,56μm'dir. Bu değer ile AİM hassasiyetinin riskli olduğunu tespit etmişlerdir.

Vinoth ve Murugan (2016) yaptıkları çalışmada, motor tahrikli AİM'ni tasarlamışlardır. Termal ve dinamik karakteristik analizi ANSYS programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapmışlardır. Sıcaklık artışını azaltmak, termal deformasyonları hesaplamak ve yüksek hızlı AİM'nin çalışma koşullarını iyileştirmeye yönelik araştırmalar yapmışlardır. AİM'nin doğal frekansını, karşılık gelen gerilme ve sehimi bulmak için Model ve termal gerilme analizleri yapmışlardır.

Jiang ve Zheng (2010) TMM ve Jones-Harris rulman analiz teorisini kullanarak yüksek hızlı motorlu AİM'nin bir dinamik modelini oluşturmuşlardır. Daha sonra, AİM üzerindeki doğal frekansların etkilerini araştırmak için tasarım duyarlılık analizi yapmışlardır. Son olarak, önerilen model, AİM burnundaki genel dinamik direngenliği ölçerek deneysel olarak doğrulamışlardır. Sonuç olarak ilk kritik (dönme) hızının, iç çapın artmasıyla arttığını ve motor

rotorunun uzunluğunun artışıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, arka yatak boyutunun ön yatak boyutundan iki derece daha küçük olması nedeniyle AİM sistemi için uygun yatak düzelişini elde etmişlerdir.

Upase ve Swami (2016), modal analizine dayanarak 335.4 mm uzunluğu ve 16000 dev/dk hıza sahip olan yüksek hızlı freze AİM'nin doğal frekansını ANSYS programı yardımıyla belirtmişlerdir. Sonra HFD yönteminden elde edilen sonucu deneysel sonuç ile karşılaştırmışlar. Sonuçlar, doğal rezonans bölgesi hızının tasarlanan freze AİM'nden çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Modal analiz sonucu deneysel sonuç ile karşılaştırarak 422 Hz. doğal frekansa sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Bu frekansta kritik (dönme) hızı 25320 dev/dk'dir. Bu da tasarlanmış 16000 dev/dk dönme hızına sahip olan AİM'nden uzak olduğunu göstermektedir.

Damodar ve diğ. (2013) mevcut çalışmalarında, farklı hız ve kesme kuvvetleri aralıklarında AİM için statik ve dinamik koşullarda inceleme yapmışlardır. AİM direngenlik kriterlerine göre tasarlanmıştır. Yapısal analiz ve model direngenliği değerlendirmek için SEA kullanılmıştır. Çalışmada önerilen tasarımda, malzeme sertliği esas olduğundan her bir model için yüke karşı yer değiştirme hesaplamışlardır. Doğal frekanslarını ve karşılık gelen mod şekillerini karşılaştırarak AİM'nin dinamik tepkisini incelemişlerdir. Yaptıkları analizden elde edilen doğal frekanslar 604Hz, 1158Hz, 1290Hz'dir. Sistem maksimum devrinin doğal frekanslardan çok uzak olduğu için dinamik açıdan güvenli olduğunu tespit etmişlerdir.

Yuzhong ve Altintas (2007) yaptıkları çalışmada, dönen mil, takım tutucu, eğik bilyalı rulmanlar, gövde bileşenlerinden oluşan AİM sisteminin bir modelini sunmuşlardır.

Anand ve Roy (2018) yaptıkları çalışmada, mevcut model için farklı malzemeler kullanarak SEA ile statik ve dinamik analizleri yapmışlardır. Statik analizinde AİM'nin malzemesi ve rulman yatağının açıklığı parametrelerini dikkate almışlardır. Campbell diyagramı yardımıyla kritik hız bulunmuştur. AİM'nin analizini ANSYS Workbench 18 üzerinde gerçekleştirmişlerdir. İş milinin yapısının ve rulman yatağının, AİM sisteminin arızalanmasında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Farklı parametreler dikkate alınarak AİM'nin optimizasyonunu önermişlerdir. Statik ve dinamik analizlerin sonucunda AİM sisteminin güvenli bir aralıkta olduğunu bulmuşlardır.

Lv ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, AİM süratlenme enerji tüketimini azaltma yaklaşımları geliştirmişlerdir. Makine düzeyinde yaklaşımlar arasında, iş milinin gereksiz yere durmasını ve

yeniden başlatılmasını önleme, ivmelenme aralığını kısaltma, hafiflik, doğru kullanım ve uygun bakım yaklaşımlarını sunmuşlardır. Hafif tasarım yaklaşımının uygulanması nispeten zordur çünkü takım tezgahının direngenliğinin bozulmaması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Sistem düzeyinde, enerji tasarrufu sağlamak için takım tezgâhı seçim kriteri geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, kullandıkları yaklaşımlar sayısında %10,6 ile %50 arasında enerji sarfiyatının azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Dong ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, rulman ön yükleme ile rulman yorulma ömrü, rulman sıcaklığı artışı, rulman bilyası kayması ve AİM'nin sertliği arasındaki ilişkileri açıklamışlardır. Bu ilişkilere dayanarak, rulman sıcaklığı artışı, yorulma ömrü ve rulman bilyası kaymasını birleştiren en uygun rulman önyükleme aralığını sunmuşlardır. Yaptıkları analizi doğrulamak için deneyler yapmışlardır. Sonuç olarak, yapılan analizi deneysel sonuçlarla karşılaştırarak sonucun tutarlı olduğunu göstermişlerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, transfer tezgahının kritik olduğu değerlendirilen delik delme sırasında oluşan kuvvetlerin hesaplanması, AİM'nin; modelleme, malzeme seçimi ve etki eden diğer parametreleri belirleyerek analizler yapılacaktır.

3.1. DELİK DELME İŞLEMLERİNDE KULLANILAN FORMÜLLER

Delik delme işlemin en temel formülü kesme hızıdır (V_C). Kesme hızı kesici takımın kapasitesini belirtir, yani belli şartlarda birim zamanda gidebileceği yol olarak takımın kapasitesi belirtilir.

$$V_C = \boldsymbol{\omega} \times r \tag{3.1}$$

$$\boldsymbol{\omega} = 2\pi \times n \quad => \tag{3.2}$$

$$V_C = 2\pi n \times \frac{Dc(mm)}{2} \tag{3.3}$$

Eğer dönen parçanın çapı (Dc) mm cinsinden verilmiş ise, Vc metre/dakika cinsinden ifade edebilmek için formülü 1000'e bölerek aşağıdaki formül elde edilir (KAYNAK, 2006),

$$V_C = \frac{Dc * \pi * n}{1000} \text{ [m/dak]} \tag{3.4}$$

Frezelemede kesici takım döner, parça sabittir. Tornalamada ise iş parçası döner, kesici takım sabittir. (n) iş milinin dev/dk cinsinden devir hızı olup aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$n = \frac{Vc \times 1000}{Dc * \pi} \text{ [dev/dak]} \tag{3.5}$$

İlerleme hızı, birim zamanda alınacak yol miktarı olarak tanımlanmaktadır. (KAYNAK, 2006).

$$V_f = f_n \times n \text{ [mm/dak]} \tag{3.6}$$

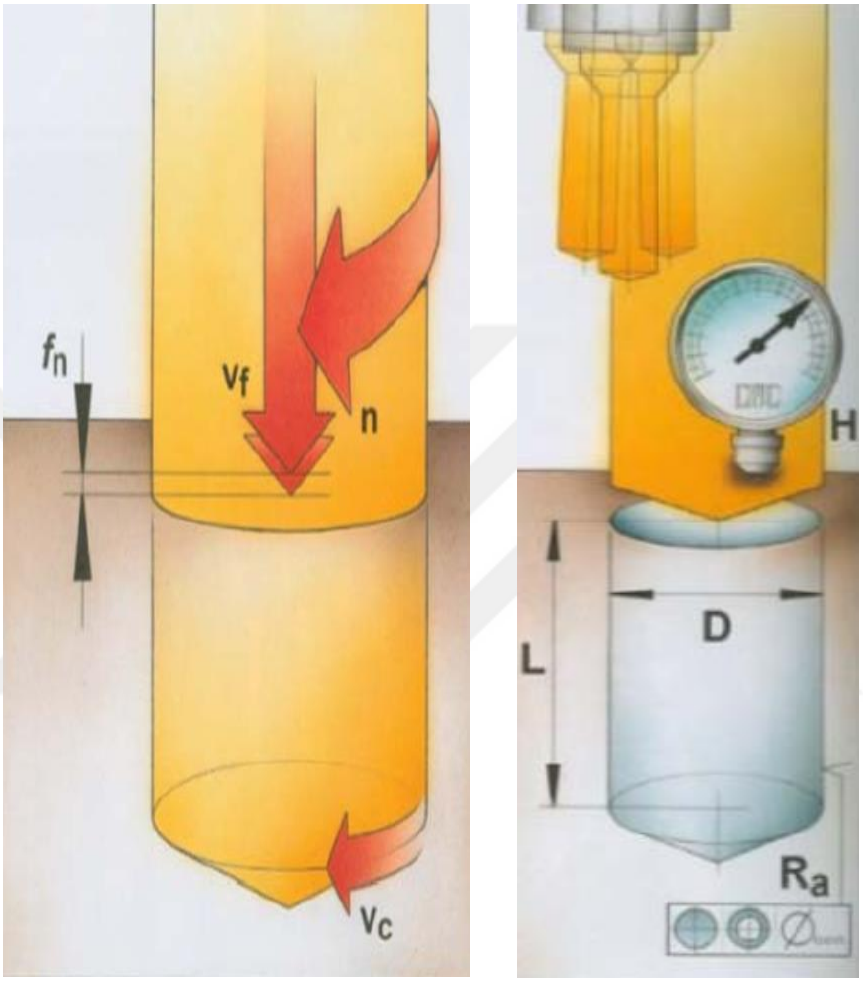
Burada (f_n) devir başına ilerleme, yani nüfuziyet hızını (V_f) hesaplamak için kullanılan büyüklüktür.

$$f_n = \frac{Vf}{n} \text{ [mm/dev]} \tag{3.7}$$

Veya devir başına ilerleme aşağıdaki formülden elde edilebilir.

$$f_n = Z_C \times f_z \text{ [mm/dev]} \quad (3.8)$$

Burada (Zc) diş veya ağız sayısı, (f_z) ise kesici diş başına ilerleme sayısıdır.



Şekil 3.1: Kesme hızı ve ilerleme hızı (Saygı, 2015).

Talaş kaldırma oranı (Q), muayyen bir müddet içinde kaldırılabilecek malzeme miktarını belirtmektedir (Sandvik, 2020).

$$Q = \frac{Dc * fn * Vc}{4} \text{ [cm}^3\text{/dak]} \quad (3.9)$$

Döndürme momenti veya Tork (Mc), teğetsel kesme kuvvetiyle talaş alanının merkezine olan yarıçapın çarpımına eşittir.

$$Mc = Fc \times r_a \, [Nm] \tag{3.10}$$

$$r_a = \frac{Dc}{2} \, [mm] \tag{3.11}$$

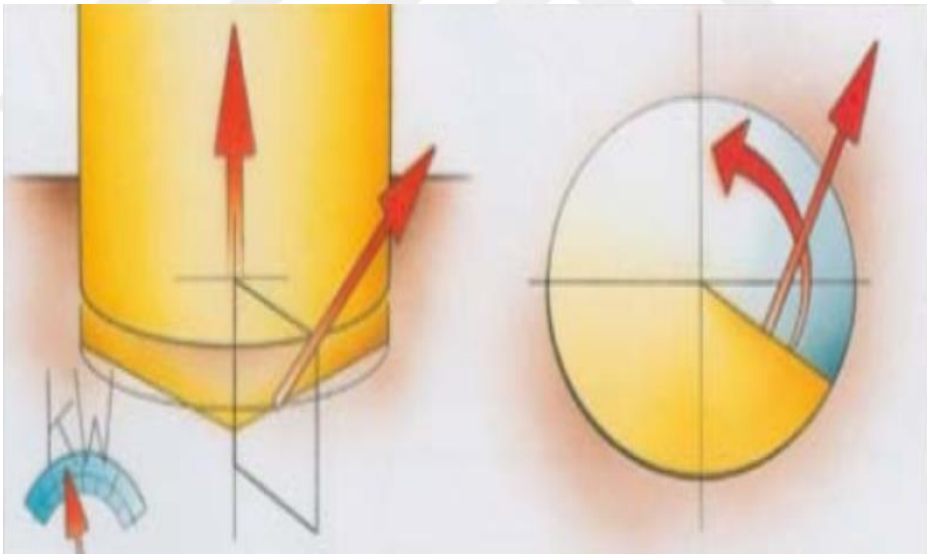
Devir başına ilerleme milimetre/devir cinsinden verilmiş ise torku (N.m) cinsinden ifade etmek için (3.10) formülü 1000'e bölünür.

$$Mc = \frac{Kc * fn * Dc^2}{8 * 1000} \, [Nm] \tag{3.12}$$

Burada (Kc) Spesifik-Özgül kesme kuvveti (N/mm^2 - MPa)'dir. Daha küçük bir Kc değeri sayısında teğetsel kuvvet ve tork azaltılır (Walter).

$$Kc = \frac{K_{c1.1}}{h^{m_c}} \, [N/mm^2] \tag{3.13}$$

Burada ($K_{c1.1}$) bağıl kesme kuvveti (N/mm^2), (h) talaş kalınlığı (mm) ve (m^c) ise Kc eğrisinin yükselişidir.



Şekil 3.2: Matkabın torku ve ilerleme kuvveti (Saygı, 2015).

Tezgâhın kesme işlemini, izleyeceği yolu göstermek için etrafına uygulanması gereken güce kesme net gücü (P_C) denir (KAYNAK, 2006).

$$P_C = M_C \times \omega \tag{3.14}$$

(3.2), (3.5) ve (3.12) formüllerden aşağıdaki formül elde edilir.

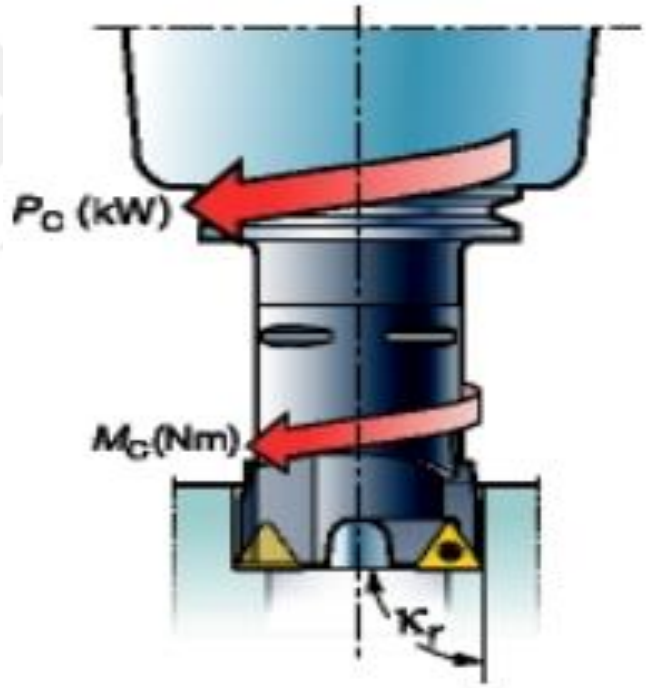
$$P_C = \frac{K_C * f_n * V_C * D_C}{4 \times 1000} \quad (3.15)$$

İş mil hızı (dev/dakika) cinsinden verildiği için sonucu 60'e bölünerek saniyeye çevrilir ve böylece,

$$P_C = \frac{K_C \times f_n \times V_C \times D_C}{4 \times 60 \times 10^3} \text{ [kW] elde edilir.} \quad (3.16)$$

Motorun güç kaybı, kesme net gücünün (P_C) tezgah verimlilik oranına (η) bölünmesi ile bulunmaktadır.

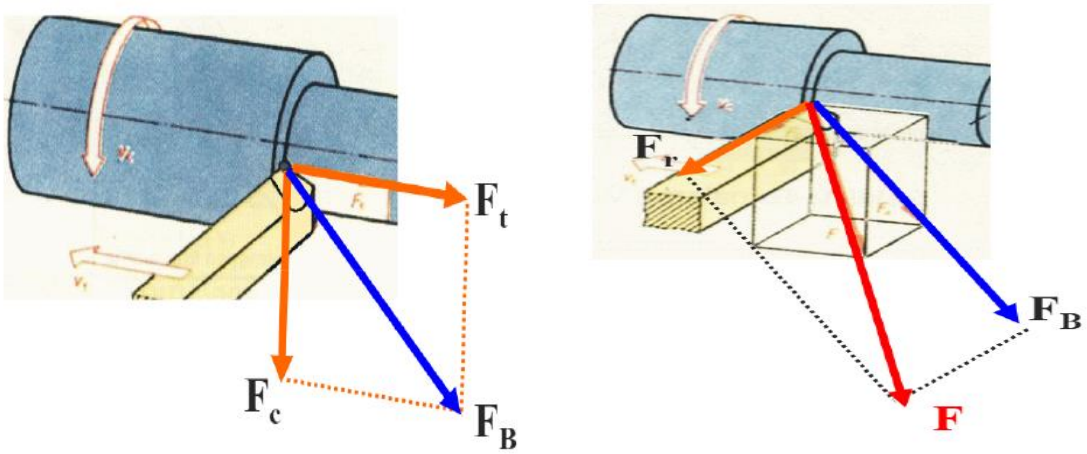
$$P = \frac{P_C}{\eta} \text{ [kW]} \quad (3.17)$$



Şekil 3.3: Kesme net gücü ve tork (Sandvik, 2020).

Genellikle delik delme işleminde en önemli parametrelerden biri ilerleme kuvvetidir (F_t). İlerleme kuvveti kesici takım malzemeye girerken üzerine uygulanan kuvvettir (Walter).

$$F_t = 0{,}63 \times \frac{f_n \times D_C \times K_C}{2} \text{ [N]} \quad (3.18)$$



Şekil 3.4: İlerleme kuvveti (F_t), asıl kesme kuvveti (F_C), bileşke kuvveti (F_B), radyal kuvveti (Fr) ve talaş kaldırma kuvvetinin (F) gösterimi (Özbey, 2015).

3.2. AYNA İŞ MİLİ TASARIMINDA KULLANILACAK MALZEMELER

AİM tasarımında üç farklı malzeme kullanılmış olup, Alman standartına göre kaliteleri Alaşım 4140 (42CrMo4), 20MnCr5 ve Ck45 çeliğidir. Kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıdaki tablolarda listelenmiştir. (Hasçelik)

Tablo 3.1: Mekanik özellikleri.

Malzeme Özellikleri	**42CrMo4**	**Ck45**	**20MnCr5**
Young Modülü (GPa)	200	206	200
Poisson Oranı	0.27	0.29	0.28
Yoğunluk (kg/m^3)	7850	7870	7850
Çekme Dayanımı (MPa)	655	515	530
Akma Dayanımı (MPa)	415	485	385
Yüzde Uzama (%)	12	10	16

Tablo 3.2: Kimyasal bileşim kütle yüzdesi.

Kimyasal Bileşimi kütle %								
DIN	**AISI/SAE**	**C**	**Si$_{maks.}$**	**Mn**	**P$_{maks.}$**	**S$_{maks.}$**	**Cr**	**Mo**
42CrMo4	**4140**	0,38-0,45	0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,90-1,20	0,15-0,30
Ck45	**1045**	0.42-0.50	0,40	0.50-0.80	0.035	0.035	-	-
20MnCr5	**5120**	0.17-0.22	≤.40	0.60-0.90	0.035	0.035	1.00-1.30	-

Tablo 3.3: Malzemelerin kullanım alanları.

DIN	AISI/SAE	Kullanım Alanları
42CrMo4	4140	Dişli çark, otomobil ve uçak yapımında krank mili, aks mili ve kovanı, yivli mil ve sünekliliği yüksek parçalarda kullanılır.
Ck45	1045	Taşıt, makine, motor ve aparat yapımında, orta zorlanan ve yüksek arıklıkta çelikten yapılacak parçalarda kullanılır.
20MnCr5	5120	Aktarma organı parçalarında, dişli çark, tabak ve konik dişli, kalın kesitli mil, pim, burç ve benzeri parçalarda, rulman yataklarında ve buna benzer darbe emici bölgelerde kullanılır.

3.3. AYNA İŞ MİLİNİN TASARLANMASI VE ANALİZLERİ

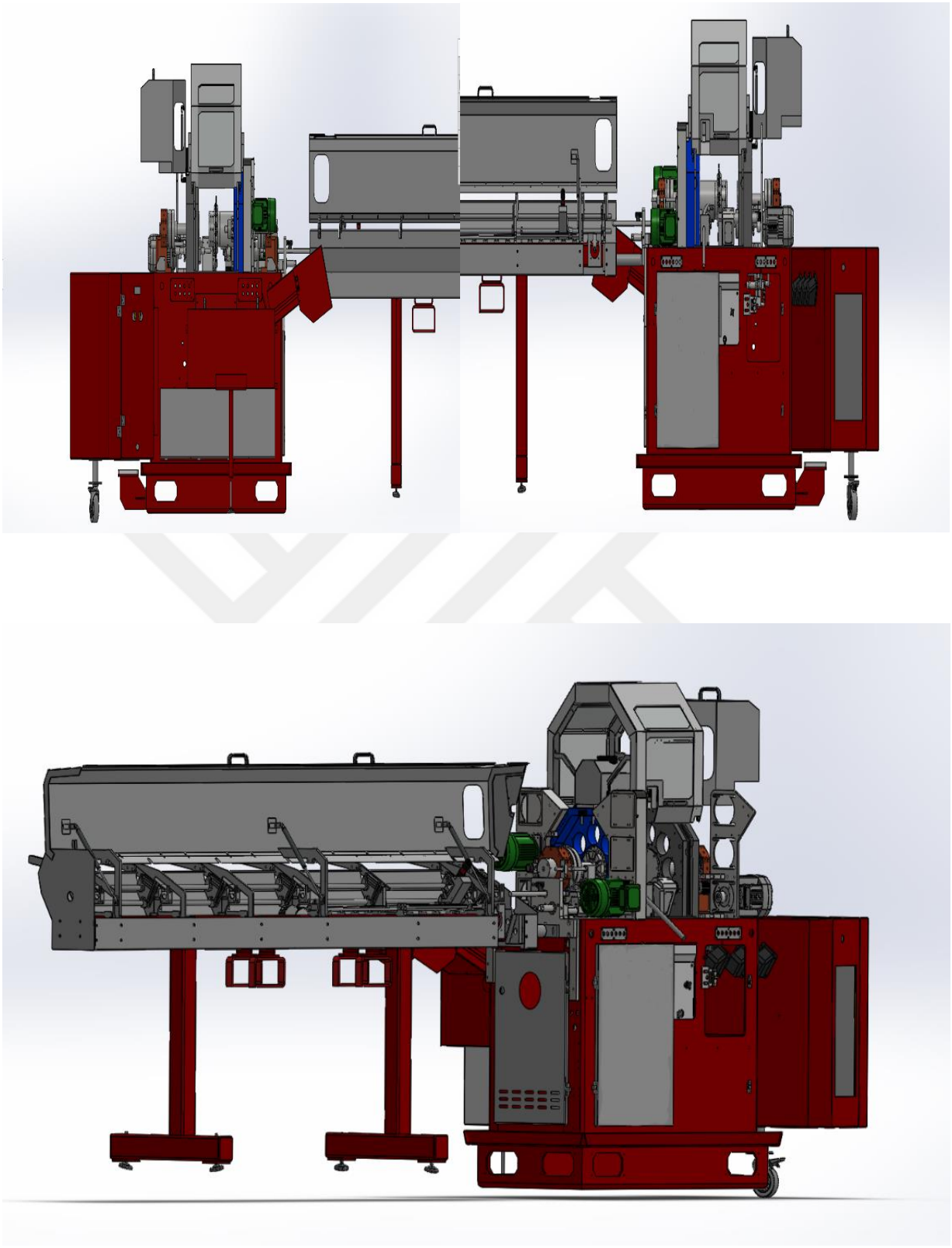
AİM'nin tasarımı, Siemens NX tasarım programı, analizleri ise SolidWorks Simulation Premium programı ile gerçekleştirilmiştir. Hülasa, herhangi bir parça için CAD ve analiz süreçleri;

- Modelleme,
- Çözüm,
- Sonucun incelenmesi ve değerlendirme,

şeklinde gerçekleşir.

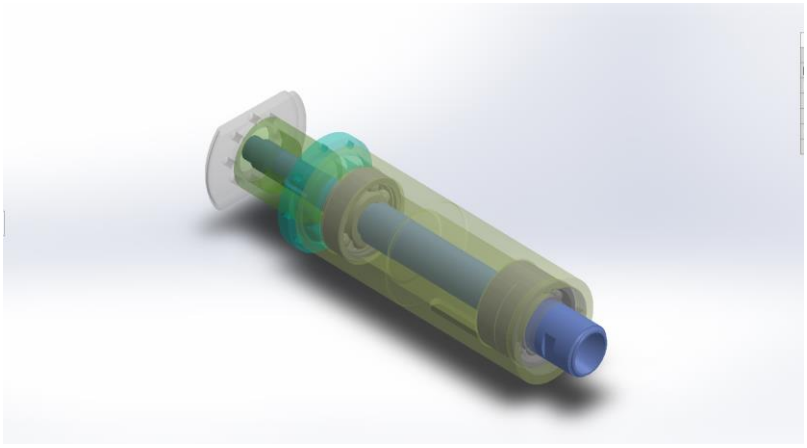
3.3.1. Ayna İş Milinin Modellenmesi

Literatür taraması kısmında bahsedildiği gibi AİM, CNC transfer tezgahındaki en önemli parçalardan biridir. Aşağıda gösterilen Şekil 3.5'te, Siemens NX programında tasarlanmış ve ardından katı modeli SolidWorks programına aktırılmış olan sekiz istasyonlu CNC transfer tezgâhı gösterilmektedir.

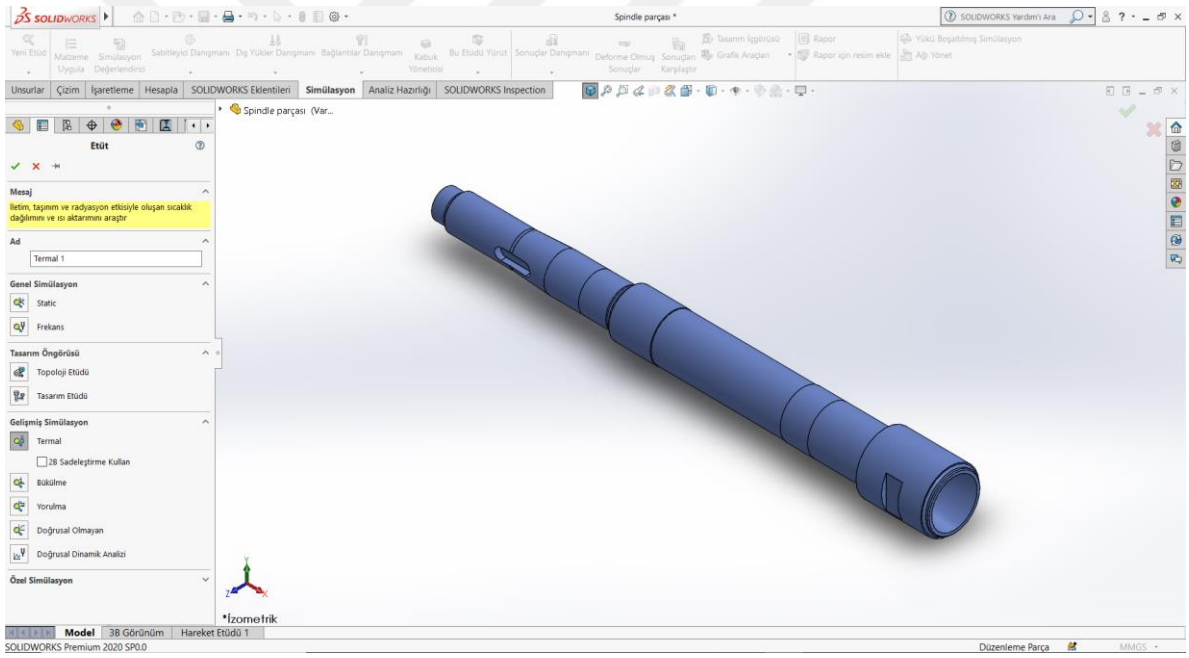


Şekil 3.5: SolidWorks ortamında gösterilmiş olan 8 istasyonlu CNC tezgâhı.

AİM'nin montaj içindeki konumu Şekil 3.6'da ve yalın hali Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6: AİM'nin görünümü.



Şekil 3.7: AİM için istenilen analizi seçme.

3.3.2. Ayna İş Milinin Analizleri

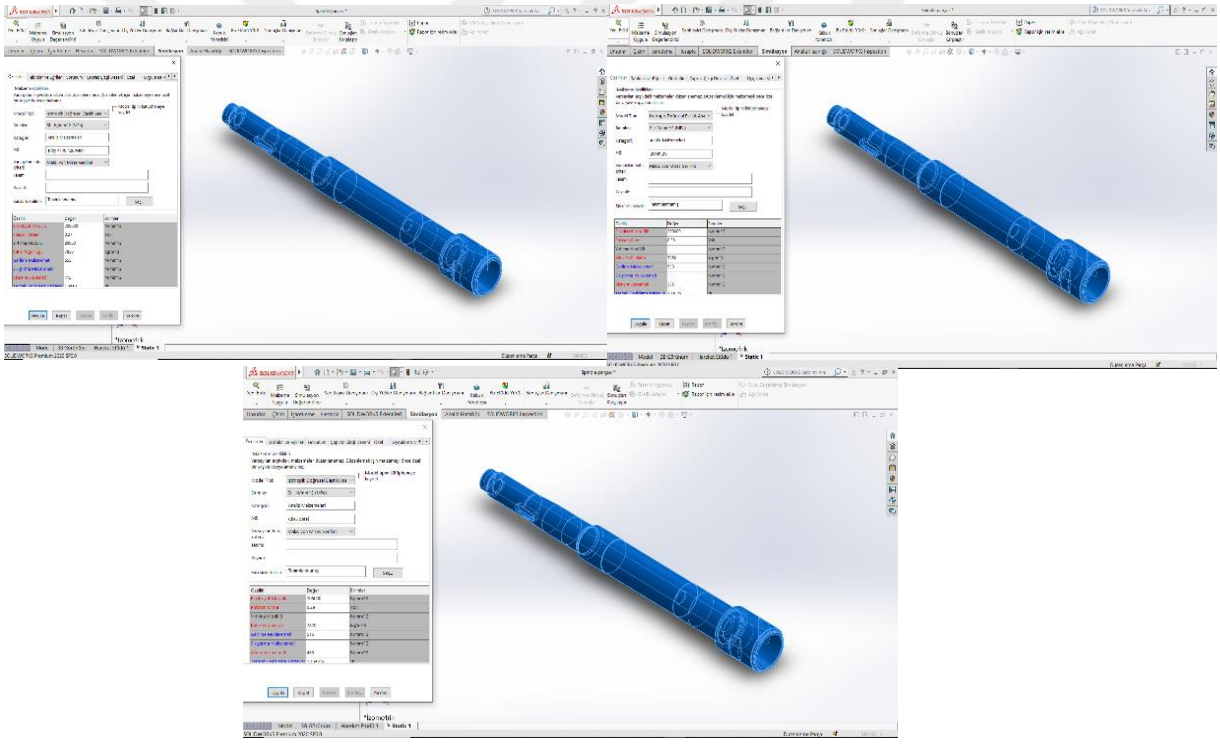
İşleme sırasında AİM, kesme ve merkezkaç etkileri nedeniyle çeşitli yüklere maruz kalır. Bu yükler, yüksek deformasyon ve yüksek gerilmeler nedeniyle AİM arızasına neden olabilir. Bu nedenle, tasarımda statik ve dinamik analizler yapılmalıdır (Kutlu, 2016).

Siemens NX programıyla tasarlanan AİM SolidWorks programına aktırıldıktan sonra termomekanik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan termomekanik analizlerin aşamaları şu şekilde sıralanabilir; (GÖNÜL, 2012).

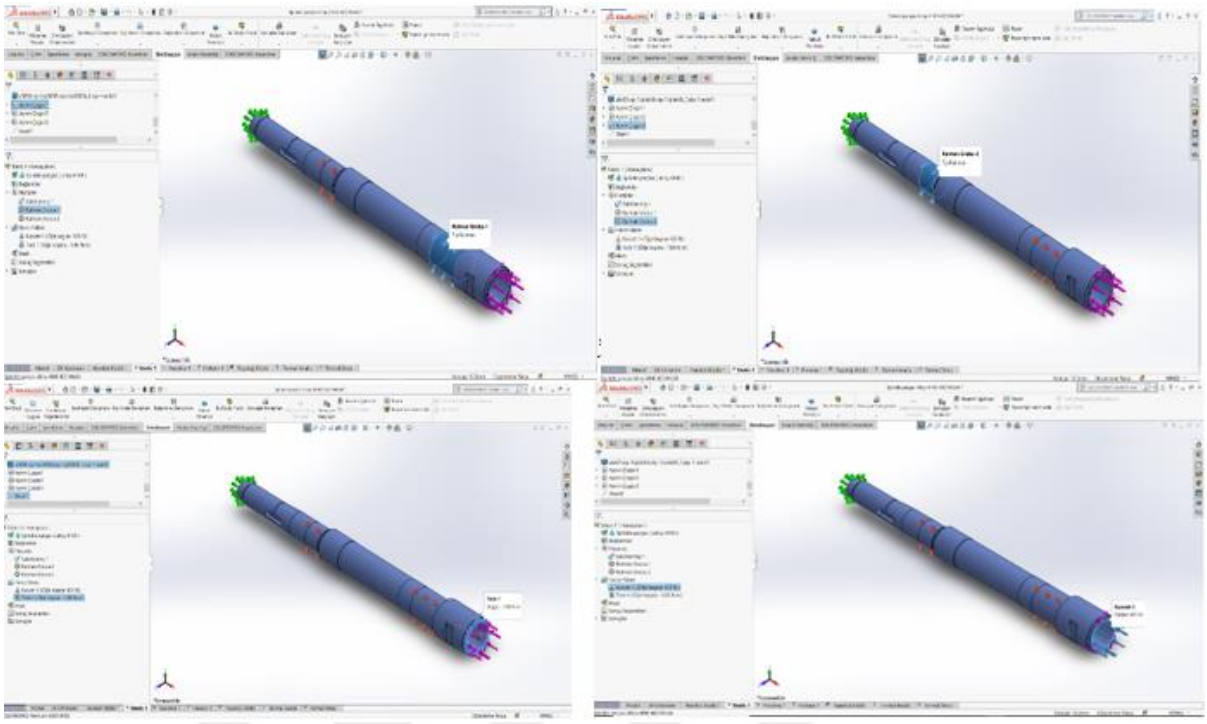
- Modelin hazırlanması
- Modelin analiz kısmına getirilmesi ve analiz tipinin seçilmesi
- Modele uygun malzeme uygulanması
- Sınır koşullarının girilmesi
- Modelin çözüm ağ (mesh) oluşturulması
- Analiz işleminin başlatılması
- Sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi

Bu çalışmada, Şekil 3.8'de görüldüğü gibi AİM'ne farklı üç malzeme uygulayarak analiz yapılmıştır.



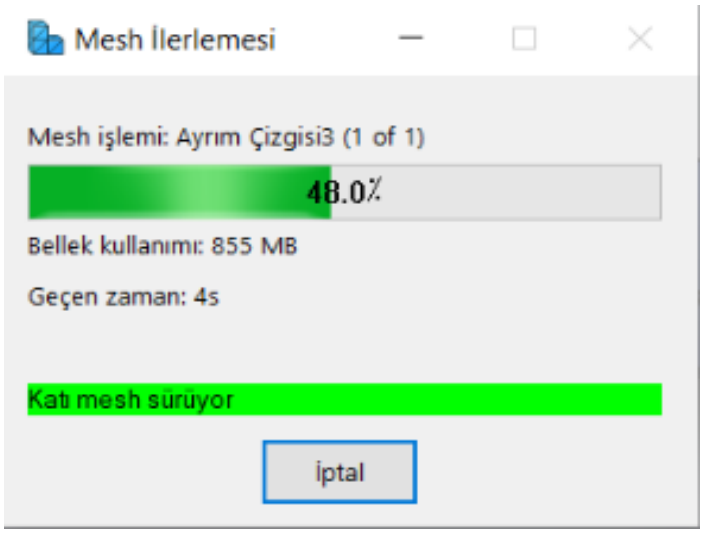
Şekil 3.8: AİM için Alaşım 4140 (42CrMo4), 20MnCr5 ve Ck45 çeliği malzeme seçiminin yapılması.

AİM Modelin oluşturulması ve malzeme seçme işlemlerini yaptıktan sonra modelin sınır koşulları girilmiştir. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi AİM'nin ön tarafından iki rulman arka tarafından ise bir rulman ile sabitlenmiştir, aynı zamanda arka kısmından fiskelenmiştir, ön kısmında x eksenine dik 423 N kuvvet ve saat yönü tersi 1,06 Nm tork uygulanmıştır.

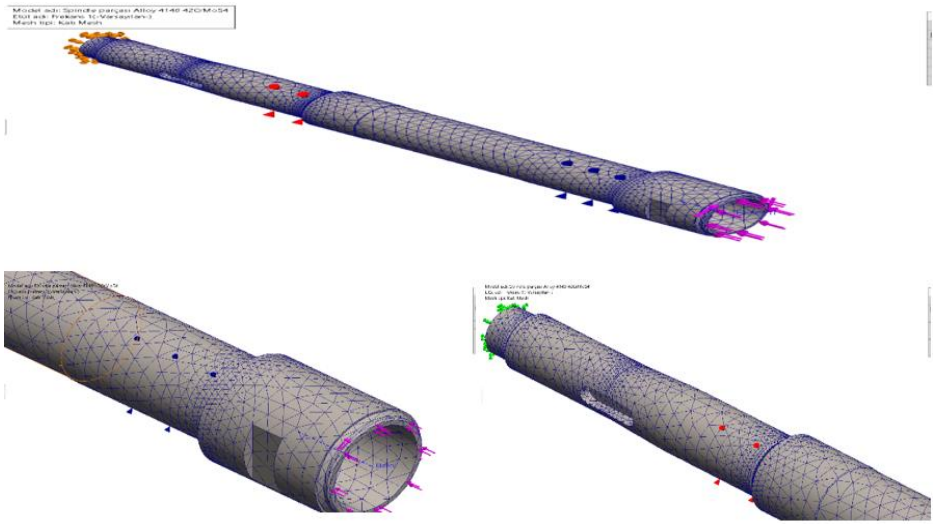


Şekil 3.9: Ayna İş Mili için yüklemeler ve sabitlemeler.

Sınır koşullarının girilme işleminin ardından AİM "mesh" ismi verilmiş olan ağlara bölünmüştür. Çözüm zamanına etki eden özellikler; eleman ve düğüm noktası sayısı, analiz türü, analiz edilen parçasının geometrisi ve analizde kullanılan bilgisayar işlemcisi ve REH kapasitesidir. Şekil (3.10 ve 3.11)'de modelin ağ oluşturulmasına ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.10: Çözüm işlemi.



Şekil 3.11: Ayna İş Milinin tamamlanan ağ gösterimi.

Bu çalışmada, AİM SolidWorks ortamında seçilen farklı üç malzeme için aşağıdaki analizler gerçekleştirilmiştir;

- ✓ Statik analizi,
- ✓ Yorulma analizi,
- ✓ Modal analizi,
- ✓ Termal analiz,
- ✓ Topoloji optimizasyonu.

Son olarak istenilen analizler yapıldıktan sonra çıkan sonuçların inceleme ve yorumlama adımları gelmektedir. Genellikle CAD programlarında analiz sonuçları sayısal değer, renk dağılımı, animasyon ve grafik şeklinde elde edilebilmektedir.

4. BULGULAR

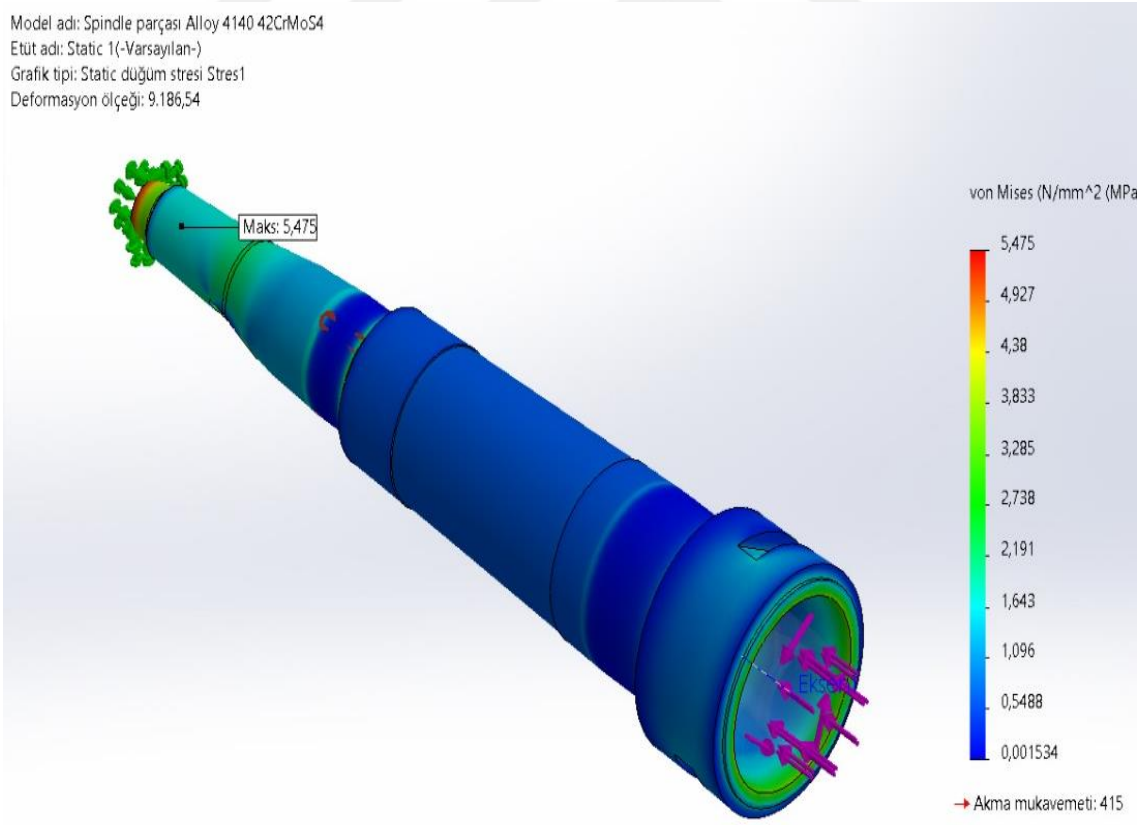
SolidWorks simülasyonu, gerilme, gerinim, yer değiştirme, sıcaklık, frekans vb. birçok sonuç çeşidi sunmaktadır. Analizler aşağıdaki başlıklar şeklinde listelenmektedir.

4.1. STATİK ANALİZİ

4.1.1 Nümerik Yaklaşımları ile Statik Analizi

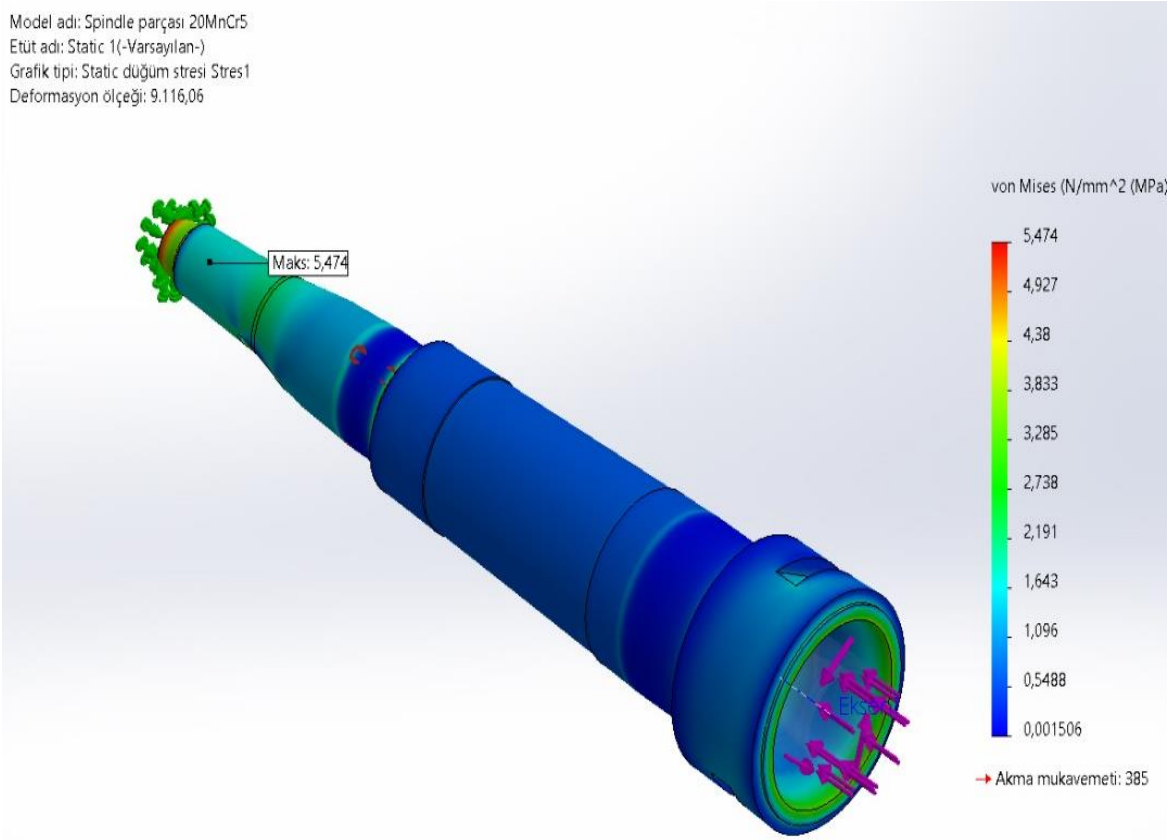
Statik analizini yaparken ilk olarak von Mises eşdeğer gerilmesine bakıldı. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te gösterilmiş olan sonuçlara bakıldığında maksimum gerilmenin AİM'nin mesnet kısmında meydana geldiği görülebilmektedir. Oluşan maksimum eşdeğer gerilme değeri, kullanılan malzemelerin akma mukavemetlerinden çok küçük olduğu için tasarımın çok güvenli ve dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

1. Alaşım 4140 (42CrMo4).



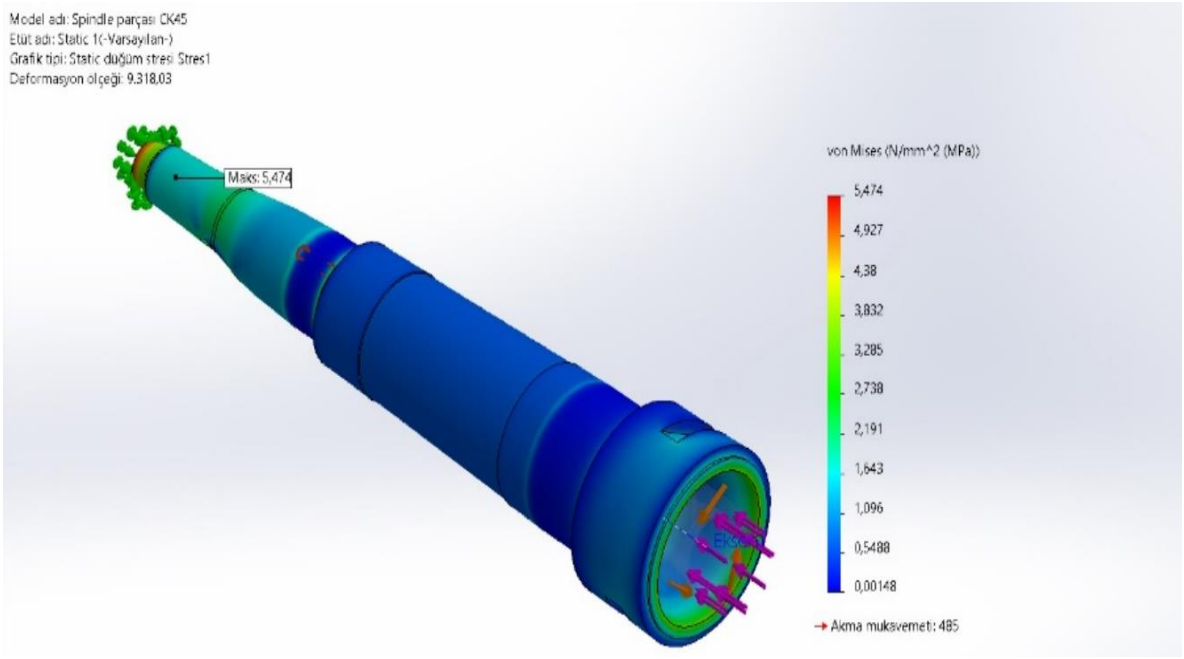
Şekil 4.1: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçları.

2. 20MnCr5.



Şekil 4.2: 20MnCr5 malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçlar.

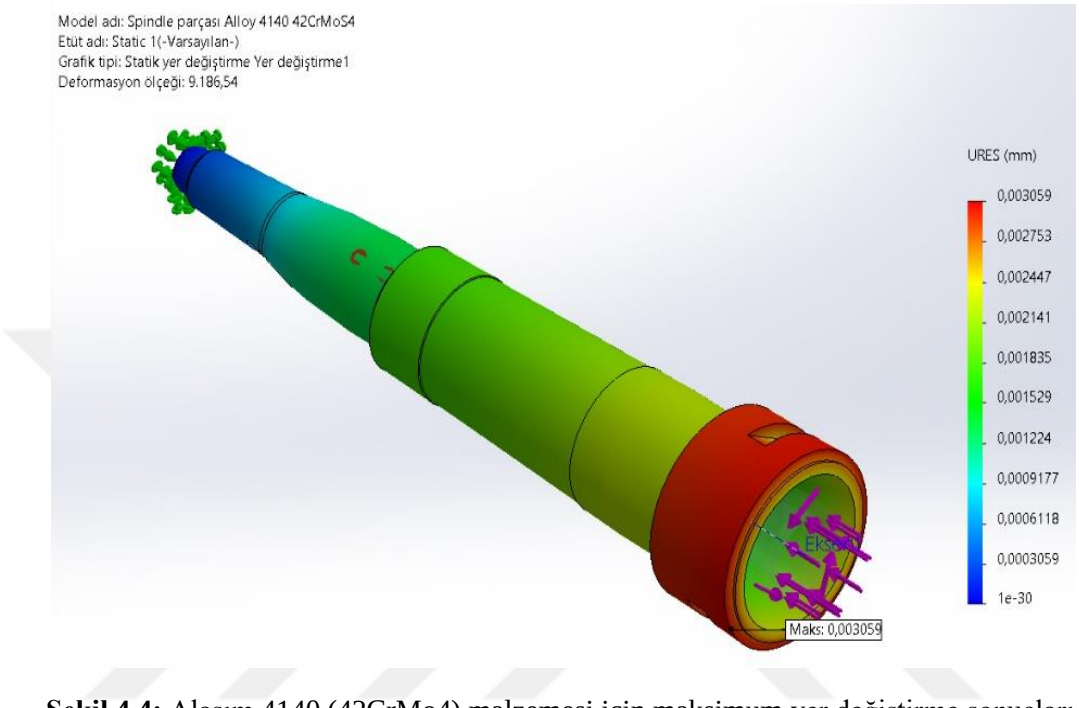
3. Ck45 çeliği.



Şekil 4.3: Ck45 çeliği malzemesi için von-Mises gerilme analiz sonuçları.

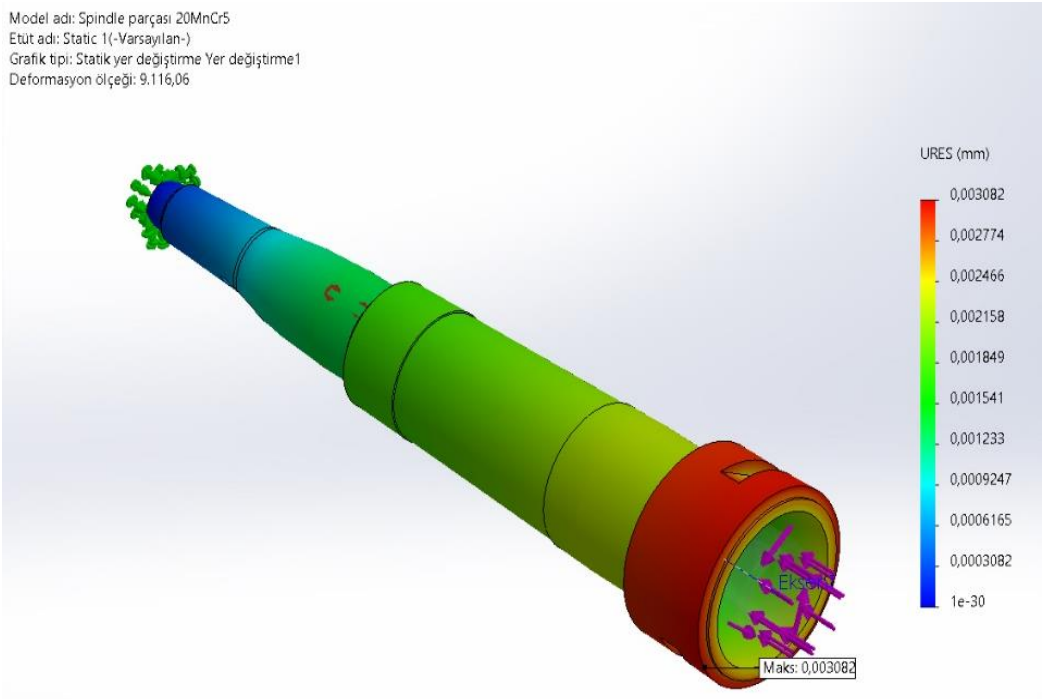
Aynı zamanda AİM'de çok küçük yer değiştirmeler oluştuğu görülmüştür. Böylelikle, modelin boyutsal toleransları etkilemeyecek düzeyde rijit direngen olduğu belirlenmiştir. Maksimum yer değiştirme sonuçlarının görselleri Şekil 4.4, 4.5, 4.6'da verilmiştir.

1. Alaşım 4140 (42CrMo4).



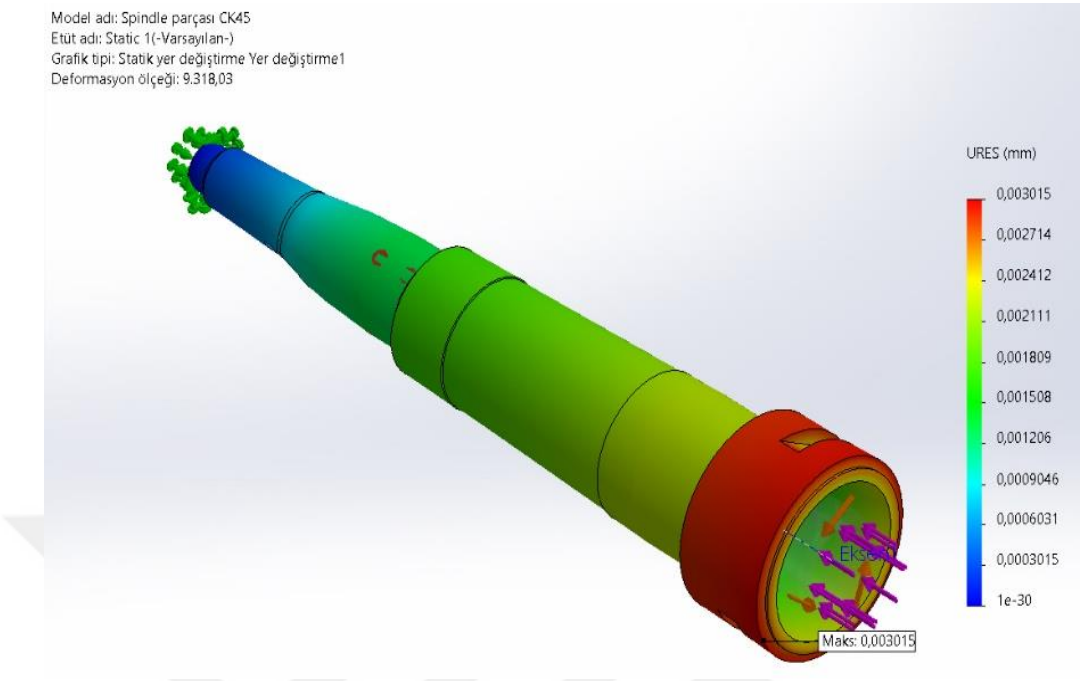
Şekil 4.4: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları.

2. 20MnCr5.



Şekil 4.5: 20MnCr5 malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları.

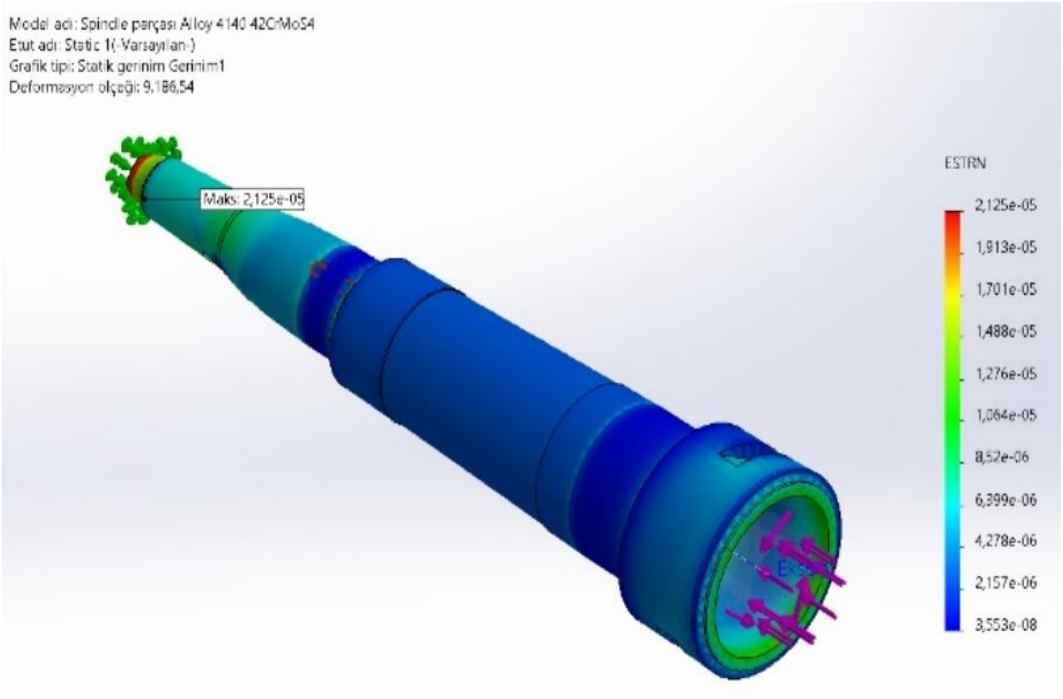
3. Ck45 çeliği.



Şekil 4.6: Ck45 çeliği malzemesi için maksimum yer değiştirme sonuçları.

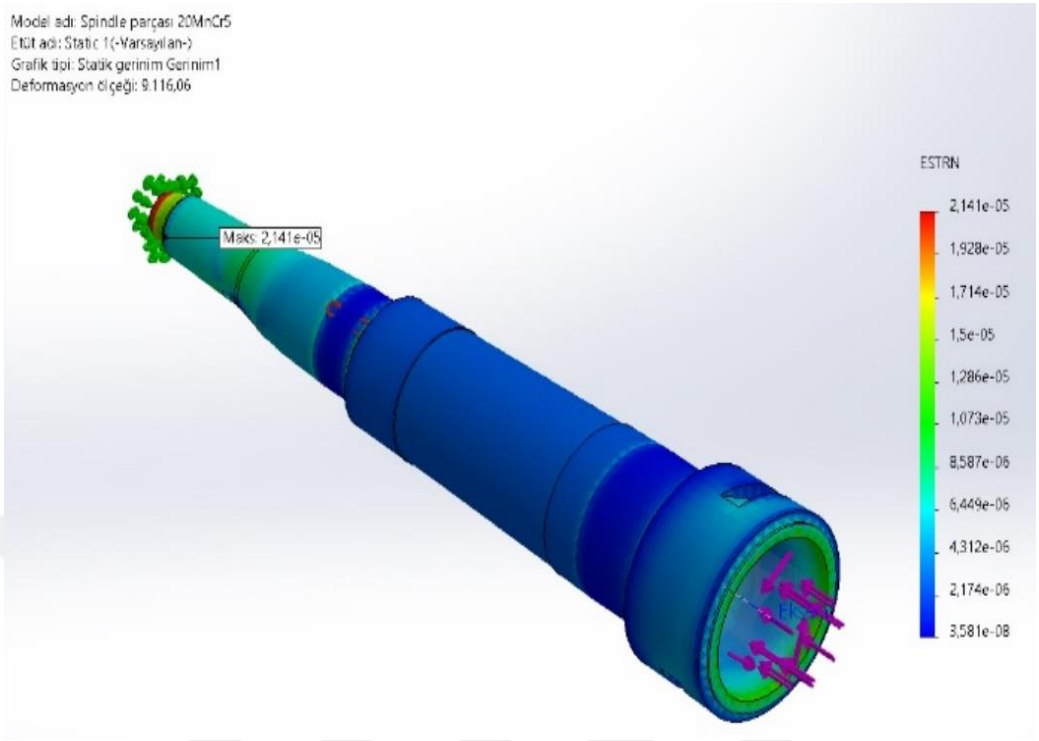
Statik analizde son olarak gerinim değerlerine bakılmış olup, görselleri Şekil 4.7, 4.8, 4.9'da verilmiştir.

1. Alaşım 4140 (42CrMo4).



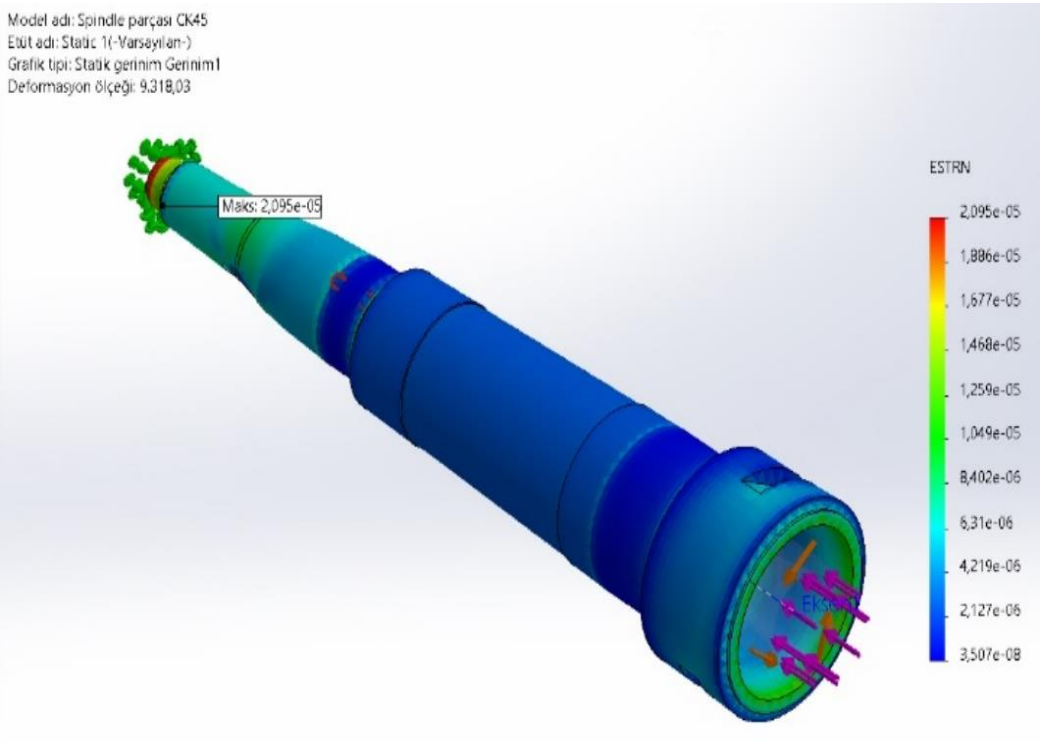
Şekil 4.7: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için gerinim değerleri.

2. 20MnCr5.



Şekil 4.8: 20MnCr5 malzemesi için gerinim değerleri.

3. Ck45 çeliği.



Şekil 4.9: Ck45 çeliği malzemesi için gerinim değerleri.

Tablo 4.1'de statik analiz sonuçlarının özeti bulunmaktadır.

Tablo 4.1: Ayna İş Milinin statik sonuçları.

Sonuç Türü	**42CrMo4**	**Ck45**	**20MnCr5**
Maks. Gerilme (MPa)	5.475	5.474	5.474
Maks. Gerinim	2.125×10^{-5}	2.095×10^{-5}	2.141×10^{-5}
Maks. Yerdeğiştirme (mm)	0.003059	0.003015	0.003082

4.1.2 Analitik Yaklaşımları ile Statik Analizi

SolidWorks programından elde edilen statik sonuçların doğrulanması için teorik hesaplamalar da yapılmıştır. İlk olarak von Mises yaklaşımını kullanarak oluşan maksimum gerilme hesaplanmaştır. (Şekercioğlu, 2017)

❖ **Maksimum gerilme hesabı:**

Burulma gerilmesi, dönmeden dolayı AİM'de üretilen kayma gerilmesidir.

$$\tau_{bu} = \frac{T_c}{J} = \frac{M_c \times r}{\frac{\pi}{2}(r_0^4 - r^4)} = \frac{1.06\times 1000\times 7.5}{\frac{\pi}{2}(7{,}5^4 - 5^4)} = 1{,}993 MPa \quad (4.1)$$

Buradaki,

τ_{bu}: Burulma gerilmesi.

r_0 : Dış yarıçap.

r : İç yarıçap.

T_c : Burulma momenti veya torku.

J : Polar atalet momenti.

Basma gerilmesi ise malzemenin deforme olmasına neden olan kuvvettir. Ortalama Gerilme değeri bağıntısından bulunur,

$$\sigma_b = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi({r_0}^2 - r^2)} = \frac{423}{\pi(7{,}5^2 - 5^2)} = 4.309 MPa \quad (4.2)$$

σ_b : Basma gerilmesi, F: kuvvet miktarı,

A : Kesit alanı.

Distorsiyon enerjisi teorisine göre,

$$\sigma_{eş} = \sqrt{{\sigma_b}^2 + 3\tau_{bu}^2} = \sqrt{4.309^2 + 3 \times 1.993^2} = 5.521 MPa \quad (4.3)$$

$\sigma_{eş}$: Eşdeğer gerilme.

❖ **Maksimim yer değiştirme hesabı:**

AİM'inin deformasyonu aşağıdaki genelleştirilmiş denklemden elde edilir,

$$y'' = \frac{dy^2}{dx^2} = \frac{M_c}{EI} \tag{4.4}$$

I : atalet momenti.

$$I = \frac{\pi}{4}(r_0^4 - r^4) \tag{4.5}$$

Sonuç olarak AİM'deki maksimum yer değiştirme (y_{Max}) kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine göre aşağıdaki bağıntıdan bulunur,

$$y_{Max} = \frac{M_c\, x^2}{2EI} \tag{4.6}$$

❖ **Maksimim gerinim hesabı:**

Son olarak kullanılan malzemenin farklı mekanik özelliklerine göre AİM'in ucuna uygulanan yüklemeden sehim hesabı yapıldı,

$$\delta = \frac{FL}{AE} \tag{4.7}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{4.8}$$

ΔL: Uzama miktarı (mm)

ε : Gerinim

E : Elastisite modülü (MPa)

L : Uzunluk (mm)

δ : Sehim (mm)

Tablo 4.1'de analitik yaklaşımından elde edilen statik analiz sonuçlarının özeti bulunmaktadır.

Tablo 4.2: Ayna İş Milinin analitik statik sonuçları.

Sonuç Türü	**42CrMo4**	**Ck45**	**20MnCr5**
Maks. Gerilme (MPa))	5,521	5,521	5,521
Maks. yerdeğiştirme (mm)	0.003730	0.003728	0.003730
Gerinim	2.1542×10^{-5}	2.092×10^{-5}	2.1542×10^{-5}

Tablo 4.3'te görüldüğü gibi, nümerik yaklaşımdan elde edilen değerler SEA sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3: Ayna İş Milinin statik sonuçlarının nümerik ve analitik karşılaştırılması.

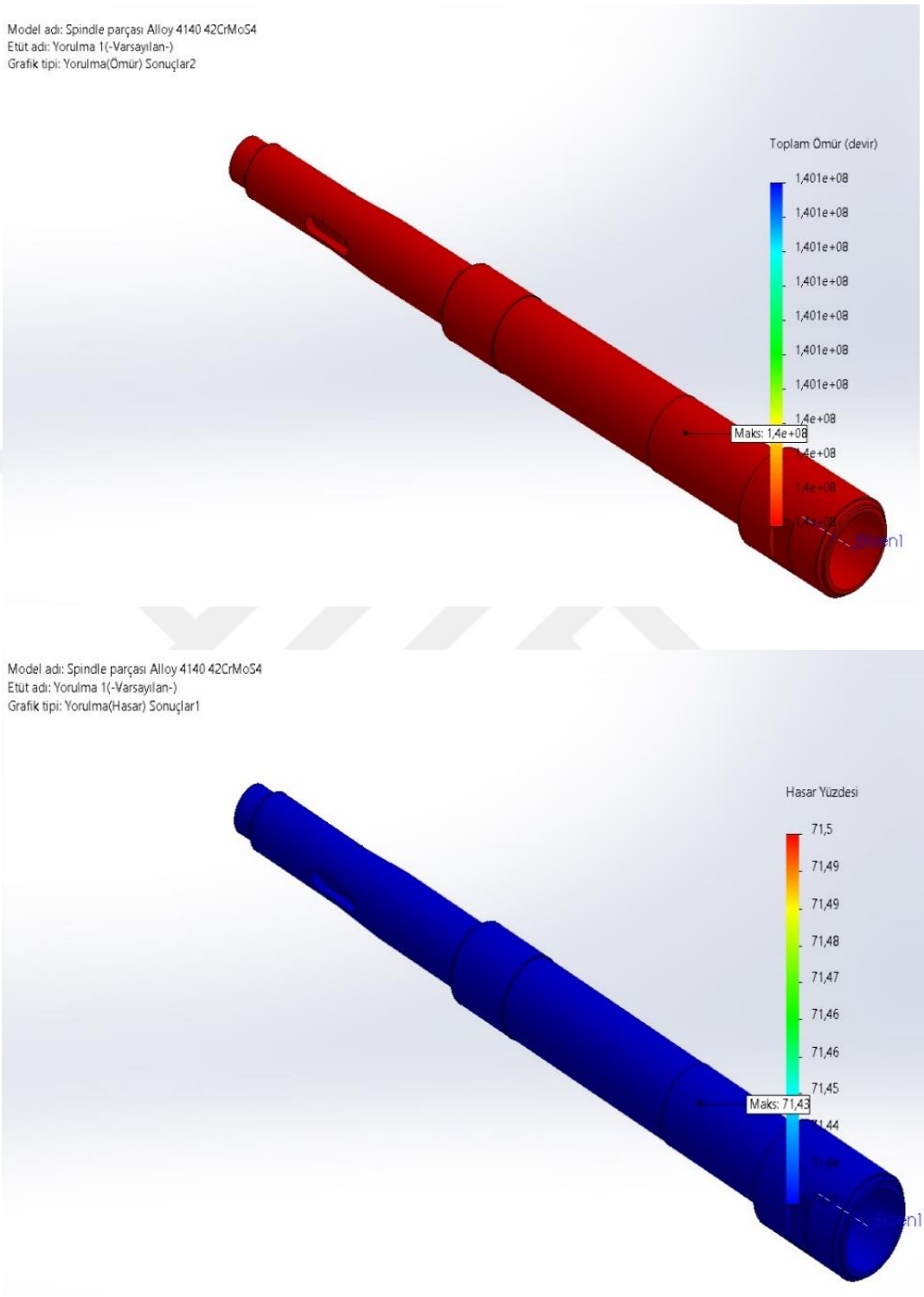
Sonuç Türü		**42CrMo4**	**Ck45**	**20MnCr5**
Maks. Gerilme (MPa)	Nümerik	5.475	5.474	5.474
	analitik	5,521	5,521	5,521
	% Hata oranı	0.833	0.851	0.851
Maks. yerdeğiştirme (mm)	Nümerik	0.003059	0.003015	0.003082
	analitik	0.003730	0.003728	0.003730
	% Hata oranı	17.989	19.1	17.373
Gerinim	Nümerik	2.125×10^{-5}	2.095×10^{-5}	2.141×10^{-5}
	analitik	2.1542×10^{-5}	2.092×10^{-5}	2.1542×10^{-5}
	% Hata oranı	1.355	0.143	0.612

4.2. Yorulma Analizi

Tasarlanan makineler gerçek hayatta işletme koşullarındaki yüklere defalarca maruz kalabilir ve statik veya dinamik olarak güvenli olduğunu düşündüğümüz bu makineler tekrarlı yükler sonucunda hasar görebilirler. SolidWorks simülasyonu ile sabit veya değişken genlikli tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan hasar miktarı kolayca hesaplanabilir. Burada, statik analizi kullanarak yorulma analizi yapılmış olup, AİM'nin tasarımının üzerine hangi yük geleceğini belirlemek için SolidWorks diliyle olay eklenmiştir. Yük tekrarlama miktarı 100 milyon olarak girilmiştir. Yorulma analizinin amacı, tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan hasarı tespit ederek imalat öncesinden tedbirleri almak ve böylece maliyetleri azaltırken daha uzun ömürlü ürünler tasarlamaktadır.

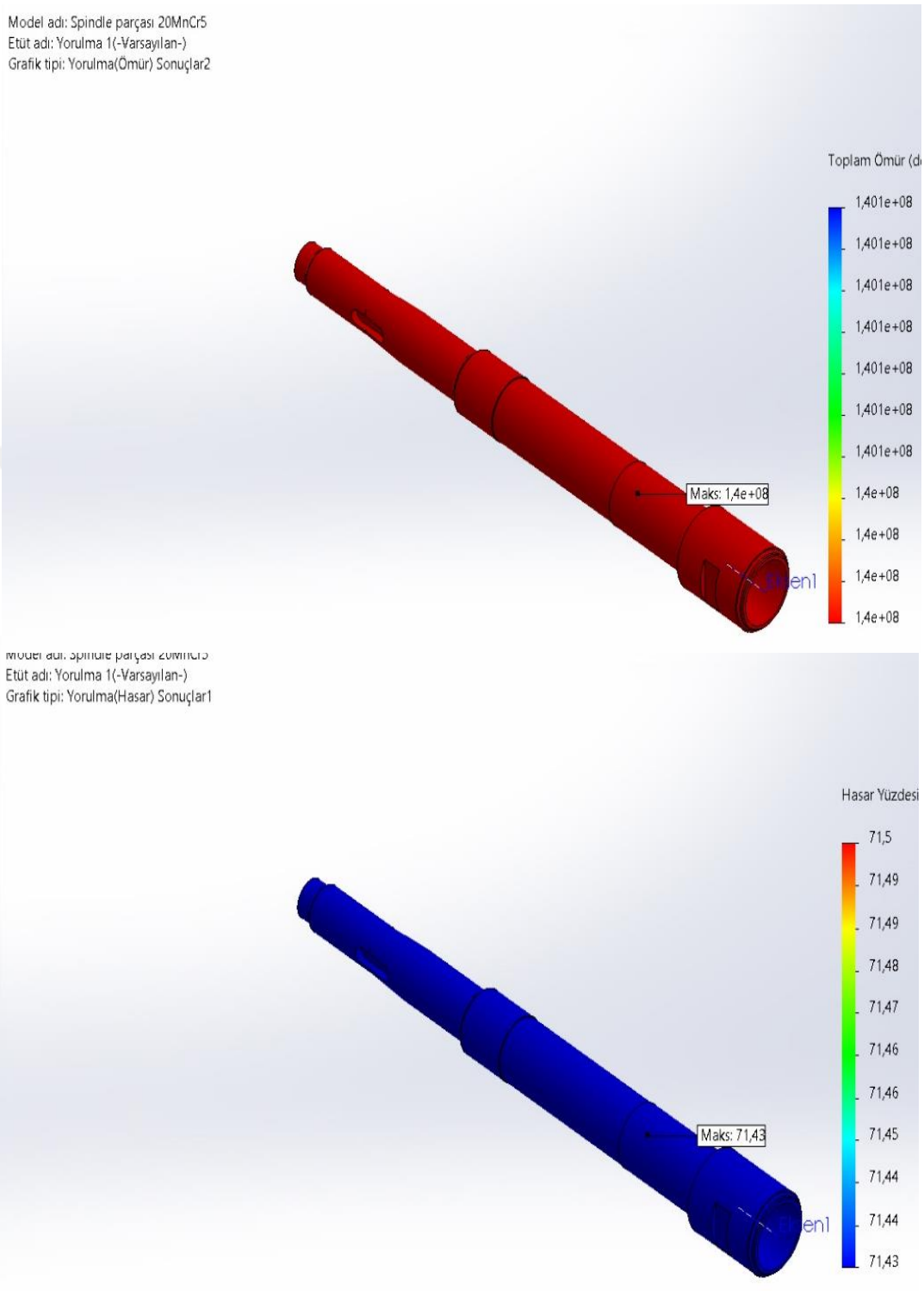
Yorulma analiz sonuçları Şekil 4.10, 4.11, 4.12'de gösterildiği gibi kullanılan üç malzeme için maksimum hasar yüzdesi ve toplam minimum ömür hemen hemen aynı olup, değerleri sırasıyla 71.5 ve 1.4×10^{8} devirdir. AİM modelinin her yerindeki alternatif gerilmeler S-N eğrisinin Dayanım Limitinin altında olduğu için sonsuz ömre sahiptir. Yani hasara neden olmadan sonsuz sayıda çevrim uygulanabilir. (Blog DTA, 2020)

1. Alaşım 4140 (42CrMo4).



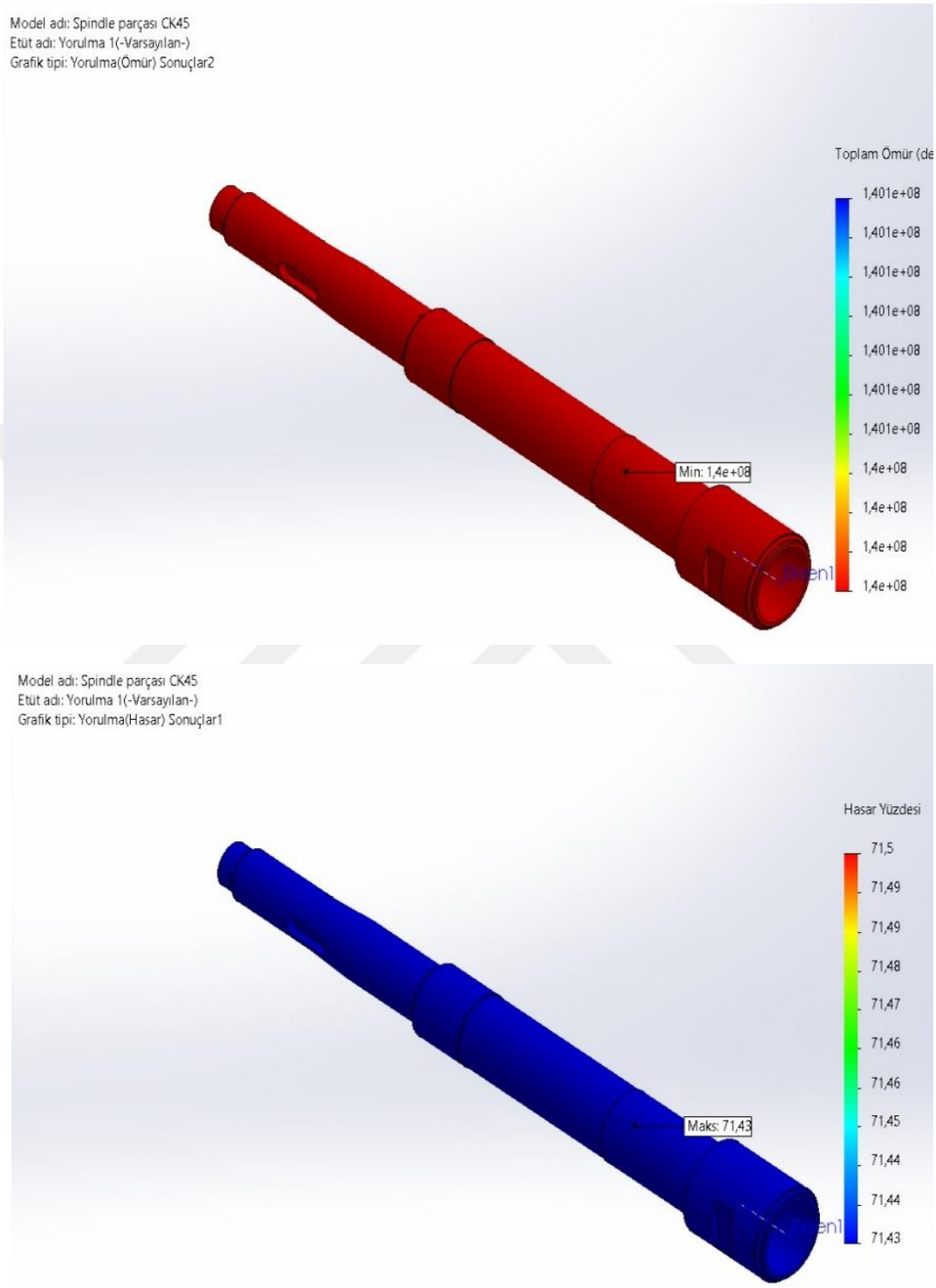
Şekil 4.10: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için yorulma analiz sonuçları.

2. 20MnCr5.



Şekil 4.11: 20MnCr5 malzemesi için yorulma analiz sonuçları.

3. Ck45 çeliği.



Şekil 4.12: C45 malzemesi için yorulma analiz sonuçları.

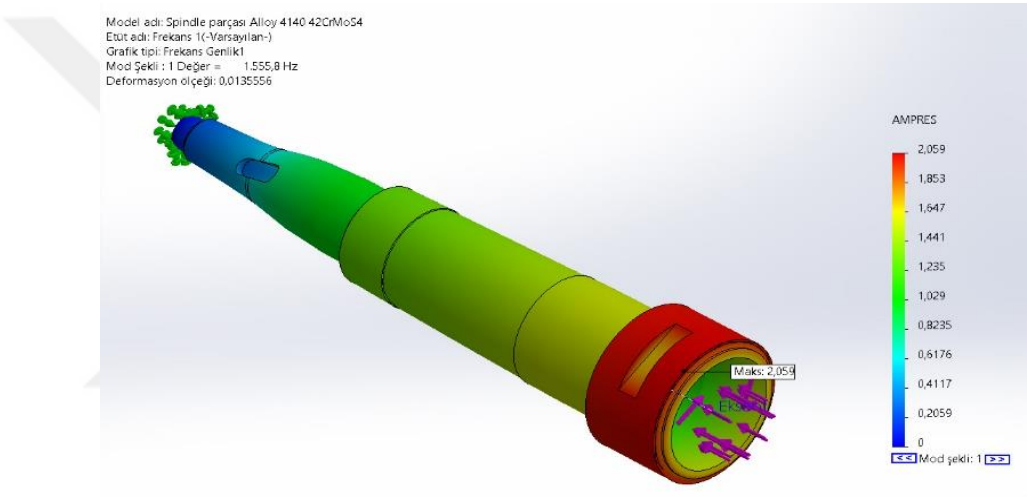
4.3. Modal Analiz

Modal analiz, sistemin doğal frekanslarından tasarımın güvenli olup olmadığını kontrol etmek için kullanılır. Kullanılan üç malzemenin modal sonuçları şu şekilde sıralanabilir:

1. Alaşım 4140 (42CrMo4).

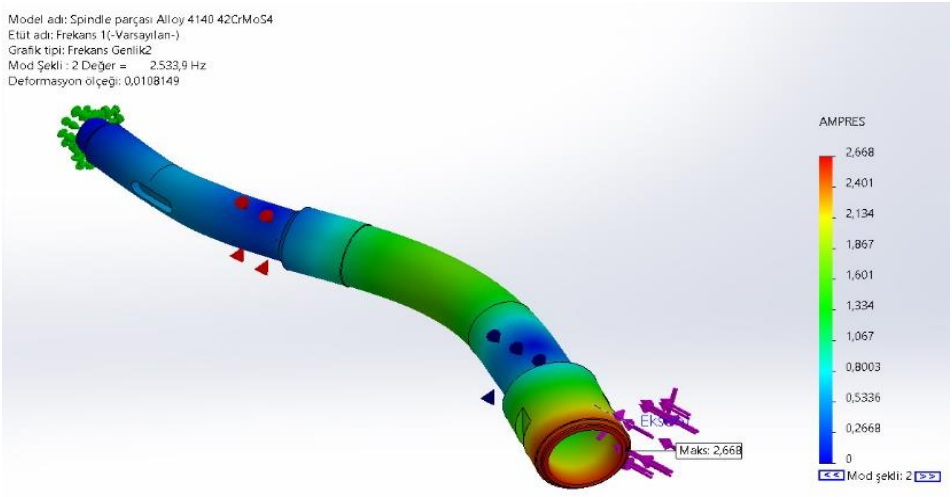
Alaşım 4140 malzemesi için ilk 5 modun frekansları Hz olarak sırasıyla 1555.8, 2533.9, 2541.5, 5926.5 ve 5963.6 bulundu. Bu modlara karşı gelen biçimler Şekil 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17'de gösterilmiştir.

Birinci mod: 1555.8 Hz.



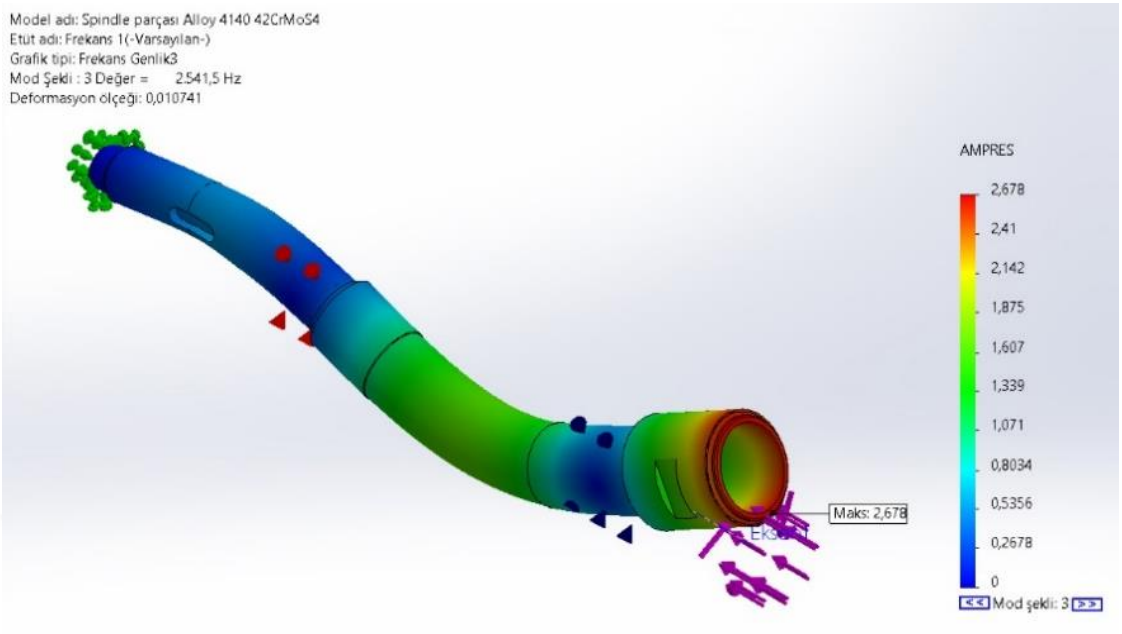
Şekil 4.13: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 1555.8 Hz. mod şekli.

İkinci mod: 2533.9 Hz.



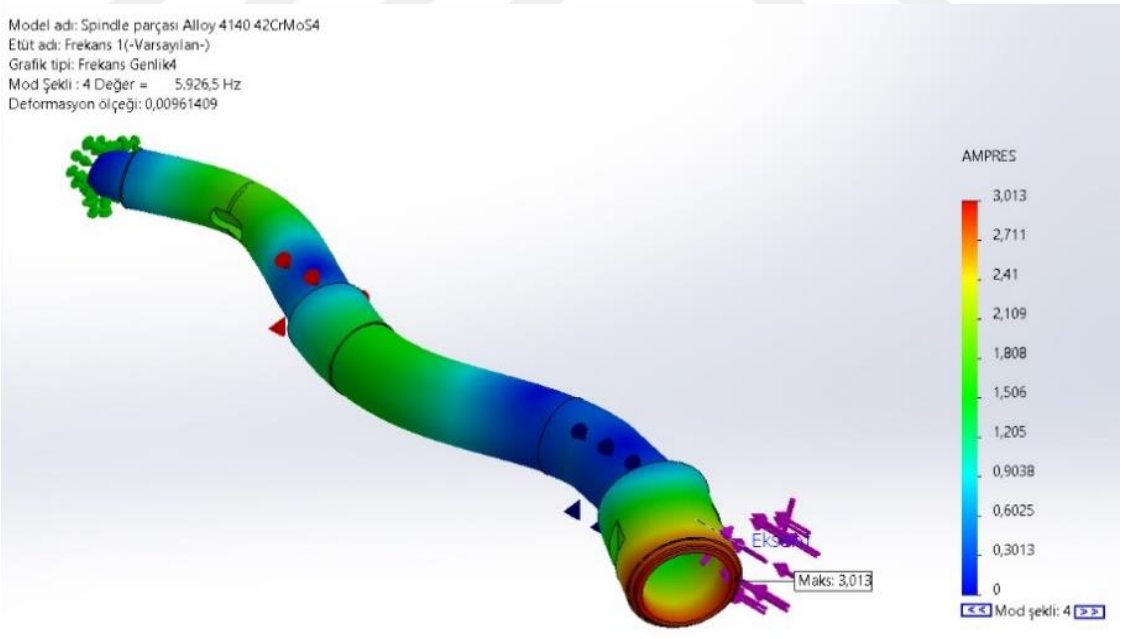
Şekil 4.14: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 2533.9 Hz. mod şekli.

Üçüncü mod: 2541.5 Hz.



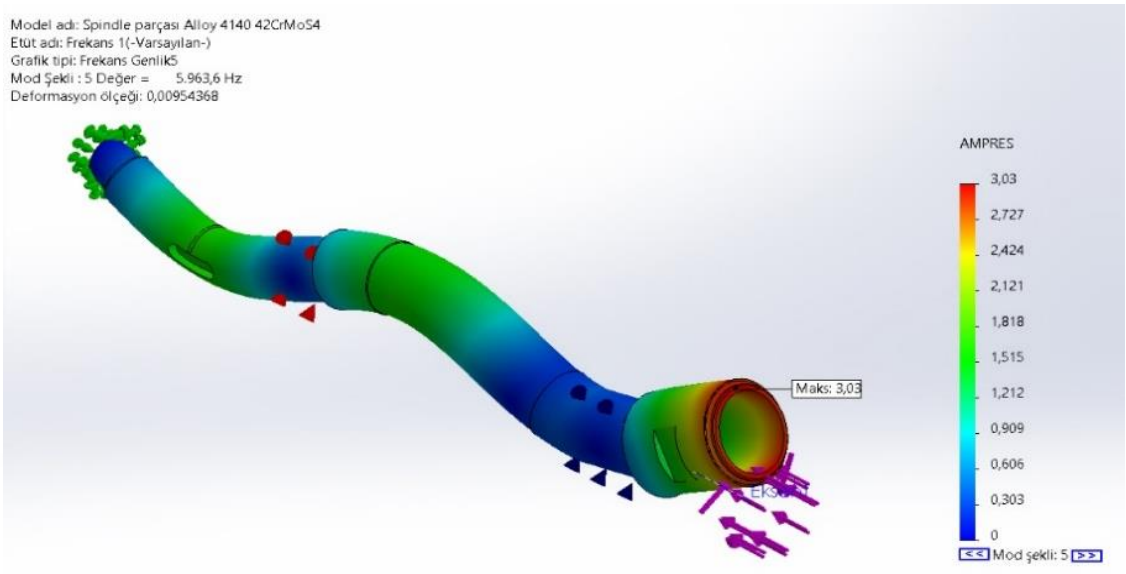
Şekil 4.15: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 2541.5 Hz. mod şekli.

Dördüncü mod: 5926.5 Hz.



Şekil 4.16: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin Hz. mod şekli.

Beşinci mod: 5963.6 Hz.

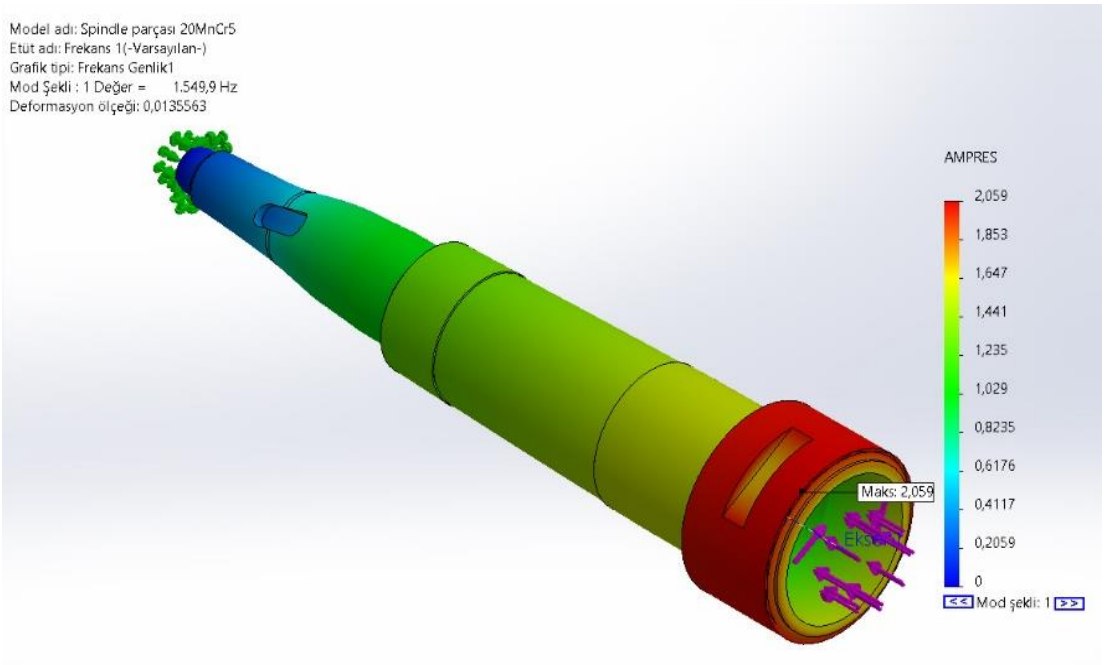


Şekil 4.17: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesinin 5963.6 Hz. mod şekli.

2. 20MnCr5.

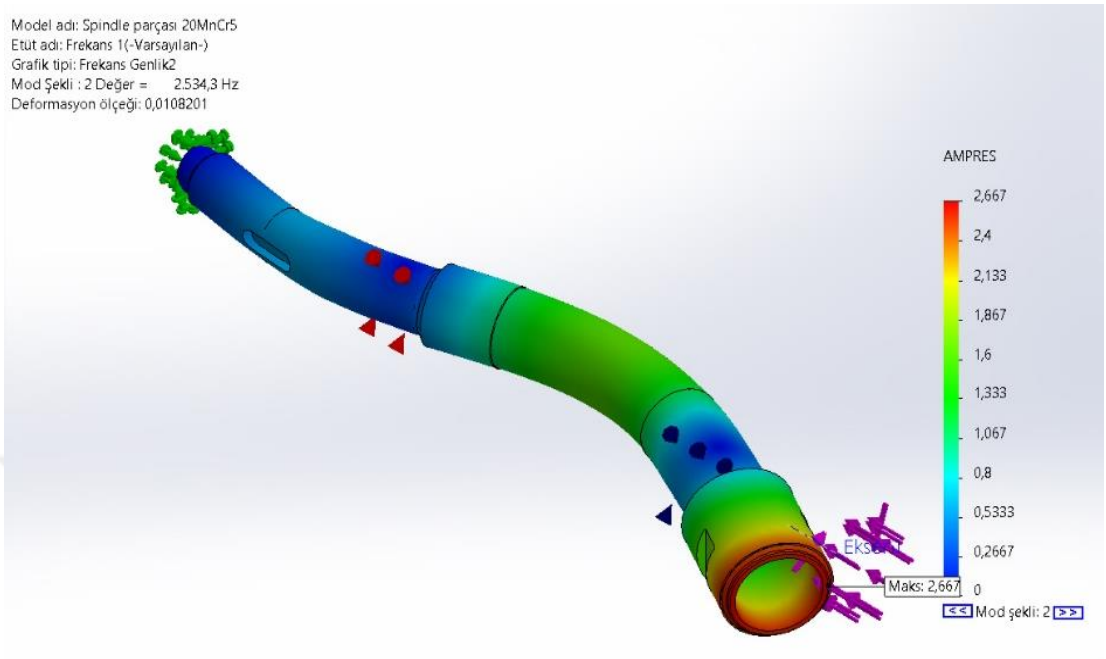
Aynı zamanda 20MnCr5 malzemesi için ilk beş modun frekansları (Hz.) 1549.9, 2534.3, 2541.9, 5927.7 ve 5964.6 bulundu. Bu modlara karşı gelen frekanslar Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4,22'de görseli verilmiştir.

Birinci mod: 1549.9 Hz.



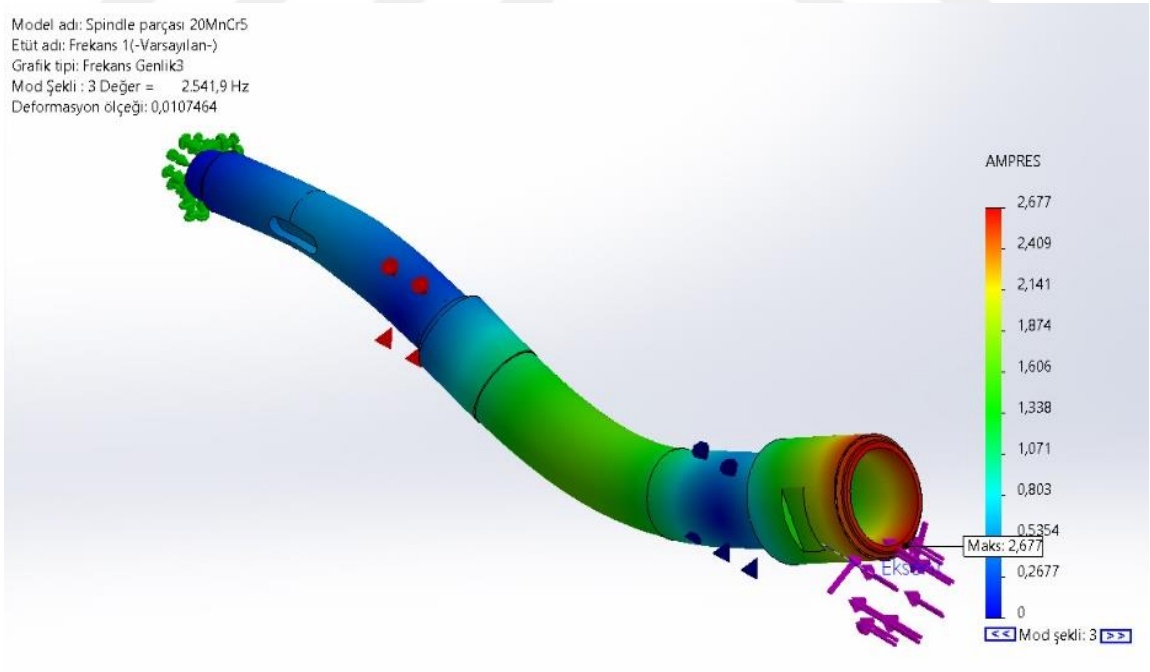
Şekil 4.18: 20MnCr5 malzemesinin 1549.9 Hz. mod şekli.

İkinci mod: 2534.3 Hz.



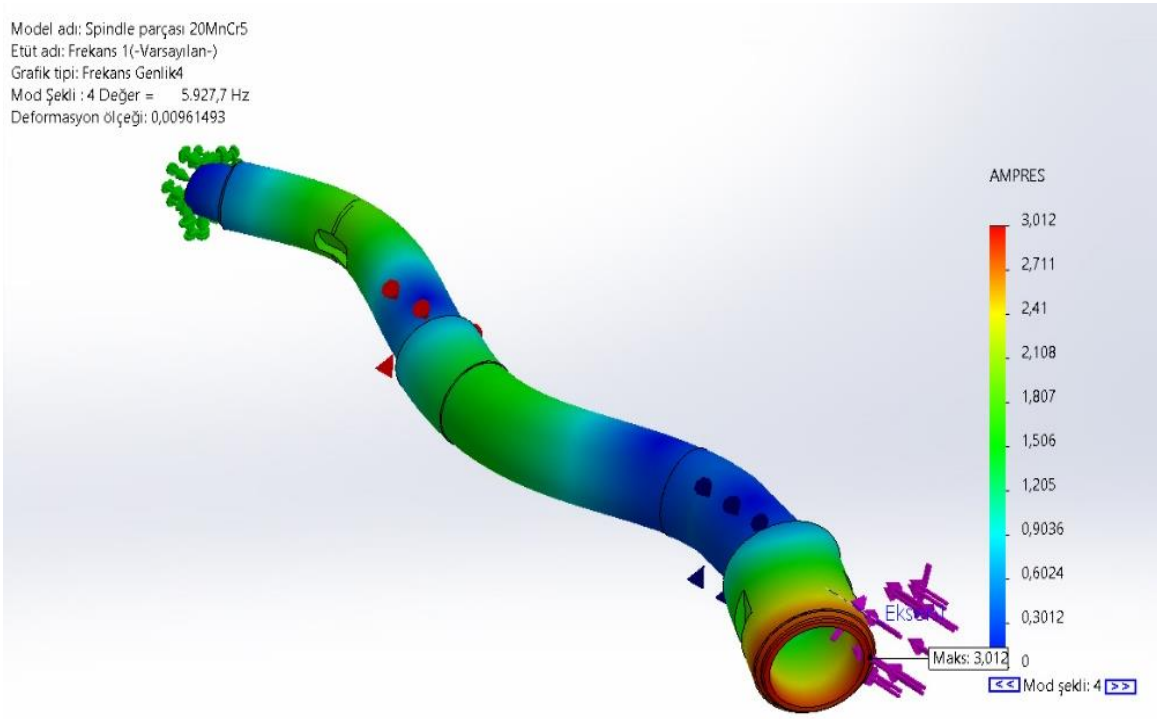
Şekil 4.19: 20MnCr5 malzemesinin 2534.3 Hz. mod şekli.

Üçüncü mod: 2541.9 Hz.



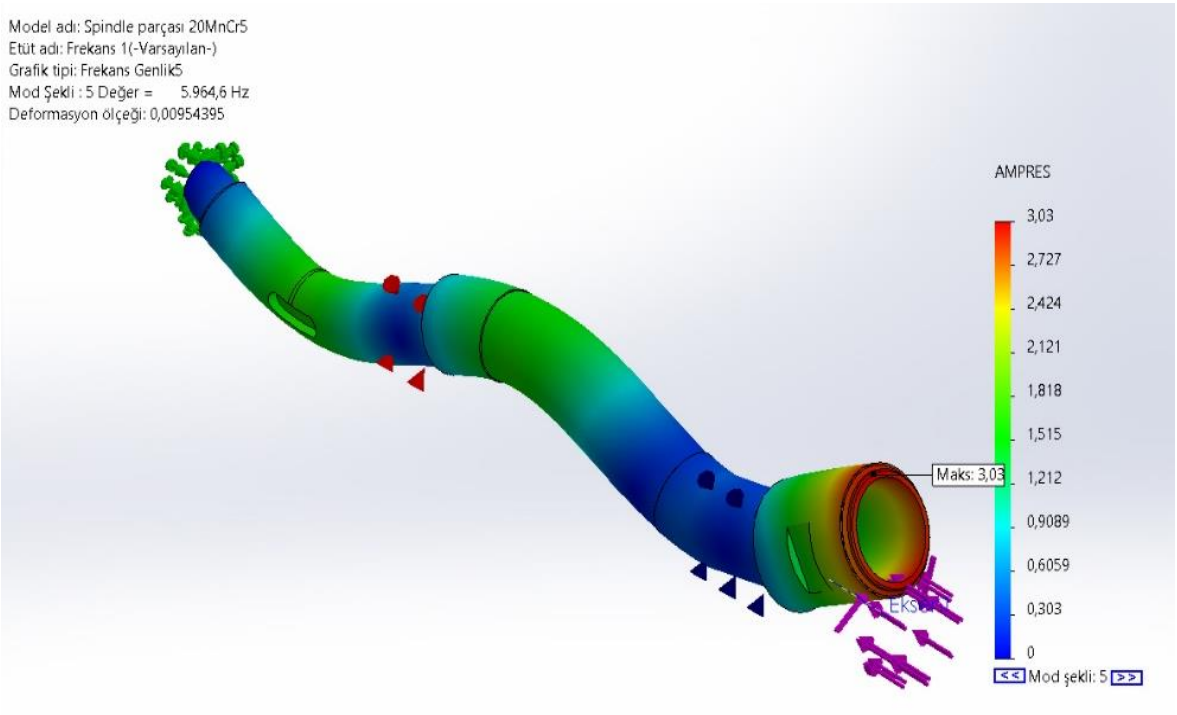
Şekil 4.20: 20MnCr5 malzemesinin 2541.9 Hz. mod şekli.

Dördüncü mod: 5927.7 Hz.



Şekil 4.21: 20MnCr5 malzemesinin 5927.7 Hz. mod şekli.

Beşinci mod: 5964.6 Hz.

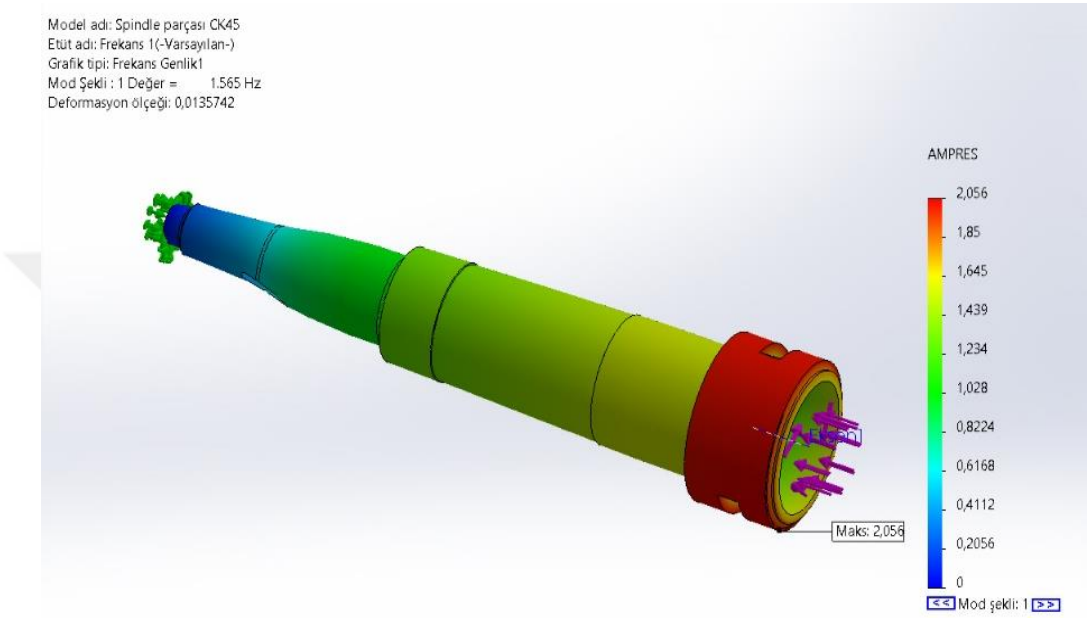


Şekil 4.22: 20MnCr5 malzemesinin 5964.6 Hz. mod şekli.

3. Ck45 çeliği.

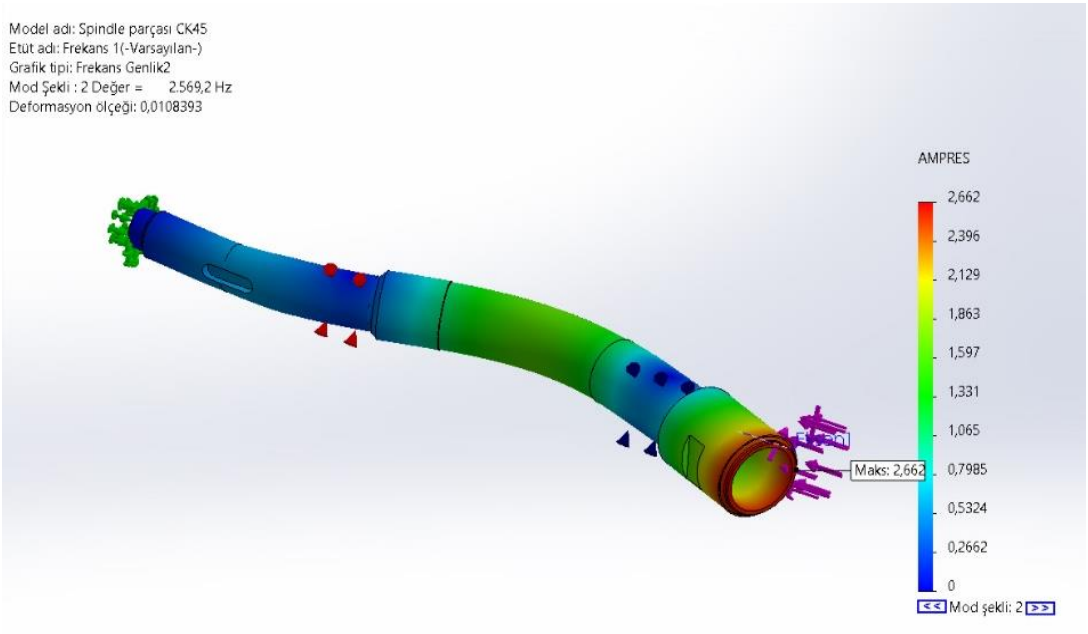
Son olarak Ck45 çeliği malzemesinin ilk beş modun frekansları (Hz.) 1565, 2569.2, 2576.8, 6009.7 ve 6046.8 bulunmuştur. Bu modlara karşı gelen frekanslar aşağıdaki Şekil 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4,27'de gösterilmiştir.

Birinci mod: 1565 Hz.



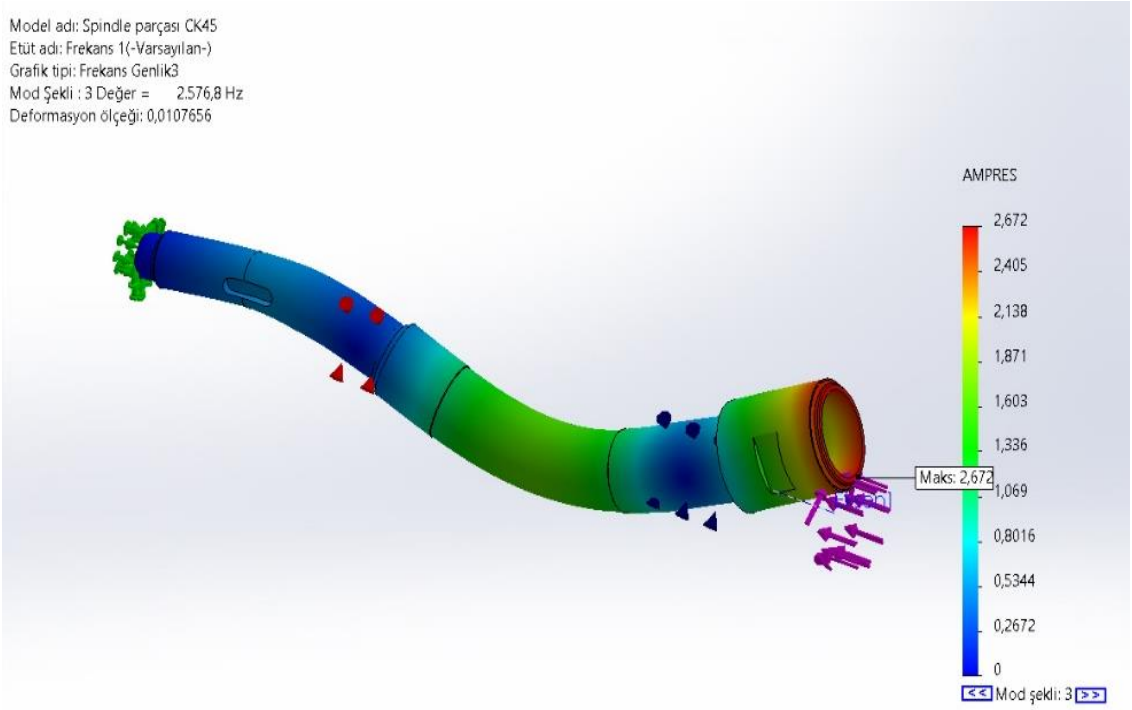
Şekil 4.23: Ck45 çeliği malzemesinin 1565 Hz. mod şekli.

İkinci mod: 2569.2 Hz.



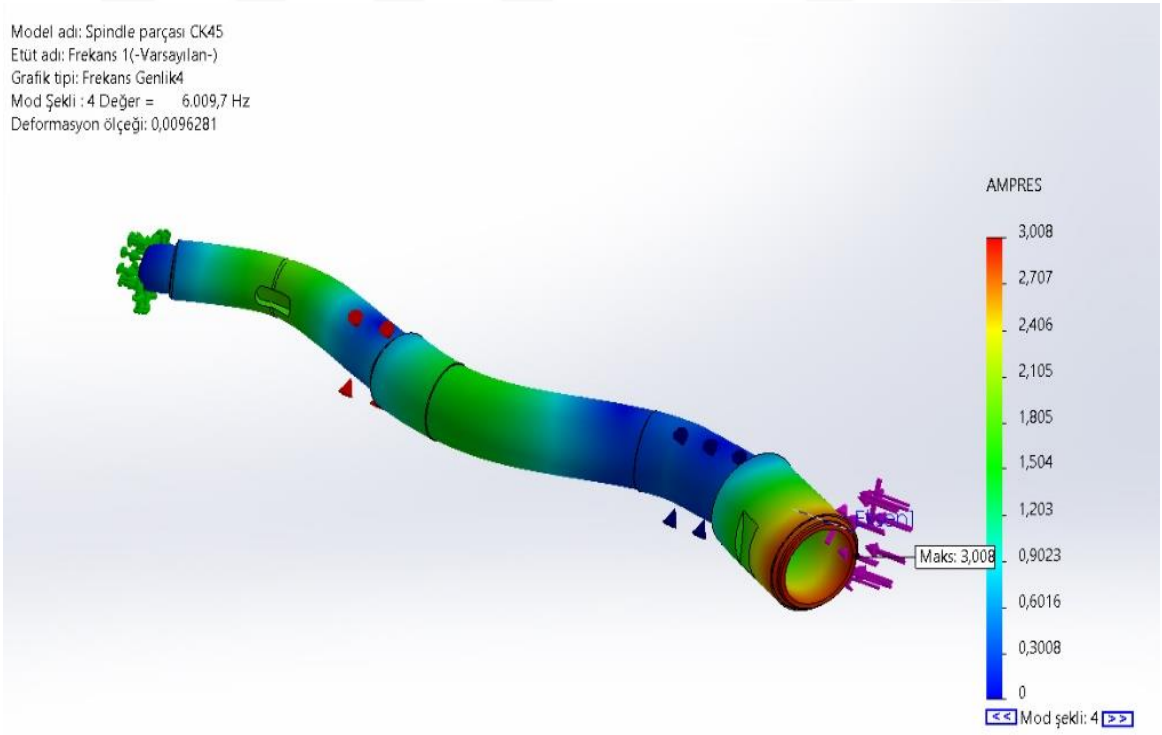
Şekil 4.24: Ck45 çeliği malzemesinin 2569.2 Hz. mod şekli.

Üçüncü mod: 2576.8 Hz.



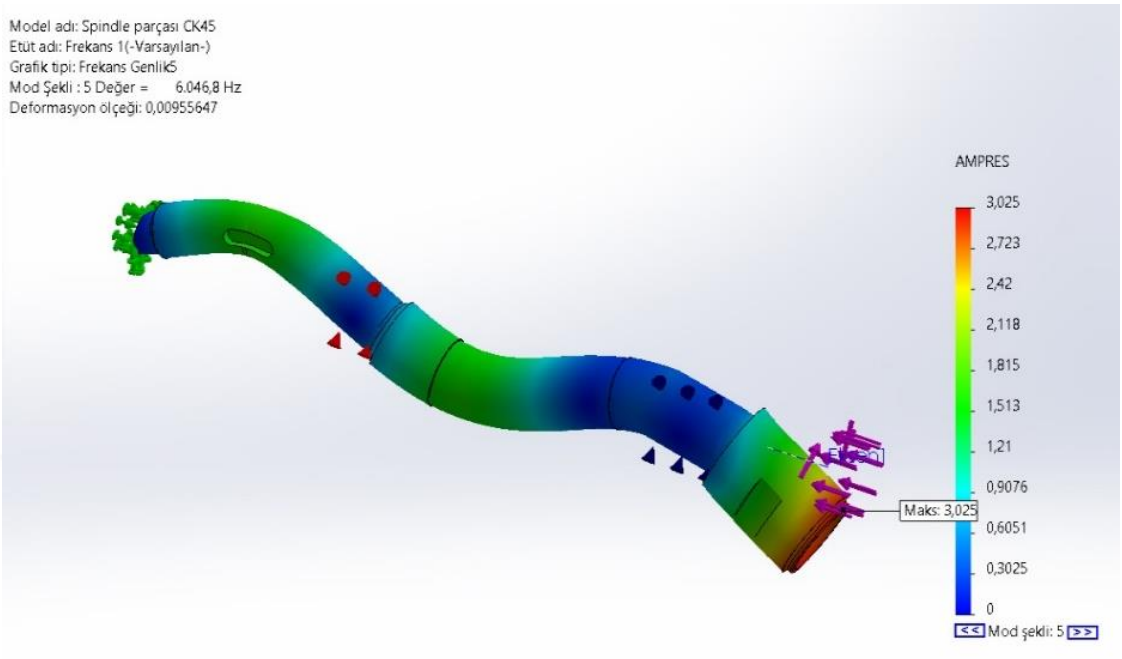
Şekil 4.25: Ck45 çeliği malzemesinin 2576.8 Hz. mod şekli.

Dördüncü mod: 6009.7 Hz.



Şekil 4.26: Ck45 çeliği malzemesinin 6009.7 Hz. mod şekli.

Beşinci mod: 6046.8 Hz.



Şekil 4.27: Ck45 çeliği malzemesinin 6046.8 Hz. mod şekli.

Analiz sonuçlarına baktığımızda kullanılan üç malzemede oluşan 1. ve 2. doğal frekansları ile AİM devir hızı (8400 dev/dk) arasındaki fark çok yüksek olduğu için rezonans söz konusu değildir. Burada rezonans olmaması AİM'nin hasara maruz kalmaması ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi demektir.

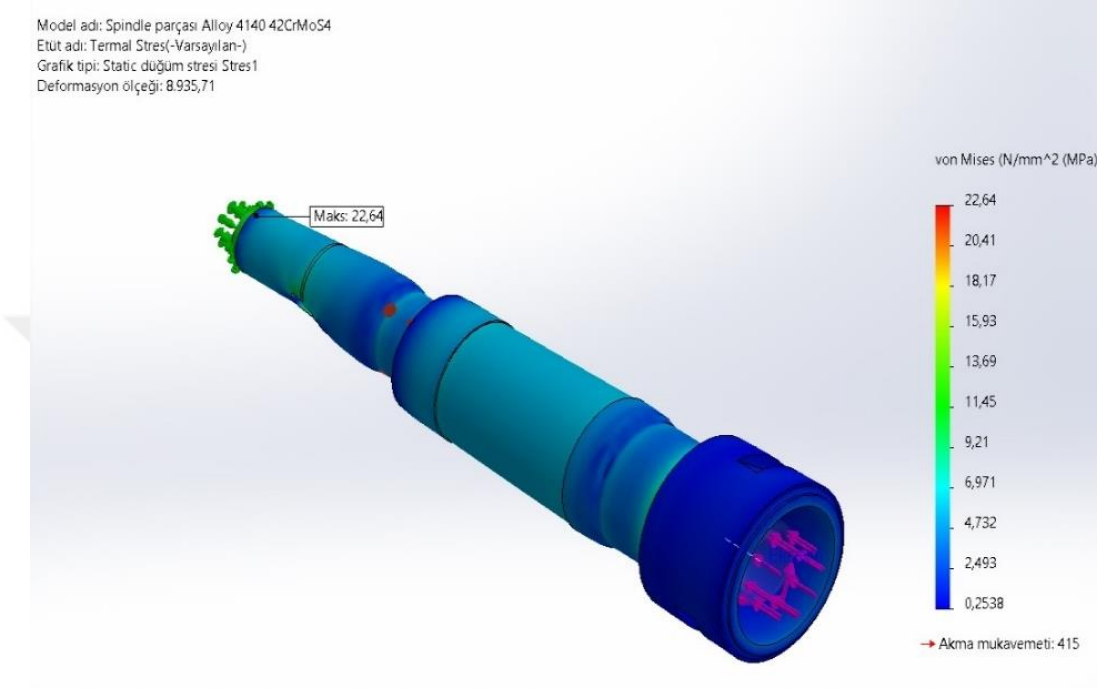
4. 4. Termal Analiz

AİM döndüğünde sürtünme nedeniyle ön ve arka yataklarda ısı akışı meydana gelir ve daha sonra ısı, iş mili kafasına ve takım başlığına iletilir. Sonuç olarak sıcaklık artışı nedeniyle AİM'nde termal gerinimler meydana gelir. Sıcaklık arttıkça ciddi şekilde rulman aşınmasına, ömrünün kısalmasına ve AİM'nin hassasiyeti üzerinde olumsuz etkilenmesine sebep olur. Bu nedenle rulmanın sıcaklık artışına dikkat etmek önemlidir (Vinoth & Murugan, 2016).

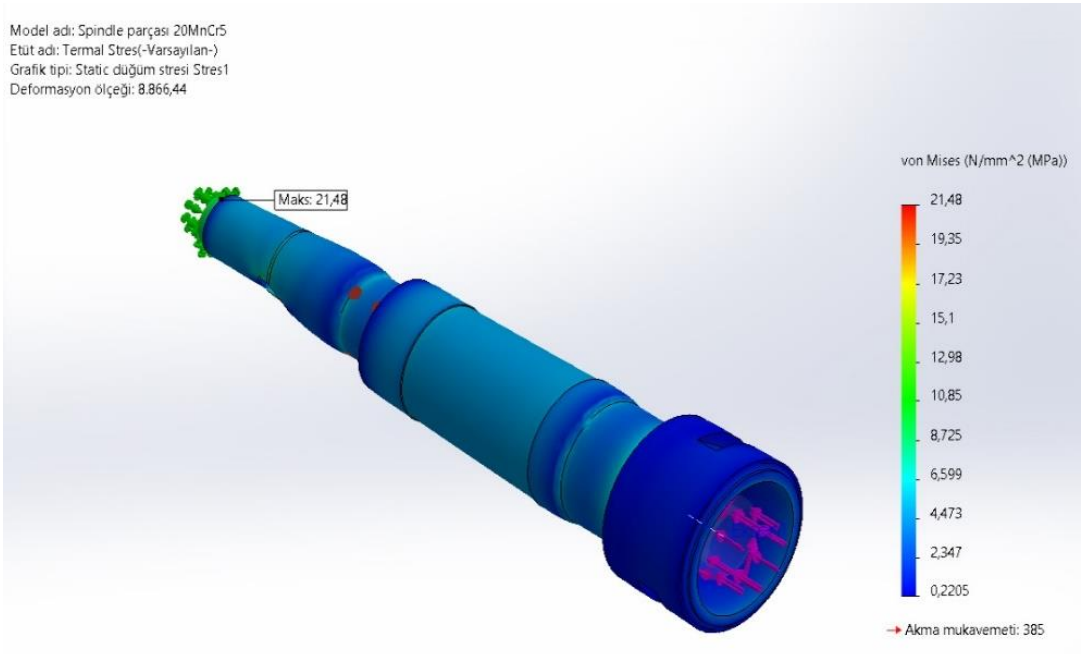
AİM'nin çalışma sıcaklığı 25 °C, mil ve çevre arasındaki taşınım ısı transfer katsayısı 250 ~ 260W / (m2 ·K) olarak ayarlanır. Kullanılan her malzeme için ısıl değerleri girilir. Analizlerden çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir.

4.4.1. Termal Gerilme Sonuçları

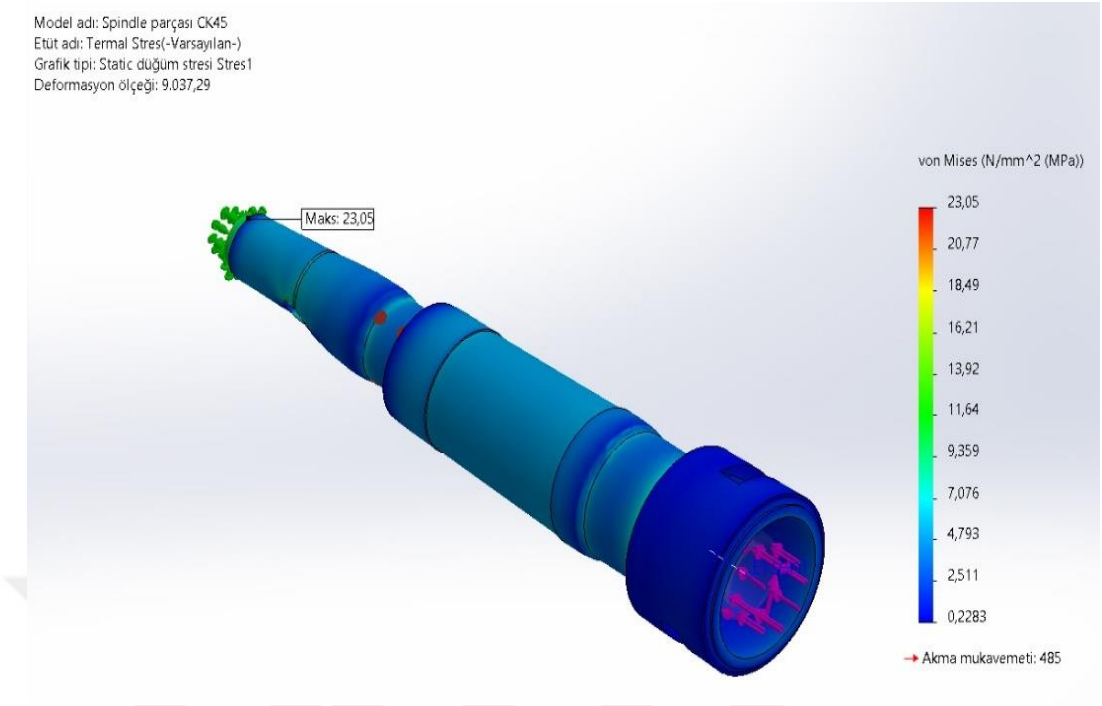
Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da görüldüğü gibi kullanılan malzemelerin akma mukavemetleri oluşan maksimum eşdeğer gerilme değerinden çok büyüktür. Bu nedenle sıcaklık etkisi altında model çok dayanıklıdır.



Şekil 4.28: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları.



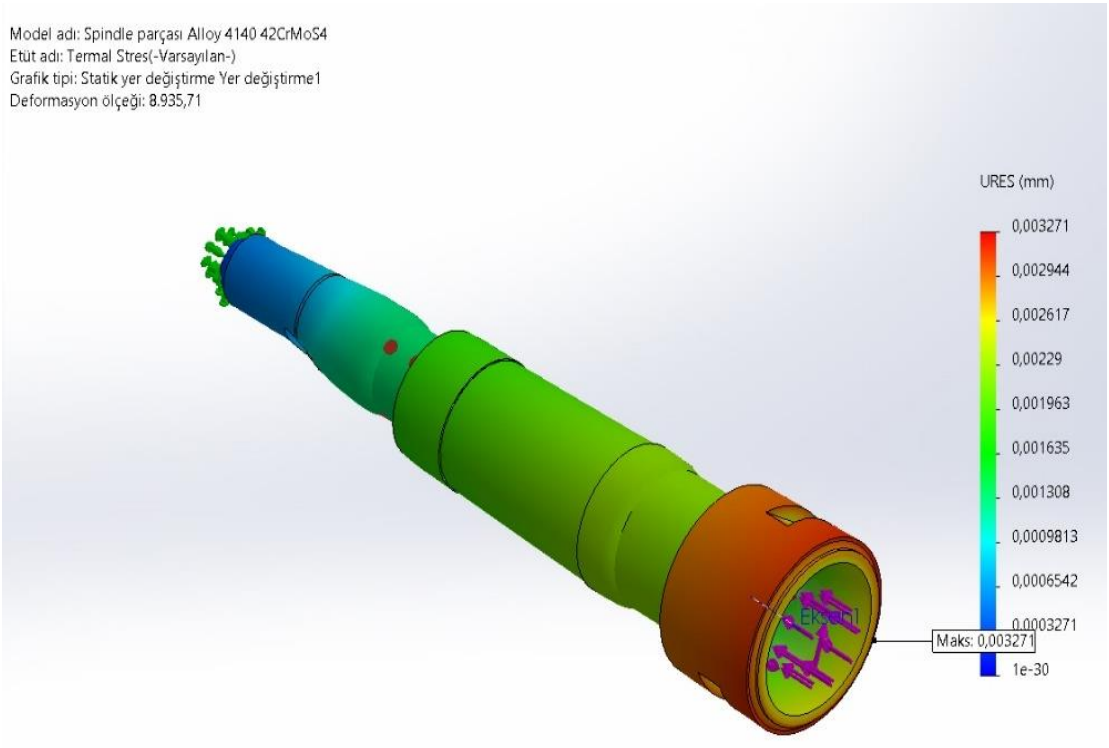
Şekil 4.29: 20MnCr5 malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları.



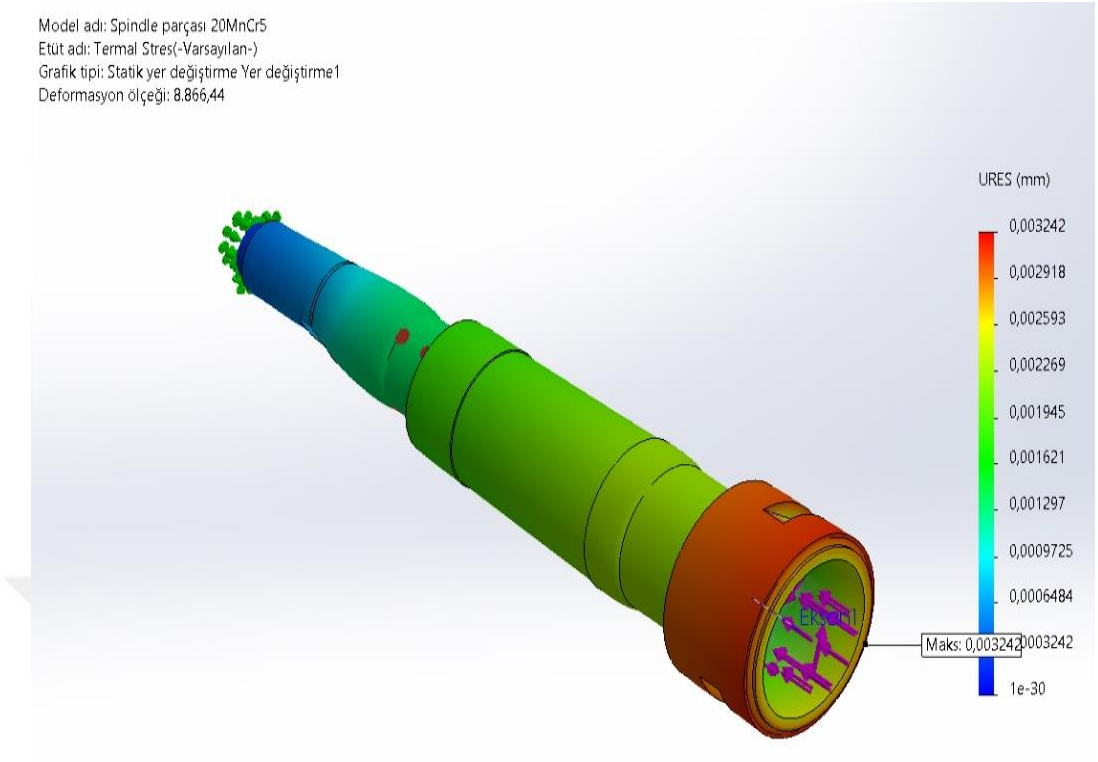
Şekil 4.30: Ck45 çeliği malzemesi için termal gerilme analiz sonuçları.

4.4.2. Termal Yerdeğiştirme Sonuçları

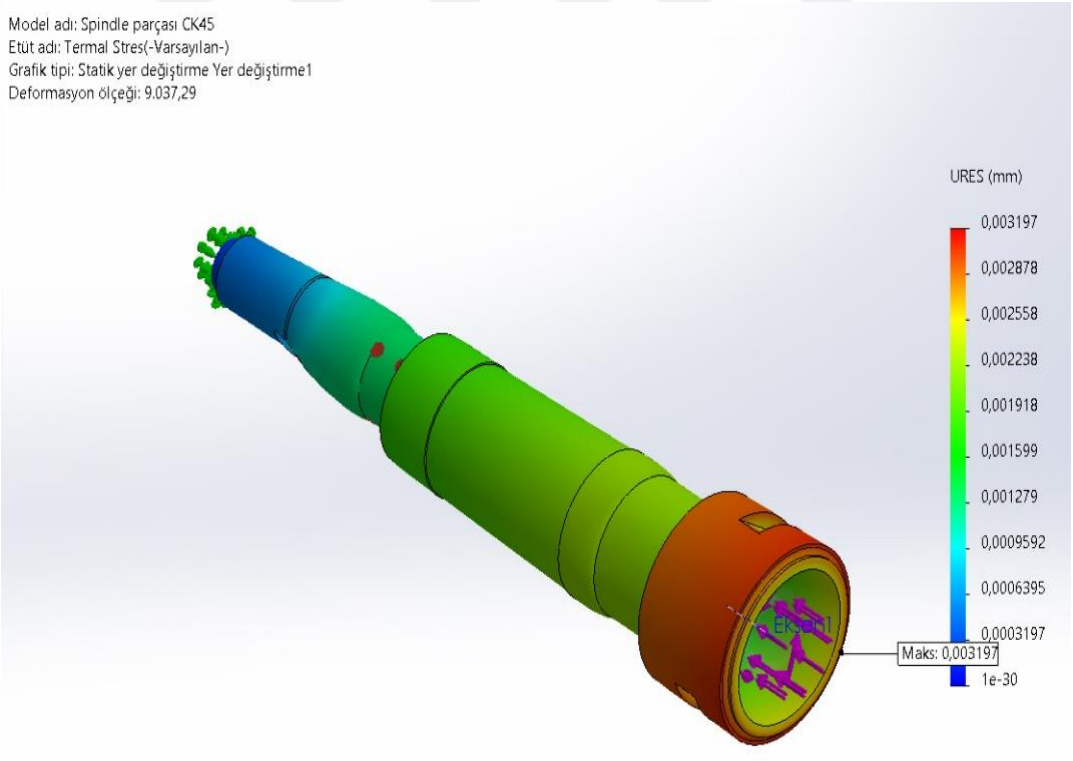
Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'te görsellere bakarsak maksimum termal yer değiştirme değeri küçüktür. Bu nedenle AİM'nin hassasiyetini etkilemez.



Şekil 4.31: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları.



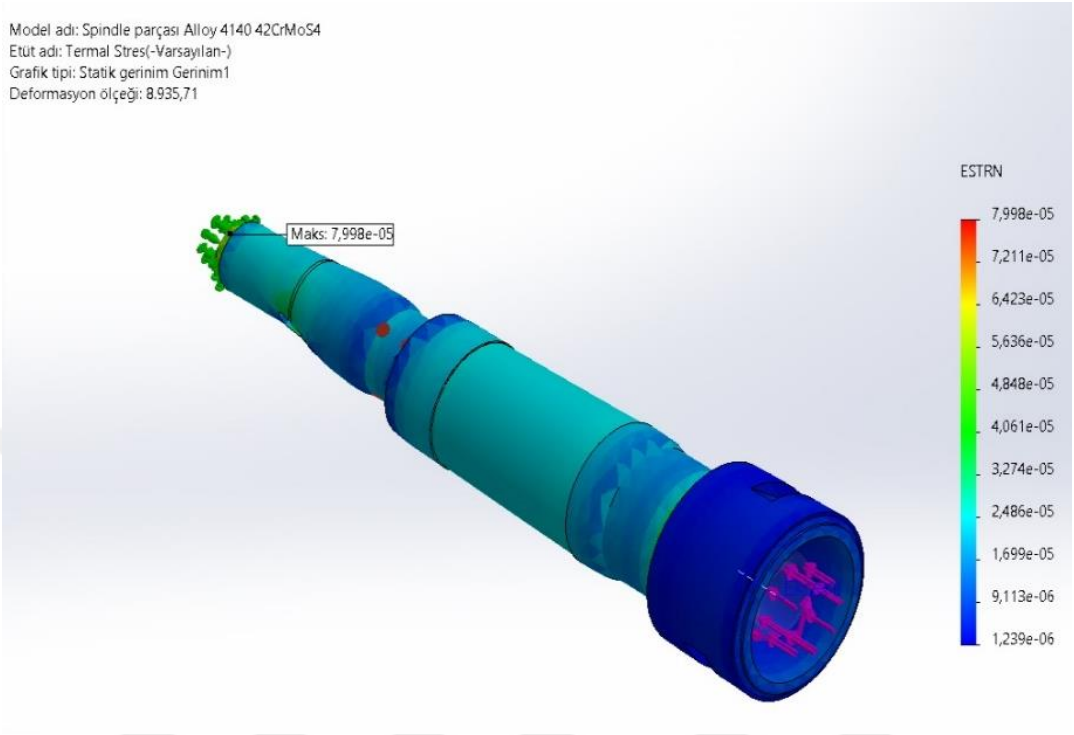
Şekil 4.32: 20MnCr5 malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları.



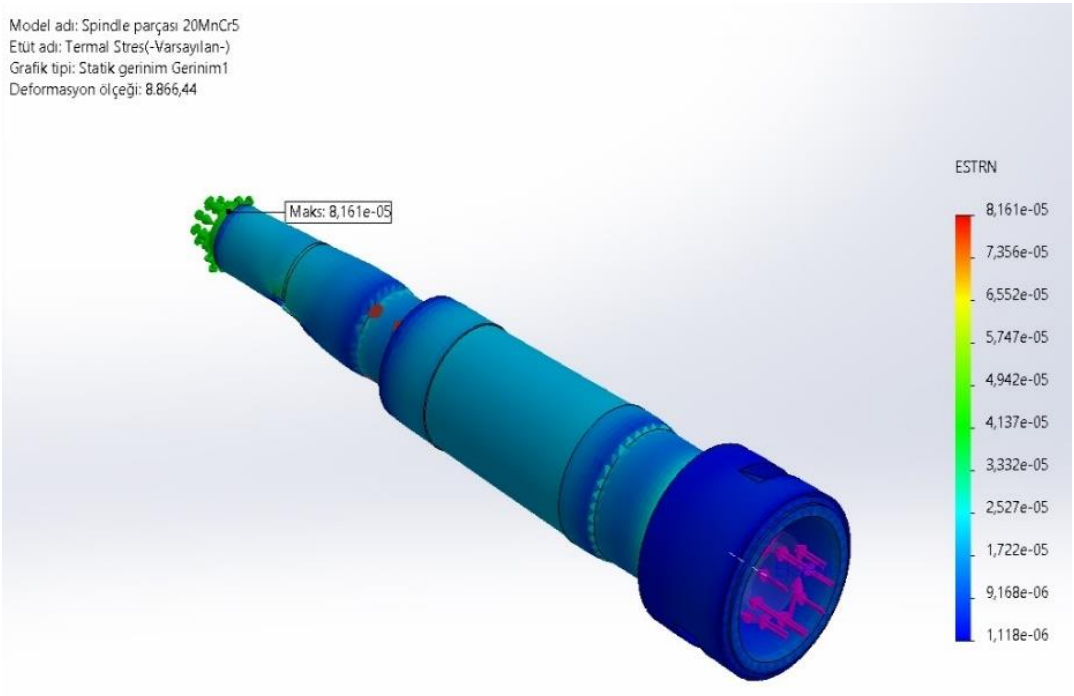
Şekil 4.33: Ck45 çeliği malzemesi için termal yer değiştirme sonuçları.

4.4.3. Termal Gerinim Sonuçları

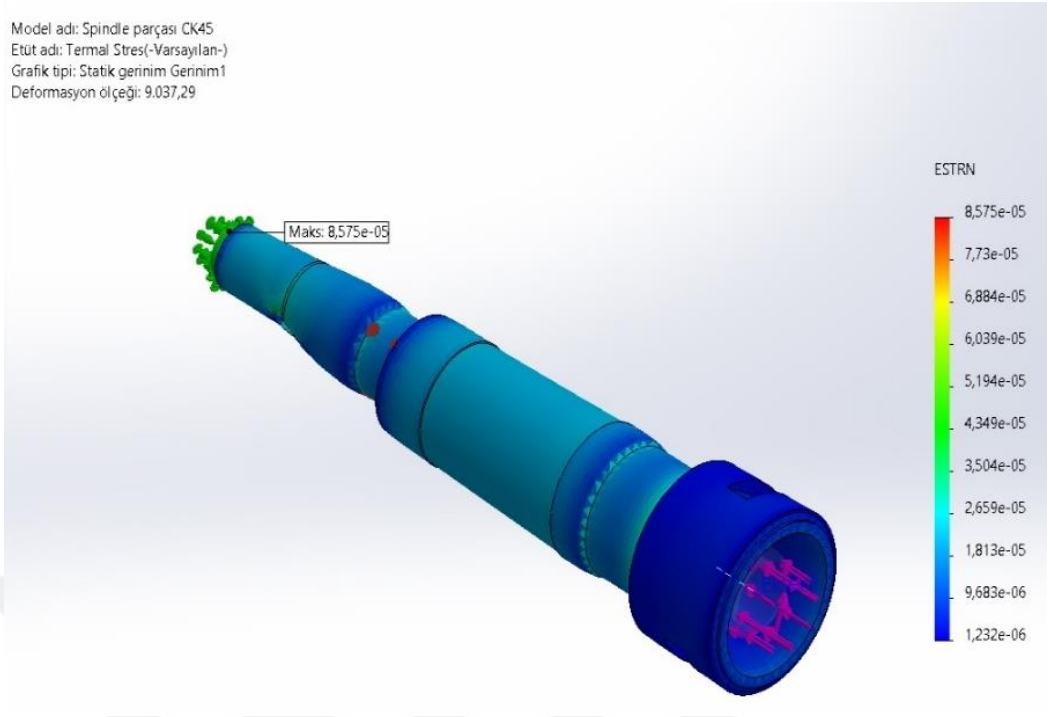
Gerinim sonuçları Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.34: Alaşım 4140 (42CrMo4) malzemesi için termal gerinim değerleri.



Şekil 4.35: 20MnCr5 malzemesi için termal gerinim değerleri.



Şekil 4.36: Ck45 Çeliği malzemesi için termal gerinim değerleri.

Tablo 4.4'te termal gerilme analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.4: AİM'nin termal gerilme sonuçları.

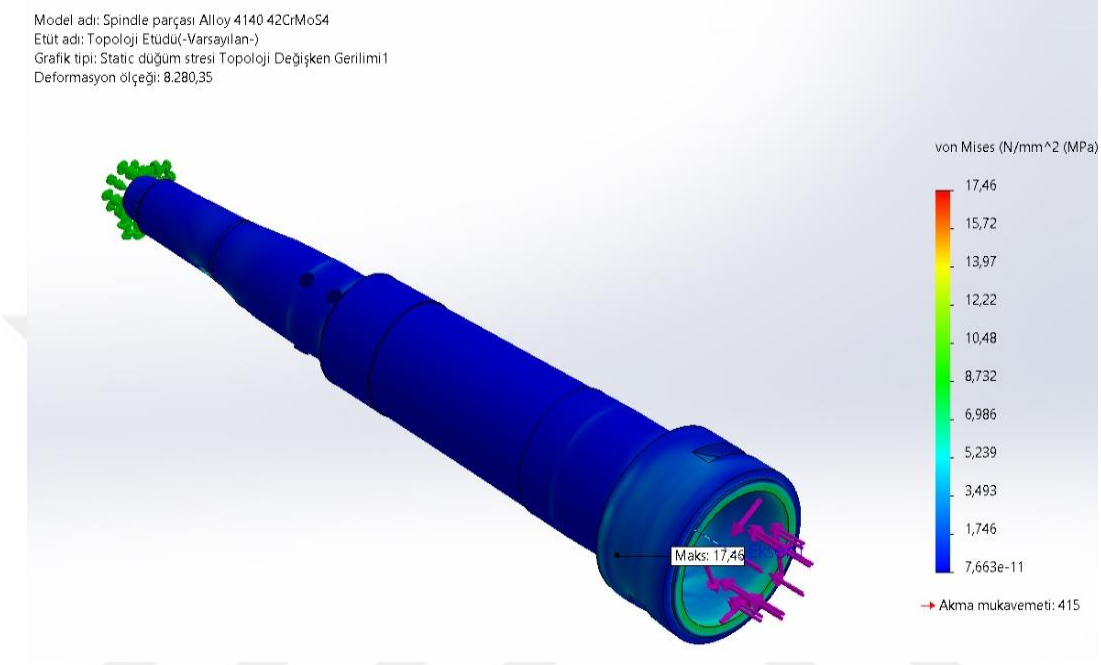
Sonuç Türü	42CrMo4	Ck45	20MnCr5
Maks. Termal Gerilme (MPa))	22.64	23.05	21.48
Maks. Termal Yerdeğiştirme (mm)	0.003271	0.003179	0.003242
Gerinim	7.998×10^{-5}	8.575×10^{-5}	8.161×10^{-5}

4.5. Topoloji Optimizasyonu

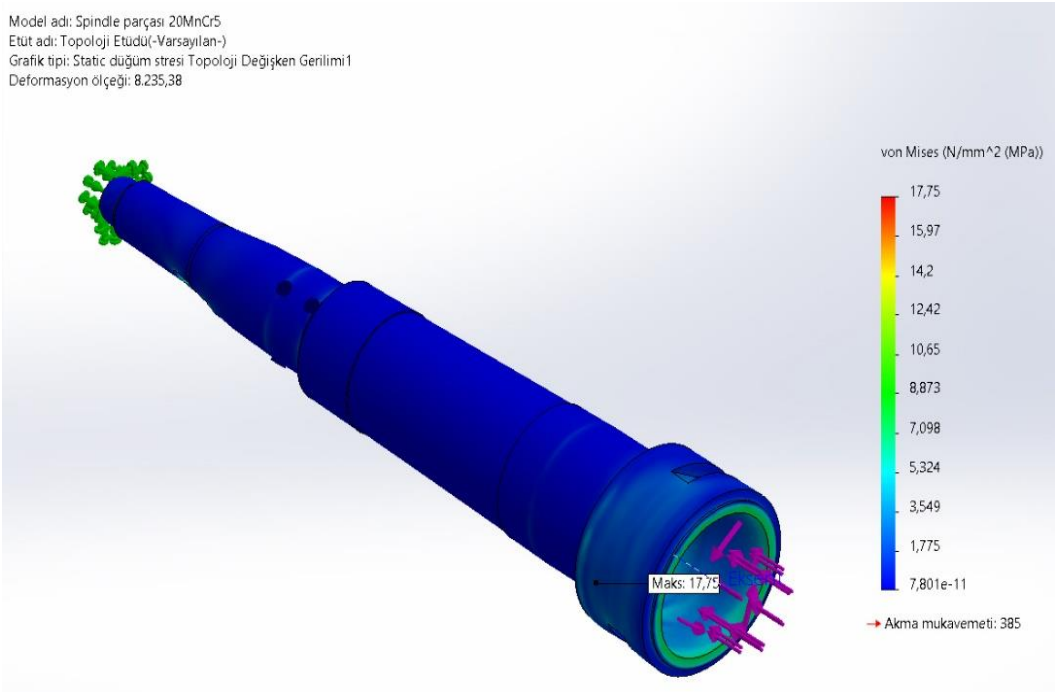
Topolojinin esas mantığı, optimizasyonu yapmak istediğimiz modelin dış boyutlarında bir değişiklik yapılmadan çeşitli bölgelerinden malzeme boşaltarak direngenliğini arttırmaktır (ORAK, 2019). Burada modelin kütlesini %10 azaltarak maksimum yer değiştirmenin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Önceden yapılan statik analiz baz alınarak, topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

4.5.1. Topoloji Optimizasyonu Analizi

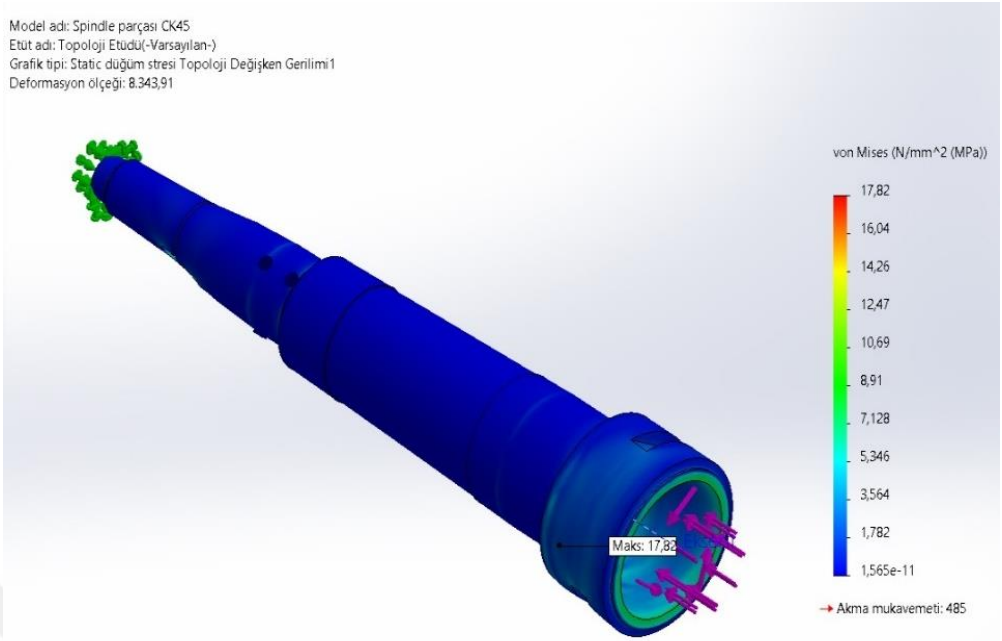
Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39'da görüldüğü gibi Alaşım 4140, 20MnCr5 ve Ck45 Çeliği malzemelerinin maksimum gerilme MPa olarak sırasıyla 5.47, 5.47 ve 5.47 değerlerinden 17.46, 17.75 ve 17.82 değerlerine yükselmiştir.



Şekil 4.37: Alaşım 4140 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri).



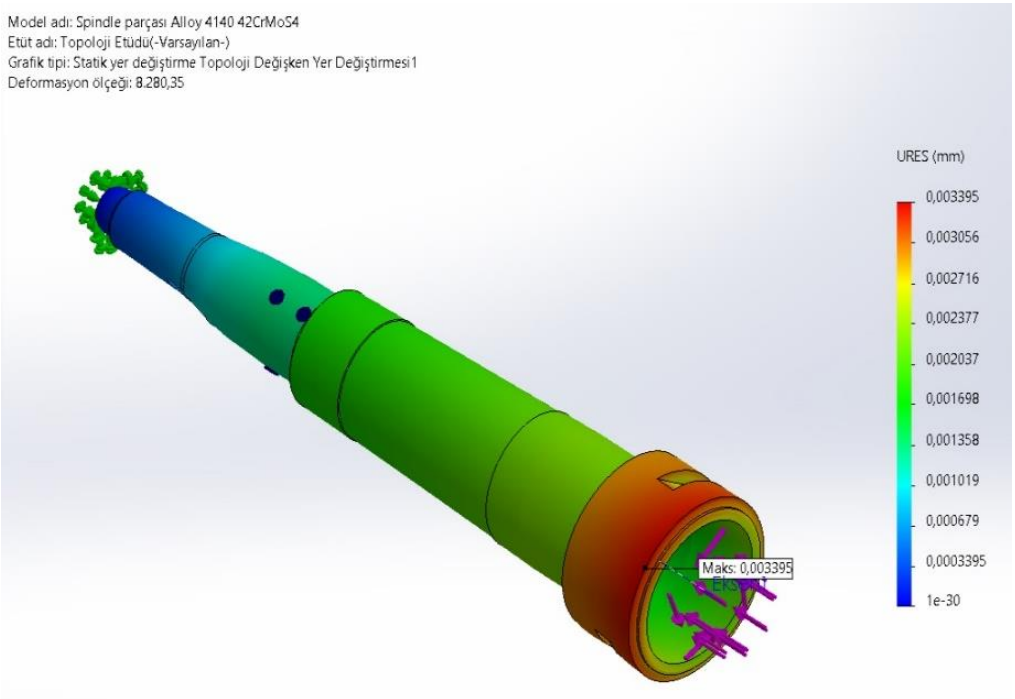
Şekil 4.38: 20MnCr5 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri).



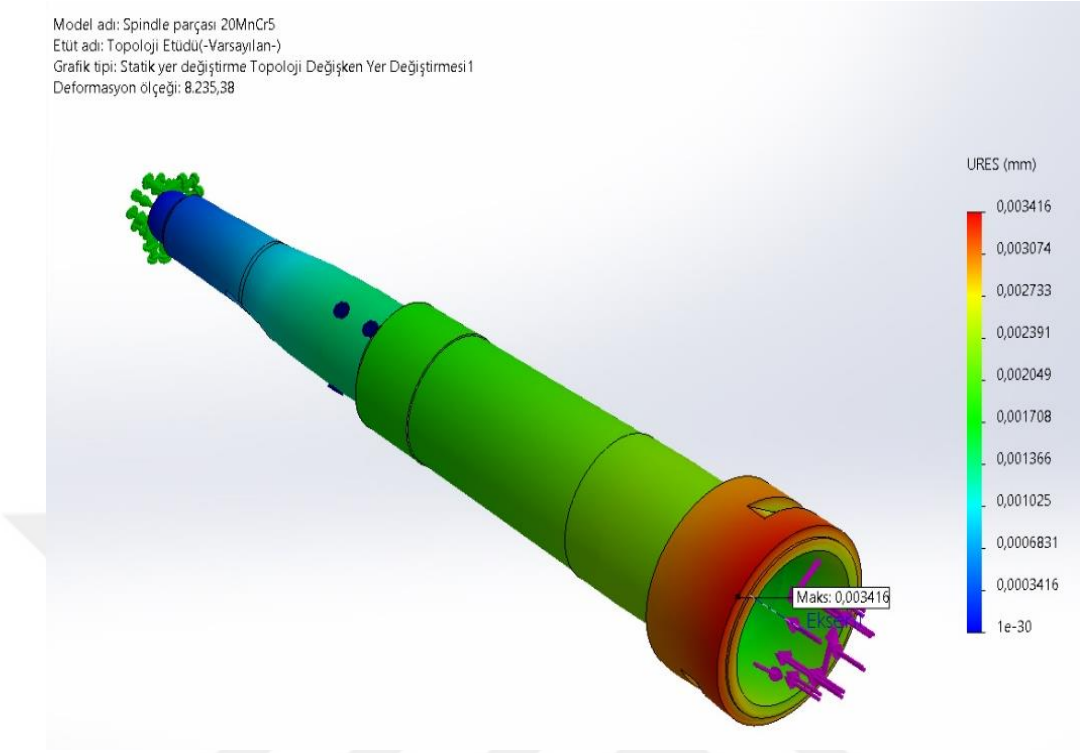
Şekil 4.39: Ck45 çeliği malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (gerilme değeri).

4.5.2. Topoloji Yerdeğiştirme Analizi

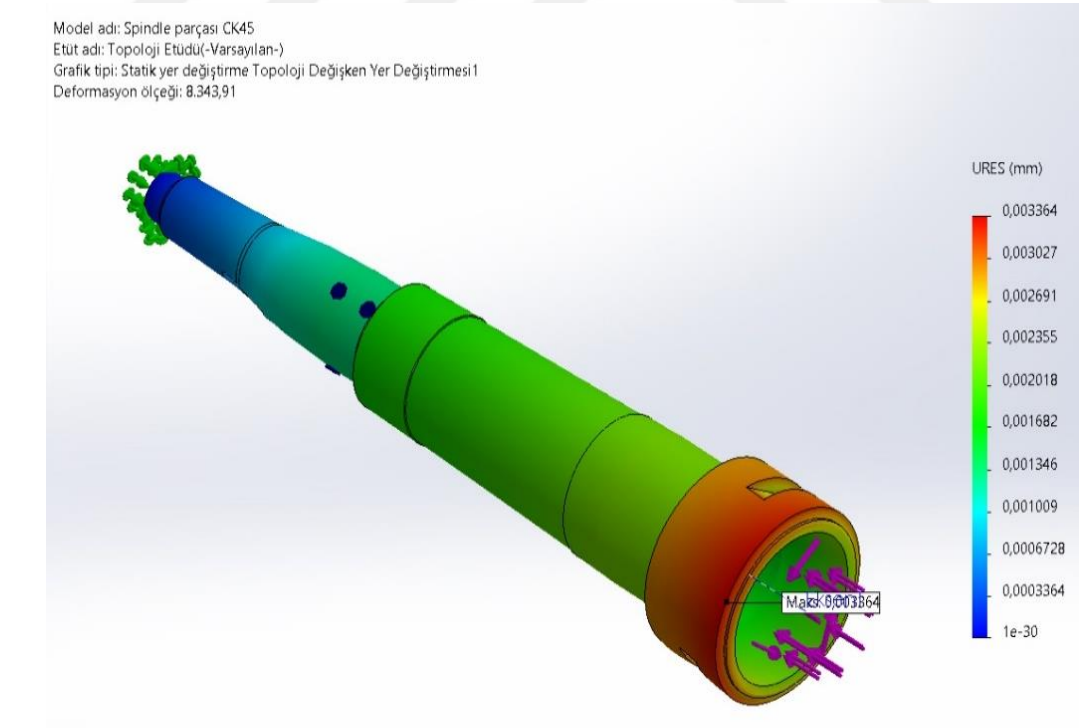
Alaşım 4140, 20MnCr5 ve Ck45 Çeliği malzemeleri için Maksimum yer değiştirme ise sırasıyla 0.003059, 0.003082 ve 0,003015 mm'den 0.003395, 0.003416 ve 0.003364 mm'ye yükselmiştir. Şekil 4.40, 4.41 ve 4.42'de analizlerin sonuç görünümü bulunmaktadır.



Şekil 4.40: Alaşım 4140 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri).



Şekil 4.41: 20MnCr5 malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri).



Şekil 4.42: Ck45 çeliği malzemesi için topoloji optimizasyon analizi (yer değiştirme değeri).

Çıkan yeni değerleri AİM'nin boyutları ile mukayese ettiğimizde ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülebilir. Aynı zamanda bu maksimum yer değiştirme, modele belirlediğimiz yer değiştirmeyi geçmediği için topoloji optimizasyonu emniyetlidir. Tablo 4.3'te topoloji optimizasyon analizinin sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Optimize edilmiş ve edilmemiş tasarımların topoloji analizlerinin sonuçları.

Malzemeler	**Sonuç Türü**	**Optimize Türü**	**Maks. Değer**	**Min. Değer**
42CrMo4	Gerilme (MPa))	Optimize edilmemiş	5.475	0.001534
		Optimize edilmiş	17.46	7.663×10^{-11}
42CrMo4	Yer değiştirme (mm)	Optimize edilmemiş	0.003059	1×10^{-30}
		Optimize edilmiş	0.003395	1×10^{-30}
Ck45	Gerilme (MPa))	Optimize edilmemiş	5.474	0.00148
		Optimize edilmiş	17.82	1.565×10^{-11}
Ck45	Yer değiştirme (mm)	Optimize edilmemiş	0,003015	1×10^{-30}
		Optimize edilmiş	0.003364	1×10^{-30}
20MnCr5	Gerilme (MPa))	Optimize edilmemiş	5.474	0.001506
		Optimize edilmiş	17.75	7.801×10^{-11}
20MnCr5	Yer değiştirme (mm)	Optimize edilmemiş	0.003082	1×10^{-30}
		Optimize edilmiş	0.003416	1×10^{-30}

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

AİM'nin tasarlanması için yalnızca imalat ve fiziksel yasalar bilgisi değil, aynı zamanda bu alanda yeterli bir deneyim gereklidir. AİM'nin gerçek hayattaki çalışması sırasında oluşacak hasar durumlarının önceden iyi tahmin edilmesi gerekir. Analizler 8400 dev/dk hızına sahip AİM için yapılmıştır. Gerilme, yerdeğiştirme, gerinim, termal, topoloji optimizasyonu ve yorulma analizleri SolidWorks Simulation Premium programıyla gerçekleştirilmiştir.

Statik analiz için Tablo 4.3'ten görüldüğü gibi, SEA ve klasik mukavemet yaklaşımından elde edilen sonuçlar benzerdir. Sayısal ve analitik analizlerden elde edilen maks. von Mises değeri kullanılan üç malzemenin akma sınırlarından çok daha küçüktür. Bu nedenle kesme işlemleri sırasında plastik deformasyon beklenmemektedir. Aynı zamanda malzemelerin yer değiştirme değerleri AİM'nin boyutsal hassasiyetini etkilemeyecek kadar küçük ve istenilen 0,003 mm'lik maksimum yer değiştirme kriterini aşmamıştır.
Yorulma analiz sonuçlarına bakıldığında üç malzemenin yorulma ömürlerinin 10 milyon devirden fazla çıkmıştır. Bu da malzemelerin sonsuz ömre sahip olduklarını göstermektedir.

Modal analizlerden, kullanılan tüm malzemeler için elde edilen doğal frekansların, 140Hz 'lik AİM sisteminin doğal frekansından uzakta olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla sistem dinamik açıdan güvenli ve rezonans üretmemektedir.

Sıcaklık etkisi altında AİM'in gerilme, yer değiştirme ve gerinim değerlerini görmek için termal analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre yer değiştirme değerlerinin çok küçük olduğu görülmüştür.

Topoloji optimizasyonu, kullanılmış olan malzemelerin kütlelerini %10 azaltarak maksimum yer değiştirme değerlerini minimuma indirme amacıyla yapılmıştır. Tablo 4.4'teki sonuçlardan, maksimum yer değiştirme değerinin tasarım açısından uygun olduğu görülmüştür.

Kısacası, AİM'nin hem dinamik hem de statik özellikleri, belirtilen hız ve yük koşullarında çalışmak için yeterlidir.

AİM tasarımında en önemli kriter yer değiştirmedir. Bu nedenle AİM tasarımında, işlenecek parçanın boyutsal toleranslarını en az etkileyen Ck45 çeliği seçilmiştir. Çünkü Ck45 çeliğinin yerdeğiştirme değeri, 42CrMo4 ve 20MnCr5 kodlarındaki diğer iki malzemeye göre daha düşük çıkmıştır.

Neticede, Ck45 çelik malzemesinin, düşük maliyeti, iyi mekanik özellikleri, iyi işlenebilirliği ve ısıl işleme iyi yanıt veren bir iş mili malzemesi olarak endüstride neden tercih edildiği bu kapsamlı tez çalışmasıyla tekrar ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Damodar, A., Kondayya, D. and Prasad, B. (2013) 'Static and Dynamic Analysis of Spindle of a CNC Machining Centre', *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, 2(5), pp. 165–170. Available at: http://www.iaset.us/view_archives.php?year=2013.

Dong, Y., Zhou, Z. and Liu, M. (2017) 'Bearing preload optimization for machine tool spindle by the influencing multiple parameters on the bearing performance', *Advances in Mechanical Engineering*, 9(2) 1–9. doi: 10.1177/1687814016689040.

Lv, J. *ve diğ.* (2017) 'An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools', *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 794–803. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.045.

Cao, Y. and Altintas, Y. (2007) 'Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.006.

Abele, E., Altintas, Y. and Brecher, C. (2010) 'Machine tool spindle units', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2), pp. 781-802. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.002.

Anand, A. and Roy, H. (2018) 'Static and Dynamic Analysis of Lathe Spindle using ANSYS', *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(0973–4562), pp. 6994–7000. Available at: http://www.ripublication.com.

Arali, S. and V.V.Kulkarni (2014) 'Analysis of CNC Lathe Spindle for Maximum CUTTING FORCE CONDITION AND BEARING LIFE', *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering(IJIRAE)*, 1(6), pp. 346–352. Available at: http://ijirae.com.

Blog DTA, 2020, https://blog.dta.com.tr/wohler-sn-egrisi-nedir/ [Ziyaret tarihi: 30 Ekim 2020].

Liu, D. *ve diğ.* (2011) 'Finite element analysis of high-speed motorized spindle based on ANSYS', *Open Mechanical Engineering Journal*, 5(1), pp. 1–10. doi: 10.2174/1874155X01105010001.

DökümTek, 2020, https://www.dokumtek.com/ [Ziyaret tarihi: 31 Ocak 2020].

Dynomax, 2011, "*Book of Spindles, Part I: Spindle Facts*", p. 5.

GÖNÜL, E. (2012) *Büyük Ölçekli Portaldan Haraketli Cnc Kontrollü Freze Tezgâhının Yapısal Tasarımı ve Prototip İmalatı*. YL, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,

Hasçelik, http://www.hascelik.com/tr/katalog.aspx [Ziyaret tarihi: 01 Ağustos 2020].

Hurco, C., 2014. "*CNC Lathe Considerations: bed design*" https://blog.hurco.com/blog/bid/374362/CNC-Lathe-Considerations-bed-design [Ziyaret tarihi: 01 Şubat 2020].

Hyundai WIA Machine Tools, 2015 "*Multi-axis T/C: LM1800 Series*", www.hyundai-wiamachine.com/home/products/multitasking_machines/lm1800-series.html [Ziyaret tarihi: 30 Ocak 2020].

Ima Techno S.R.L.,2015 "*Turning Spindles: CODE 11011A150*", https://www.imatecno.it/it/prodotti/elettromandrini.html [Ziyaret tarihi: 29 Ocak 2020]

Jiang, S. and Zheng, S. (2010) 'Dynamic design of a high-speed motorized spindle-bearing system', *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 132(3), pp. 0345011–0345015. doi: 10.1115/1.4001109.

Kaynak, Y. (2006) *Matkap ile delik delme esnasinda kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve sicakliğin değişimine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. YL, Marmara Üniversitesi.

Kutlu, A. (2016) *Design and development of a lathe spindle*. KTH Royal Institute of Technology.

Orak, H. (2019) *İki Silindirli Bir Alüminyum Motor Bloğunun Termomekanik Analizi*. YL, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa.

Özbey, S., 2015. *Doc Player*. https://docplayer.biz.tr/6670592-Mak-204-uretim-yontemleri.html [Ziyaret tarihi: 11 Temmuz 2020].

Sandvik, 2020. https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/boring.aspx [Ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2020].

Saygı, C., 2015. *docplayer*. https://docplayer.biz.tr/6670802-7-7-delik-delme-7-7-1-delik-delme-islemleri.html [Ziyaret tarihi: 09 Temmuz 2020].

Şekercioğlu, Te., (2017) *Mukavemet hesapları ve malzeme seçimi,* Makine Elemanları Hesap Şekillendirme. 3rd edn. Birsen Yayınevi. Denizli, 34-59.

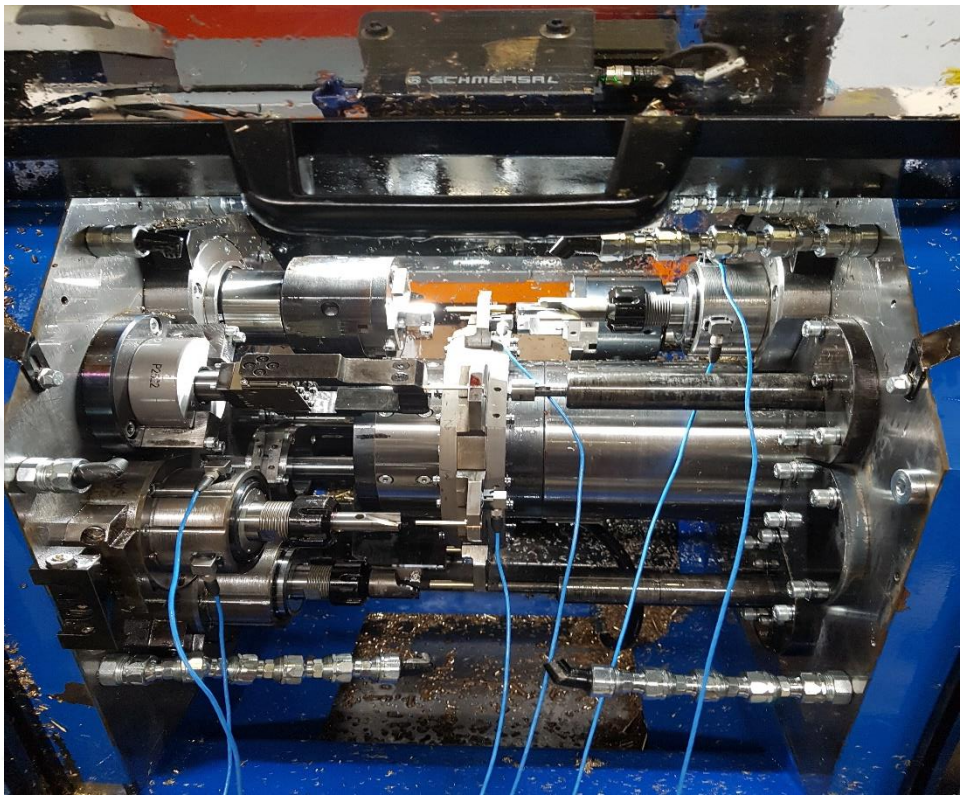
Upase, S. D. and Swami, M. C. (2016) 'Modal Analysis Of High Speed Milling Spindle By Experimental Approach', *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(2), pp. 117–120. doi: 10.9790/1684-130201127130.

Vinoth, S. and Murugan, T. A. (2016) 'Design and Analysis of High Speed Motorized Spindle', *irjet*, 03(04), pp. 2925–2935. Available at: www.irjet.net.

Walter, (*Machining Calculator*) https://www.walter-tools.com/en-gb/pages/default.aspx [Ziyaret tarihi: 07 Temmuz 2020].

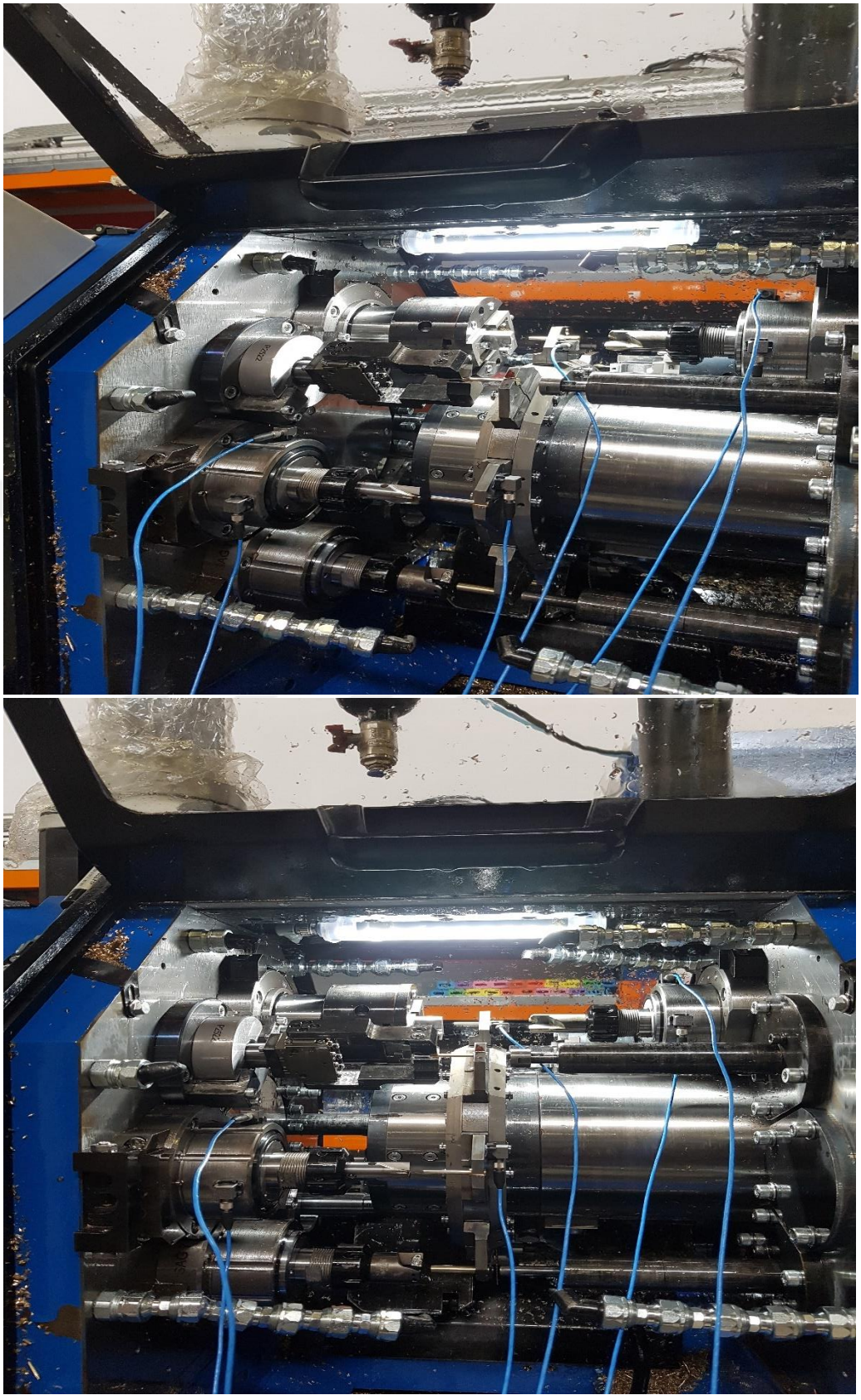
EKLER

TÜBİTAK destiği ile üretilen makine şekil (5.1,a ve b)'de gösterilmektedir.





Şekil 43 a) TÜBİTAK destiği ile üretilen makine gösterimi.



Şekil 44b) TÜBİTAK destiği ile üretilen makine gösterimi.