

**İŞLEME BURULMA YAYININ KATILIĞINA AİT
PARAMETRELERİN SAYISAL VE DENEYSEL
YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

**DETERMINATION OF THE STIFFNESS PARAMETERS
OF MACHINED TORSIONAL SPRINGS BY NUMERICAL
AND EXPERIMENTAL METHODS**

OĞUZ DEMİRTAŞ

DOÇ. DR BARIŞ SABUNCUOĞLU
Tez Danışmanı

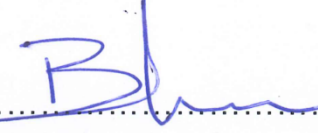
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2019

OĞUZ DEMİRTAŞ'ın hazırladığı “İşleme Burulma Yayının Katılığına Ait Parametrelerin Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Başkan



Doç. Dr. Barış SABUNCUOĞLU

Danışman



Doç. Dr. S. Çağlar BAŞLAMIŞLI

Üye



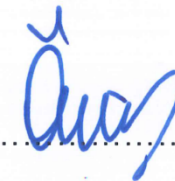
Doç. Dr. Ercan GÜRSES

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Özgür ÜNVER

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Her Zaman Yanımda Olan Aileme,

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak

hazırladığım bu tez çalışmada,

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

beyan ederim.

19 / 06 / 2019


OĞUZ DEMİRTAŞ


YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

19 / 06 / 2019

OĞUZ DEMİRTAŞ

ÖZET

İŞLEME BURULMA YAYININ KATILIĞINA AİT PARAMETRELERİN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Oğuz DEMİRTAŞ

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Barış SABUNCUOĞLU
Mayıs 2019, 121 sayfa

Helisel yaylar, makina tasarımlarında sıklıkla kullanılan mekanik parçalardır. Geleneksel olarak tel malzemenin sarımıyla elde edilirler. Son dönemlerde, geleneksel tipte üretilen yaylara alternatif olarak helisel işleme yaylar geliştirilmiştir. Helisel işleme yaylar, geleneksel tipteki yaylara göre daha yüksek performans, daha yüksek direngenlik veririler. Saf moment davranışı bakımından performansları yüksektir. Kullanılacakları yere uygun bağlantı arayüzü ile bir bütün halinde olmaları nedeniyle karmaşık tasarımları basitleştirme özelliklerine sahiptirler. Havacılık ve Uzay Sanayi, Savunma Sanayi ve Medikal Sektör gibi özel uygulamaların yapıldığı kritik alanlarda sıklıkla kullanılırlar. İşleme yayların son dönemlerde ortaya çıkması nedeniyle, literatürdeki bilgi birikiminin nadir olduğu görülmüştür. Bu noktadan yola çıkarak, helisel işleme yaylarının açısız deplasman altındaki moment yüklerini belirleyebilmek ve yay tasarım parametrelerinin yaydaki moment ve gerilmeleri üzerindeki etkisini incelemek için bir çalışma yapılmıştır.

Bu yüksek lisans tezi, deneysel ve sayısal çalışmalar olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar bölümünde yapılan test düzeneği ile işleme yay test numunelerinin açısız deplasman altındaki burulma momentleri belirlenmiştir. Sayısal çalışmalar kısmında, deneysel çalışmalarda

kullanılan test numuneleri için sonlu eleman yöntemiyle analiz modelleri oluşturulmuştur. Analiz modellerinden elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Analiz modellerinden elde edilen burulma yay sabiti değerinin deneysel sonuçlardan elde edilen burulma yay sabitlerine, ortalama %2.125 hata miktarıyla yaklaştığı görülmüştür. Daha sonra, işleme yay ebatlarını belirleyen boyutsal parametrelerin burulma momenti üzerindeki etki şiddetleri korelasyon tekniği ile araştırılmıştır. Bu bölüm sonucunda; işleme yay boyutlarını belirleyen radyal et kalınlığı (t), aksenal et kalınlığı (b), helis boyu (L), ortalama çap (d_m), slot çapı (d_r), kanal boşluğu (p) gibi parametrelerin burulma yay sabiti değeri üzerindeki etki şiddetleri $t > b > L > d_m > d_r > p$ olarak elde edilmiştir. Bundan sonraki kısımda ise, 720 farklı işleme yay için parametrik analiz çalışması yapılmıştır. Parametrik analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar kullanılarak, burulma yay sabiti tahmini yapan yapay sinir ağı geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İşleme yay, Burulma yay, Sonlu elemanlar analizi, Parametrik analiz, Yapay sinir ağı

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE STIFFNESS PARAMETERS OF MACHINED TORSIONAL SPRINGS BY NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Oğuz DEMİRTAŞ

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış SABUNCUOĞLU

May 2019, 121 pages

Helical Springs are mechanical parts which are frequently used for designing of machines. Conventionally, they are obtained by turning of wire materials. Lately, helical machined springs are improved as an alternative to conventional springs. Helical machined springs have higher efficiency and higher inextensibility compared to conventional type springs. In terms of pure moment behaviour, the performance of helical springs are high. They have property of simplifying complicated designs as they are a whole with convenient connecting interface. They are used frequently in critical areas; such as Aviation and Aerospace Industry, Defence Industry and Medical Sector; where specific applications are made. Because machined springs appeared latterly, it is seen that knowledge in the literature is poor. Based on from this point, a study has been conducted to determine moment loads of helical machined springs under angular displacement. In order to determine torsional spring constant of helical machined springs, which are used in specific mechanisms for aviation sector, in a rapid and correct way artificial neural network is improved.

This master thesis consists of two main parts namely; experimental and numerical studies. In the experimental studies part; with test setup, torsional

moments of machined spring test specimen under angular displacement are determined. In the numerical studies part; finite element methods are generated for the test specimens which are used in experimental studies. Result obtained from analysis model are verified with experimental results. Torsional spring constant value obtained from analysis model is converged to torsional spring constant value obtained from experimental results with average 2.125% error. Later, effect intensities on torsional moment of machined spring dimensions which are determined by dimensional parameters are investigated with correlation technique. At the end of this section, effect intensity on torsional spring constant value of parameters such as radial thickness (t), axial thickness (b), helix length (L), mean diameter (d_m), slot diameter (d_r), gap (p); which determine machined spring dimensions; are obtained as $t > b > L > d_m > d_r > p$. In the next section, for 720 different machined springs parametric analysis studies are performed. With using the results obtained from parametric analysis studies, artificial neural network that estimates torsional spring constant is improved.

Keywords: Machined spring, Torsional spring, Finite element methods, Parametric analysis, Artificial neural network.

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasında bŸyŸk katkısı olan, alıŐmanın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle bana destek olan, karŐılaŐtıŐım problemlerde özŸme ulaŐmam için yardımlarını esirgemeyen çok deŐerli hocam ve danışmanım Doç.Dr. Barış Sabuncuoğlu'na sonsuz teŐekkŸrlerimi sunarım.

Tez alıŐmaları boyunca imkanlarından faydalandıŐım deŐerli kurumum TŸBİTAK SAGE'ye ve çalışmam boyunca bana desteklerini esirgemeyen deŐerli çalışma arkadaŐlarım; Fatih KoŐar'a, Dr. Galip Serdar Tombul'a, Dr. Ŗzer Taga' ya ve Murat Avcı'ya teŐekkŸrlerimi sunarım.

Aynı evi paylaŐtıŐım, desteğe ihtiyacım olduğu vakitlerde hep yanımda olan, meslektaŐım ve ablam ZŸmrŸt Demirtaş'a teŐekkŸrlerimi sunarım. VarlıŐıyla ve dualarıyla bana hep destek olan Ferhan TaŐ'a teŐekkŸrlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, eğitim ve ŖĐretim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak bana bŸyŸk destek sağlayan aileme sonsuz teŐekkŸrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışma Amaçları ve Hedefleri.....	1
1.2. Araştırma Metodolojisi.....	2
1.3. Tez Akışı	3
2. YAYLAR VE MEKANİK DAVRANIŞLARI.....	6
2.1. Yayların Tanımı.....	6
2.2. Konvansiyonel Yay Tipleri.....	6
2.2.1. Helisel Basma Yay	7
2.2.2. Helisel Çekme Yaylar	16
2.2.3. Helisel Burma Yaylar	18
2.3. Helisel İşleme Yaylar.....	23
2.3.1. İşleme Yay Mekanik Tasarım Özellikleri.....	24
2.3.2. İşleme Yaylarda Kullanılan Malzeme Tipleri.....	30
2.3.3. İşleme Yaylar ile Tel Sarımlı Yayların Karşılaştırılması	30
2.3.4. İşleme Yay Boyutsal Parametreleri ve Burulma Katsayısı Hesaplamaları.....	35
2.4. Önceki Çalışmalar.....	36
3. YAY TEST DÜZENEĞİ TASARIMI	39
3.1. Test Düzeneginde Kullanılan Parçalar.....	42

3.2. Test Düzeneği Genel Görünümü	48
4. İŞLEME YAY MEKANİK TESTLERİ	49
4.1. Test Numuneleri.....	49
4.2. Test Bağlantı Arayüzleri	50
4.3. Test Yükleme Senaryoları ve Uygulanan Açısal Deplasman Profilleri	51
4.4. Testlerin Yapılması	54
4.5. Grup-1 Test Sonuçları.....	57
4.6. Grup-2 Test Sonuçları.....	59
4.7. Grup-3 Test Sonuçları.....	61
4.8. Grup-4 Test Sonuçları.....	63
4.9. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	65
5. İŞLEME YAYLARIN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE BURULMA ANALİZLERİ	66
5.1. Giriş.....	66
5.2. Analiz Modelleri ve Ağ Yapısı	68
5.3. Malzeme Özellikleri	73
5.4. Sınır Koşulları, Yükleme ve Diğer Analiz Parametreleri	73
5.5. Analiz Sonuçları	77
5.6. Ağ Yapısının Etkisinin İncelenmesi	81
5.7. Özet	83
6. PARAMETRE KORELASYON ÇALIŞMASI	85
6.1. Çalışmanın Teorisi	85
6.2. Çalışma Metodu.....	88
6.2.1. Analiz Veri Tabanı'nın Belirlenmesi	88
6.2.2. Parametrik Korelasyon Prosedürü.....	89
6.3. Parametre Korelasyon Sonuçları	91
7. YAPAY SİNİR AğI ÇALIŞMASI	98

7.1. Giriş.....	98
7.2. Yapay Sinir Ağı Teorisi.....	98
7.3. Yapay Sinir Hücresi.....	100
7.4. İşleme Yay Çalışması Yapay Sinir Ağı Uygulaması	104
7.5. Yapay Sinir Ağı Çalışması Sonuçları	106
7.6. Özet	113
8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	114
8.1. Özet	114
8.2. Önemli Bulgular ve Öneriler	115
8.3. Potansiyel Çalışmalar	116
KAYNAKLAR.....	117
EKLER	121
EK-1: Yapay sinir ağı Matlab Kodu [42].....	121
EK-2: Tez Çalışması Orjinallik Raporu	122
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yay özellikleri karşılaştırma tablosu [8]	34
Çizelge 3.1. Servo motor özellikleri [30].....	43
Çizelge 3.2. Harmonik redüktör özellikleri [31].....	44
Çizelge 3.3. Tork sensörü özellikleri [32]	45
Çizelge 4.1. Test numunelerinin boyutsal parametre değerleri	50
Çizelge 4.2. Açık profil senaryo numaraları	54
Çizelge 4.3. Grup-1 test sonuçları özet tablosu	58
Çizelge 4.4. Grup-2 test sonuçları özet tablosu	60
Çizelge 4.5. Grup-3 test sonuçları özet tablosu	62
Çizelge 4.6. Grup-4 test sonuçları özet tablosu	64
Çizelge 4.7. İşleme yay ortalama “ k ” sabitleri özet tablosu	65
Çizelge 5.1. Ağ yapılarının özellikleri	73
Çizelge 5.2. Malzeme özellikleri [36].....	73
Çizelge 5.3. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen moment ve yay sabitleri “ k_s ” değerleri.....	81
Çizelge 5.4. Farklı eleman boyutları için tekrarlanan sonlu elemanlar analiz sonuçları	82
Çizelge 5.5. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması.....	83
Çizelge 6.1. Spearman rank korelasyonu örneği	86
Çizelge 6.2. Geometrik girdi parametrelerinin nominal değerleri, alt sınır ve üst sınır değerleri.....	91
Çizelge 6.3. Korelasyon matrisi.....	94
Çizelge 6.4. Asıl parametrik çalışmadaki girdi parametrelerinin sayıları ve değerleri	97
Çizelge 7.1. Biyolojik sinir hücresi ile yapay sinir hücresi karşılaştırması [49].....	101
Çizelge 7.2. Toplam fonksiyonları [43].....	103
Çizelge 7.3. Veri tabanındaki parametreler	105
Çizelge 7.4. YSA Veri tabanından seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar	110

Çizelge 7.5. YSA veri taban kümesindeki ara değerlerden seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar	111
Çizelge 7.6. YSA veri taban kümesinin dışında kalan değerlerden seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar	112
Çizelge 7.7. YSA yöntemiyle elde edilen yay sabiti (kn) değerleri	112
Çizelge 7.8. İşleme yay burulma direngenliklerinin karşılaştırılması	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Akış şeması	5
Şekil 2.1.	Helisel basma yay [2].	7
Şekil 2.2.	Farklı helisel basma yay tipleri: (a) Değişken adım tipi, (b) Fıçı tipi, (c) Kum saati tipi, (d) Konik tip [3].	7
Şekil 2.3.	Helisel yay bitiş tipleri: (a) Açık uçlu (b) Açık uçlu ve taşlanmış (c) Kapalı uçlu (d) Kapalı uçlu ve taşlanmış [3].	8
Şekil 2.4.	Boyutsal basma yay parametreleri [3].	8
Şekil 2.5.	Torsiyon kesme gerilmesi, kesme Gerilmesi ve bileşke gerilme diyagramları [5].	9
Şekil 2.6.	Helisel basma yayı serbest cisim diyagramı [3].	9
Şekil 2.7.	İki farklı yay bitiş tipi için kritik burkulma eğrisi [3]	11
Şekil 2.8.	Eksenel yüklenmiş yaylar: (a) Kare tel sarımlı helisel yay kesiti, (b) Enine dikdörtgen kesitli helisel yay, (c) Boyuna dikdörtgen kesitli helisel yay [6].	13
Şekil 2.9.	Deformasyon faktörü (γ) bulma eğrisi [6]	14
Şekil 2.10.	Kare kesitli helisel yaylar için eğrissellik düzeltme faktörü [6]	15
Şekil 2.11.	Helisel çekme yay görünümü [3]	16
Şekil 2.12.	Helisel çekme yay bitiş tipleri: (a) Açık uçlu yarım çengel tipi, (b) Açık uçlu uzun çengel tipi, (c) Kapalı uçlu yarım çengel tipi, (d) Tam kapalı uçlu çengel tipi [4].	17
Şekil 2.13.	Yaygın olarak kullanılan helisel çekme yay bitiş tipi: (a) Ön görünüm, (b) Yan görünüm [4].	17
Şekil 2.14.	Farklı bitişli helisel torsiyon yayları: (a) Düz bacaklı, (b) Dik bacaklı, (c) Çengel bitişli, (d) Kısa bacaklı [4]	19
Şekil 2.15.	Helisel torsiyon yayı, yay bacakları konumları [4]	20
Şekil 2.16.	Farklı tipteki işleme yaylar [9]	24
Şekil 2.17.	Farklı Sektörlerde Kullanılan İşleme Yay Modelleri; (a) Hubble teleskop, (b) Mars aracı, (c) Medikal uygulama, (d) Uçak Elektroniği [9]	24
Şekil 2.18.	Çekme ve basma yüklerinde çalışan işleme yay modelleri: (a) Çekme yükü işleme yay modeli, (b) Basma yükü işleme yay modeli [10].	25

Şekil 2.19.	İşleme burulma yay çalışma yönleri: (a) Açma yönü, (b) Kapama yönü [10].....	25
Şekil 2.20.	İşleme yay yanal eğilme ve yanal ötelenme çalışma durumları: (a) Yanal eğilme, (b) Yanal ötelenme [10].....	26
Şekil 2.21.	İşleme yay gerilme rahatlatma deliği [9].....	26
Şekil 2.22.	İşleme burulma yay bağlantı tipleri: (a) Altıgen tip, (b) Pim delikli tip, (c) Kanallı tip [9].....	27
Şekil 2.23.	Tel sarımlı farklı bitişlere sahip burulma yaylar üzerindeki momentler: (a) Dıştan çengelli, (b) İçten çengelli, (c) Dıştan destekli, (d) İçten destekli [10].....	27
Şekil 2.24.	Farklı bitişlere sahip işleme burulma yaylar üzerindeki momentler: (a) Yarıklı tip, (b) Delikli tip, (c) Altıgen tip, (d) Çentikli tip [10].....	28
Şekil 2.25.	Aynı boyutlardaki yaylar: (a) Tel sarımlı yay, (b) İşleme yay [11].....	29
Şekil 2.26.	Farklı helis sayısındaki işleme yaylar: (a) Tek helisli yay, (b) İki helisli yay, (c) Üç helisli yay [12].....	29
Şekil 2.27.	Küçük yay örnekleri: (a) Tel sarım yaylar, (b) İşleme yaylar [8].....	31
Şekil 2.28.	Farklı tipteki yay kesitleri: (a) Yuvarlak kesit, (b) Kare kesit, (c) Dikdörtgen kesit.....	31
Şekil 2.29.	Tel sarım yay kanal boşlukları: (a) Helisel burulma yayı, (b) Helisel çekme yay, (c) Helisel basma yay [14].....	32
Şekil 2.30.	Yay kanal boşluğu karşılaştırması: (a) Helisel basma Yay, (b) İşleme yay [8].....	33
Şekil 2.31.	İşleme yay boyutsal parametreler.....	35
Şekil 2.32.	(a) Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen şekil hafızalı yay, (b) Deneysel çalışmalarda kullanılan şekil hafızalı yay [27].....	38
Şekil 3.1.	Burma yayı test düzeneği görünümü [28].....	40
Şekil 3.2.	Andilog burma yay test cihazı [29].....	40
Şekil 3.3.	Test düzeneği katı model görünümü.....	41
Şekil 3.4.	Test düzeneği alt bileşen görünümleri.....	41
Şekil 3.5.	Servo motor görünümü.....	42

Şekil 3.6.	Motor sürücüsü görünümü	43
Şekil 3.7.	Harmonik redüktör görünümü	44
Şekil 3.8.	Tork sensörü görünümü	45
Şekil 3.9.	Sinyal yükseltici görünümü.....	46
Şekil 3.10.	Veri toplama kartı görünümü	46
Şekil 3.11.	Güç adaptörü görünümü	47
Şekil 3.12.	Test düzeneği genel görünümü.....	48
Şekil 4.1.	İşleme yay test numuneleri	49
Şekil 4.2.	Test numuneleri bağlantı arayüzleri	51
Şekil 4.3.	Test Düzeneği Hareket Yönleri: (a) Pozitif Yön, (b) Negatif Yön.....	52
Şekil 4.4.	Açısal deplasman profilleri	53
Şekil 4.5.	Test düzeneği görünümleri: (a) Yay-1, (b) Yay-2, (c) Yay-3, (d) Yay-4, (e) Yay-5, (f) Yay-6, (g) Yay-7, (h) Yay-8.....	56
Şekil 4.6.	Grup-1 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-1 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-1 grafiği, (c) Senaryo- 3'e göre Yay-1 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-1 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-2 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-2 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-2 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-2 grafiği	58
Şekil 4.7.	Grup-2 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-3 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-3 grafiği, (c) Senaryo- 3'e göre Yay-3 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-3 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-4 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-4 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-4 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-4 grafiği	60
Şekil 4.8.	Grup-3 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-5 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-5 grafiği, (c) Senaryo- 3'e göre Yay-5 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-5 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-6 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-6 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-6 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-6 grafiği	62

Şekil 4.9.	Grup-4 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-7 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-7 grafiği, (c) Senaryo-3'e göre Yay-7 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-7 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-8 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-8 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-8 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-8 grafiği	64
Şekil 5.1.	Analiz modeli akış şeması.....	67
Şekil 5.2.	İşleme yay katı model görünümleri: (a) Yay-1 ve Yay-2 modeli, (b) Yay-3 ve Yay-4 modeli, (c) Yay-5 ve Yay-6 modeli, (d) Yay-7 ve Yay-8 modeli	68
Şekil 5.3.	Analiz modelleri: (a) Yay 1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8.....	70
Şekil 5.4.	Analiz modellerinin ağ yapıları: (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8	72
Şekil 5.5.	Mafsal tanımlanması	74
Şekil 5.6.	İşleme yaylar için yükleme ve sınır koşulları: (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8.....	76
Şekil 5.7.	İşleme yay Von Mises gerilme dağılımları (MPa): (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8.....	80
Şekil 6.1.	Örnek hassasiyet grafiği [41].....	87
Şekil 6.2.	Geometrik girdi parametreleri.....	89
Şekil 6.3.	Parametre korelasyon çalışmaları akış şeması.....	90
Şekil 6.4.	Renklerle ifade edilmiş korelasyon matrisi	93
Şekil 6.5.	Hassasiyet grafiği.....	95
Şekil 7.1.	Biyolojik sinir hücresi [46].....	99
Şekil 7.2.	Yapay sinir ağı katmanları.....	99
Şekil 7.3.	Yapay sinir ağı elemanları.....	100
Şekil 7.4.	Transfer fonksiyonları: (a) Adım fonksiyon, (b) Eşik fonksiyon, (c) Sigmoid fonksiyon, (d) Hiperbolik tanjant fonksiyon [50].....	104
Şekil 7.5.	Yapay sinir ağ yapısı.....	105
Şekil 7.6.	Yapay sinir ağı eğitim performans grafiği	107

Şekil 7.7.	Değerlendirme kontrol limitine bağlı YSA sonuçlandırma grafiği	107
Şekil 7.8.	YSA performansına ait regresyon grafiği	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N	Halka sayısı
τ_{max}	Maksimum kayma gerilmesi (MPa)
τ	Kayma gerilmesi (MPa)
C	Yay indisi
δ	Deformasyon miktarı (mm)
N_a	Aktif tur sayısı
E	Elastisite modülü (MPa)
G	Rijitlik modülü (GPa)
γ	Deformasyon faktörü
θ_e	Açısal deformasyon miktarı (°)
k_θ	Açısal yay sabiti $\left(\frac{N.mm}{^\circ}\right)$
d_r	Slot çapı (mm)
t	Radyal et kalınlığı (mm)
b	Eksenel et kalınlığı (mm)
L	Helis boyu (mm)
h	Kanal boşluğu (mm)
D_m	Ortalama çap (mm)
\bar{X}	Ortalama değer
X_i	Örnekleme değeri
n	Toplam örnek sayısı
ν	Poisson oranı
σ_{ak}	Akma gerilmesi (MPa)
k_s	Sonlu elemanlar yay sabiti $\left(\frac{N.m}{^\circ}\right)$
k_d	Deneysel yay sabiti $\left(\frac{N.m}{^\circ}\right)$
k_n	Yapay sinir ağı, yay sabiti $\left(\frac{N.m}{^\circ}\right)$
k_t	Teorik yay sabiti $\left(\frac{N.m}{^\circ}\right)$
r	Spearman rank korelasyonu

Kısaltmalar

YSA	Yapay sinir ağı
OKH	Ortalama karesel hata

1. GİRİŞ

Yaylar, mekanik sistemlerde yaygın olarak kullanılan makina elemanlarıdır. Enerji depolamak, makinalarda oluşan titreşimleri sönmölemek, tork aktarımı yapmak, mekanik parçalar arasında ön gerilme oluşturarak boşluk gidermek gibi amaçlar için kullanılırlar. Kullanım amaçlarına göre farklı geometrilere ve farklı malzeme özelliklerine sahip yaylar vardır.

Geleneksel yaylar, tel malzemenin sarımıyla üretilirler. Ancak bu çalışma kapsamında incelenen işleme yayları, dolu malzemenin talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi sonucunda elde edilmektedirler. Bu yaylar, bağlantı arayüzünü üzerlerinde bulundurlar. Bu sayede makinalarda parça sayısı azalır ve sistemler basitleşir. Geleneksel yaylara göre daha küçük alanlarda çalışma imkanı sunan bu yaylar, havacılık ve uzay, savunma ve medikal gibi birçok sektörde tercih edilmektedirler.

Çalışma kapsamında incelenen işleme yaylarının tasarımı ve üretimi için gerekli bilgi literatürde nadirdir. Bu nedenle bu çalışmada, tork aktarımı için kullanılacak işleme yaylarının burulma direngenliğini etkileyen dış çap, iç çap, helis boyu, radyal et kalınlığı, eksenel et kalınlığı, kanal boşluğu, slot çapı gibi parametreler deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla, sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analiz modelleri, deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. İşleme yay ebatlarını belirleyen boyutsal parametrelerin burulma yay sabiti üzerindeki etki şiddetleri korelasyon tekniği ile araştırılmıştır. Parametrik analiz yöntemiyle yapılan 720 farklı işleme yay analiz sonuçları kullanılarak bir yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Elde edilen bu yapay sinir ağı ile işleme yay boyutsal tasarım parametrelerine bağlı olarak burulma yay sabiti tahmini yapılabilmektedir.

1.1. Çalışma Amaçları ve Hedefleri

Birçok sektörde yaygın olarak kullanılan işleme yayların tasarımı ile ilgili teorik bilgi nadirdir. Bu nedenle işleme yayların tasarlanması zordur. Bu zorluklar yurtdışından temin edilen bu yayların maliyetini arttırmaktadır. Bu çalışmanın asıl amacı;

- Açısal deplasman altında çalışan işleme yaylarının tasarım parametrelerinin yay direngenliği ve gerilmeleri üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemlerle belirlemek,
- Sayısal yaklaşımları deneysel yöntemlerle doğrulamak,
- İşleme yay tasarım parametrelerine bağlı olarak burulma yay sabiti değerini hızlı bir şekilde elde etmemize yarayan bir yapay sinir ağı geliştirmektir.

Bu yapay sinir ağı ile ülkemizde özel tasarımlarda kullandığımız işleme yaylarının tasarımını ve üretimini yapıp, bu konudaki dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir.

1.2. Araştırma Metodolojisi

Tez, mekanik yaylar hakkında genel bilgiler kısmından başlamaktadır. Yay kullanım amaçları, yayların çeşitleri, yaylarda kullanılan malzemeler anlatılmıştır. Daha sonra çalışma konusunun kapsadığı burulma yaylar hakkında daha detaylı bilgi verilmiştir. Ardından literatürde daha önceden yapılan çalışmalar hakkında özet bilgi verilmiştir. Burulma yayların moment ve burulma açısı arasındaki ilişkisini veren hesaplama yöntemleri anlatılmıştır. Burulma yaylarda kullanılan malzeme çeşitleri ve yayların tasarım parametreleri anlatılmıştır. Ayrıca bu kısımda, çalışmanın asıl konusu olan işleme yaylar anlatılmıştır. İşleme yaylarının kullanım alanları, tasarım parametreleri, kullanılan malzeme çeşitleri, literatürdeki tork hesaplama yöntemleri ve geleneksel yaylar ile farklılıkları anlatılmıştır.

Tezin ikinci aşamasını deneysel çalışmalar oluşturmaktadır. Bu kısımda, işleme yaylarının testinde kullanılan test yöntemi anlatılmıştır. Yapılacak test için gerekli test düzeneği tasarımı anlatılmıştır. Ardından test numunelerinin mekanik özellikleri verilmiştir. Yapılan testler için aynı ebatlardaki numuneler gruplandırılmıştır. Daha sonra test düzeneğinde uygulanacak yükleme koşulları anlatılmıştır. Mekanik testler tamamlanarak elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tezin üçüncü aşamasında; sayısal yöntemler kullanılarak işleme yayların burulma yüklemeleri altındaki direngenlik katsayıları ve üzerlerinde oluşan gerilmeleri irdelenmiştir. İlk olarak, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz modeli oluşturulmuştur. Daha sonra; işleme yay geometrisini oluşturan parametrelerin burulma yüklemeleri altında, gerilme çıktıları ve moment çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bunun için parametrik analizler yapılarak parametre korelasyon çalışması yapılmıştır. Korelasyon çalışması sonucunda, geometrik girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ardından, farklı geometrik ebatlardaki işleme yaylar için parametrik analiz çözümlenmeleri yapılmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak yapay sinir ağı oluşturulmuştur.

Tezin dördüncü aşamasında; deneysel, sayısal ve teorik yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapay sinir ağı ile burulma katsayısı tahmini örnekleri verilmiştir. Çalışmayla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

1.3. Tez Akışı

Tezin genel akış şeması Şekil 1.1'de verilmiştir. Çalışma, toplamda sekiz bölümden oluşmaktadır. Her bir bölüm hakkında özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

Bölüm 1; çalışmanın amacı ve hedefleri anlatılmıştır. Çalışmanın içeriği hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2; mekanik yaylar hakkında genel bilgiler, yayların kullanım alanları, yay çeşitleri ve fonksiyonları anlatılmıştır. Çalışmayı kapsayan burulma yükleri altında çalışan yaylar ve işleme yayları daha detaylı olarak bu kısımda anlatılmıştır. İşleme yaylarının direngenliğini etkileyen parametreler belirtilmiştir.

Bölüm 3; Bu kısımda, işleme yaylarının burulma testi için gerekli test düzeneği tasarımında kullanılacak yöntem hakkında bilgiler verilmiştir. Test düzeneği tasarımı ve üretimi anlatılmıştır.

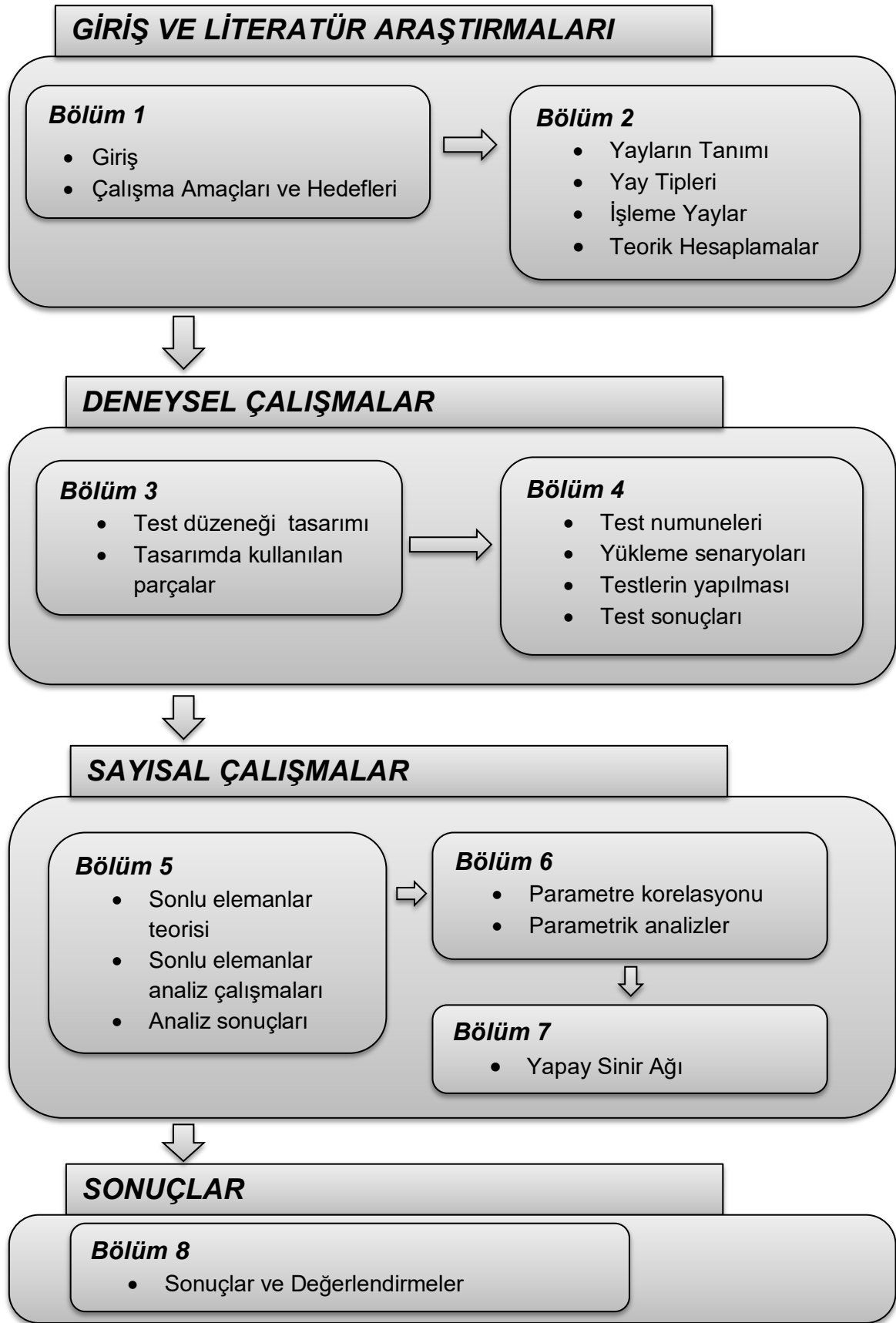
Bölüm 4; Bu kısımda, İşleme yaylarının testlerinde kullanılacak numuneler verilmiştir. Deneysel çalışmadaki yükleme senaryoları ve diğer sınır koşulları anlatılmıştır. İşleme yay burulma testleri ve elde edilen test sonuçları verilmiştir.

Bölüm 5; Bu kısımda, işleme yaylarının sonlu elemanlar metodu ile burulma modellenmesi yapılmıştır. Sayısal çözümlenmede kullanılan yay katı modeli, analiz modeli ve analiz sınır şartları bu kısımda verilmiştir. Analiz modelinin analiz programında oluşturulma adımları anlatılmıştır.

Bölüm 6; Bu kısımda, işleme yay burulma direngenliğini etkileyen geometrik girdi parametrelerinin etki şiddetleri incelenmiştir. Parametrik analiz modellerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak girdi parametreleri ile çıktı arasında korelasyon ilişkisi değerlendirilmiştir. Parametrik analiz çalışması ile veri tabanı elde edilmiştir.

Bölüm 7; Bu kısımda, parametrik analiz çalışmalarından elde edilen veri tabanı kullanılarak bir yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Bu yapay sinir ağı, geometrik girdilere göre yay burulma katsayısı tahmininde kullanılmaktadır.

Bölüm 8; Bu kısımda, elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Sonuçlar arasında kıyaslamalar yapılmıştır.



Şekil 1.1. Akış şeması

2. YAYLAR VE MEKANİK DAVRANIŞLARI

2.1. Yayların Tanımı

Makina elemanları çalışırken, çalışma yükleri altında deformasyona uğrarlar. Bu deformasyon, makina elamanında elastik davranışın sergilenmesine sebep olur. Makina elemanlarındaki elastik davranış genellikle çok küçüktür. Ancak, bazı durumlarda makina elemanın yüksek elastik davranış sergilemesi istenilmektedir. Yük altında deformasyona uğrayan bir malzemenin üzerindeki yük kaldırıldığında tekrar ilk haline dönmesi elastik davranış olarak adlandırılır [1]. Yaylar elastik davranış gösteren makina elemanlarıdır. Kuvvet veya tork uygulanmasında kullanılan, üzerlerinde enerji depolanıp daha sonra bu enerjinin kullanılmasına yarayan esnek mekanik elemanlardır. Yaylardaki esneklik; mekanik sistemlerde geometrinin değişkenliğine olanak vermektedir.

2.2. Konvansiyonel Yay Tipleri

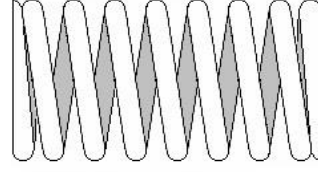
Yayların kullanım fonksiyonlarına göre farklı tipleri bulunmaktadır. Kullanım fonksiyonlarına göre genelde; basma yayları, çekme yayları, burma yayları ve özel tip yaylar olarak sınıflandırılırlar. Yaylar geometrik şekillerine göre ise helisel yaylar , yaprak yaylar ve özel tip yaylar olarak adlandırılırlar.

Bu çalışmada, tel malzemenin bükülmesi ile elde edilen helisel yaylar için helisel yay ifadesi, malzemenin talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi sonucunda elde edilen helisel yaylar için işleme helisel yay ifadesi kullanılmıştır.

Helisel yaylar, en yaygın tipteki yaylardır. Çekme yükü, basma yükü ve burma yükleri altında kullanılırlar. Genellikle tel ya da çubuk malzemenin bükülmesi sonucunda elde edilirler. Helisel basma yay, helisel çekme yay ve helisel burma yay çeşitleri bulunmaktadır.

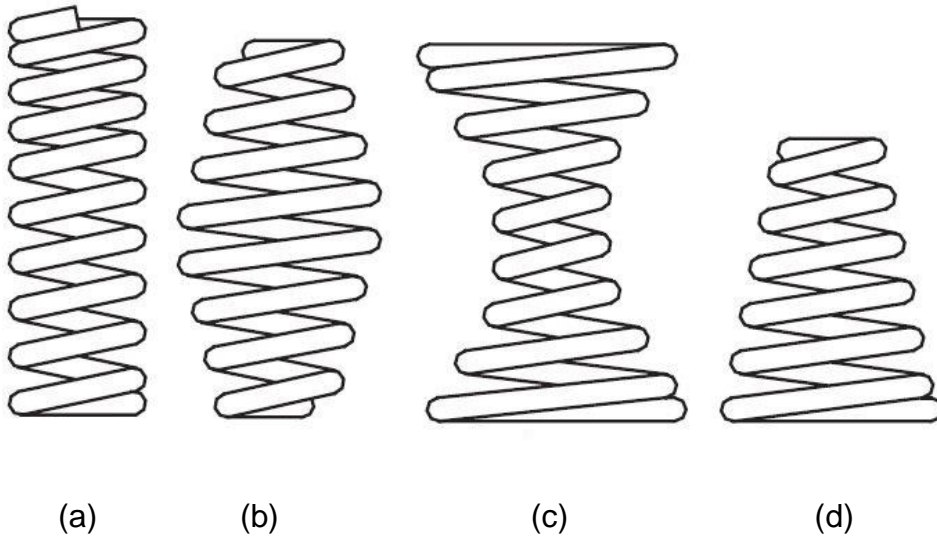
2.2.1. Helisel Basma Yay

Helisel Basma yayları, basma yükü altında çalışan yaylardır. Bu yaylar, kesme gerilmelerine maruz kalırlar. Şekil 2.1'de helisel basma yay genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2.1. Helisel basma yay [2].

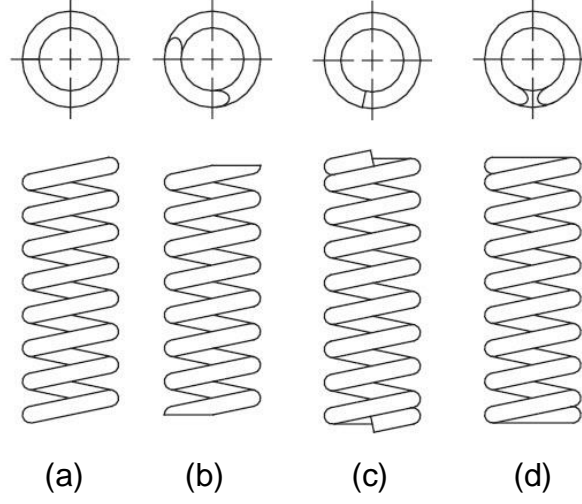
Helisel basma yaylarının en yaygın tipi, sabit çapa ve sabit adıma sahiptir. Fakat, değişken çap ve adıma sahip basma yayları da bulunmaktadır [3]. Şekil 2.2'de farklı tipteki helisel basma yaylar verilmiştir.



Şekil 2.2. Farklı helisel basma yay tipleri: (a) Değişken adım tipi, (b) Fıçı tipi, (c) Kum saati tipi, (d) Konik tip [3].

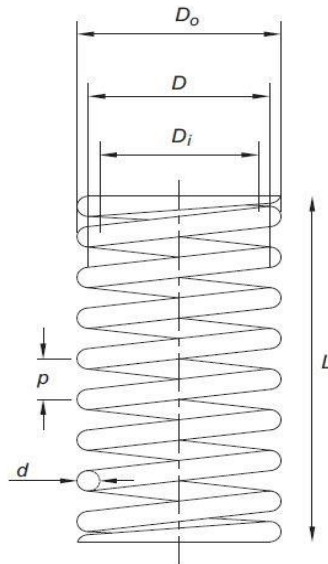
Helisel basma yaylarının bitim kısımları farklı şekillerde üretilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan 4 farklı tip Şekil 2.3'de verilmiştir. Açık uçlu helisel yaylar, uzun olarak üretilmiş helisel yay stoğunun kesilmesiyle elde edilir. Bu tipte helis adımı ve helis açısı sabittir. Açık uçlu ve taşlanmış helisel yaylarda, bitiş yüzeyleri birbirlerine paralel olacak şekilde kesilir. Temas yüzeyleri daha düzgündür. Ancak bu kesim tipi yay maliyetini arttırmaktadır. Kapalı uçlu helisel yaylarda, bitiş

halkalarının helis açısı sıfırdır. Kapalı uçlu ve taşlanmış helisel yaylarda ise, helisel yay bitiş yüzeylerinin düzlemselliğini iyileştirebilmek için yay bitişleri işlenmektedir. Bu durum yay performansını etkilemektedir [3, 4].



Şekil 2.3. Helisel yay bitiş tipleri: (a) Açık uçlu (b) Açık uçlu ve taşlanmış (c) Kapalı uçlu (d) Kapalı uçlu ve taşlanmış [3].

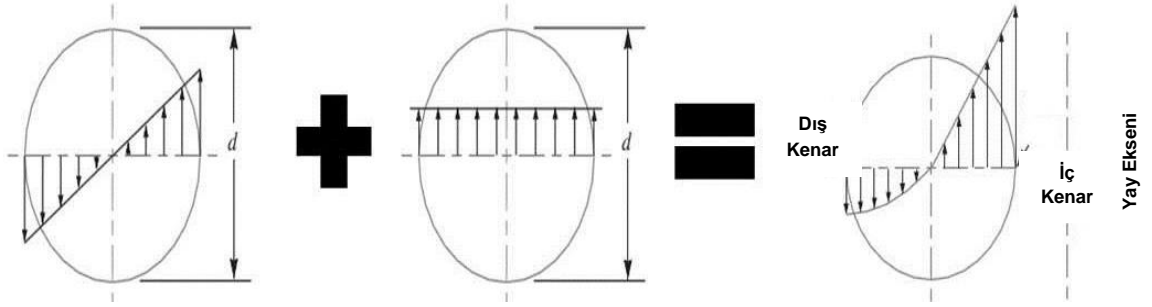
Helisel basma yayların tasarımını oluşturan boyutsal parametreler(Şekil 2.4); Dış çap (D_o), İç çap (D_i), Ortalama Çap (D), Serbest Uzunluk (L), Yay adımı (p), Tel Çapı (d) olarak ifade edilmişlerdir. Tasarımda bulunan toplam halka sayısı N 'dir.



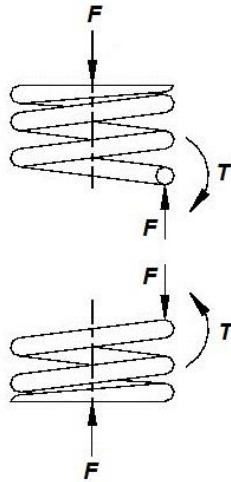
Şekil 2.4. Boyutsal basma yay parametreleri [3].

Yaylar, statik yüklemelerde çok yüksek gerilmelere ya da dinamik yükler altında yorulmaya maruz kaldığında kalıcı deformasyona uğramaktadır [3]. Bu durumun meydana gelmemesi için yayın maruz kalabileceği maksimum gerilme miktarının hesaplanması gerekir.

Bir F kuvvetine maruz kalan helisel basma yay telinde iki farklı gerilme meydana gelmektedir. Birincisi, yay üzerindeki momentten dolayı oluşan torsiyon kesme gerilmesidir. İkincisi ise F kuvvetinden dolayı oluşan kesme gerilmesidir. Yay telinde oluşan maksimum gerilme miktarı bu iki gerilmenin bileşkesidir [3, 4]. Şekil 2.5'de gerilme ve bileşke gerilme diyagramları gösterilmiştir. Şekil 2.6'da ise helisel basma yayı serbest cisim diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Torsiyon kesme gerilmesi, kesme Gerilmesi ve bileşke gerilme diyagramları [5]



Şekil 2.6. Helisel basma yayı serbest cisim diyagramı [3].

Burada T ; oluşan momenti ifade etmektedir. Kuvvet denge denklemi yazıldığında T , Denklem (2.1)'deki gibi elde edilir.

$$T = \frac{FD}{2} \quad (2.1)$$

Maksimum gerilme miktarı; T momentinden oluşan torsiyon kesme gerilmesi ve F kuvvetinden oluşan ortalama kesme gerilmesinin birleşimiyle Denklem (2.2)'deki gibi elde edilir.

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

τ_{max} ifadesi helisel yay telinde oluşan maksimum gerilmeyi ifade etmektedir. Denklem (2.2)'deki ifadelerin yerine;

$$\tau_{max} = \tau \quad (2.3)$$

$$T = \frac{FD}{2} \quad (2.4)$$

$$r = \frac{d}{2} \quad (2.5)$$

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (2.6)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.7)$$

Denklemleri yazılırsa, helisel yay üzerinde oluşan gerilme denklemi aşağıdaki gibi olur.

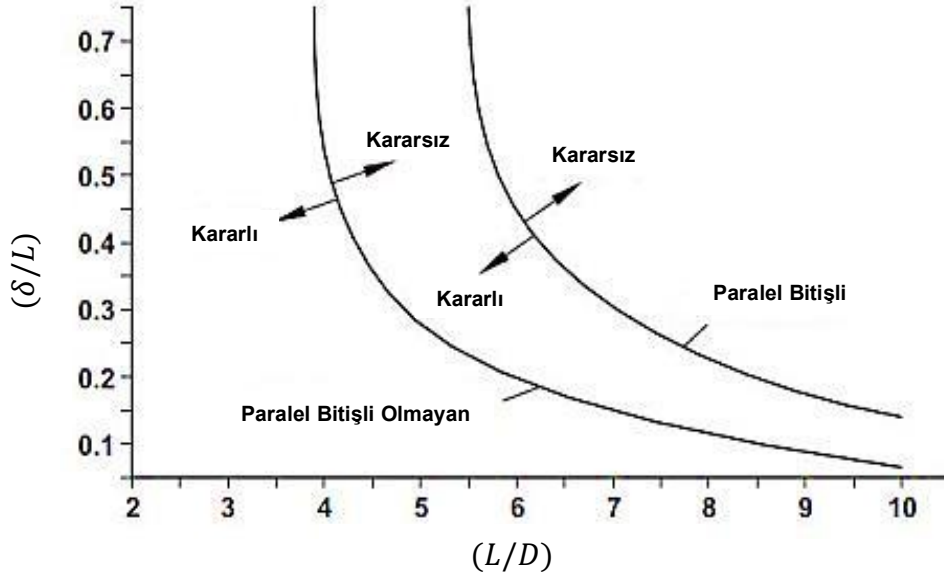
$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2.8)$$

Yay indisi Denklem (2.9)'daki gibi tanımlanır.

$$C = \frac{D}{d} \quad (2.9)$$

Yay indisi, yay halkalarının eğriselliğini gösteren bir orandır [4]. Helisel yaylarda bu oran, genellikle 4 – 12 aralığında tercih edilmektedir. 4 değerinin altındaki yayların üretimi zordur. 12 değerinin üzerindeki yaylarda ise yaylardaki burkulma miktarı fazladır. Yaylardaki burkulmaları engellemek için içten veya dıştan destekler konulabilir. Bu desteklerin yay halkaları ile teması sonucunda oluşan sürtünme kuvvetleri, yay kuvvetinde kayıplara neden olur. Yaylardaki burkulma eğilimi;

serbest yay uzunluğunun (L), ortalama ap (D) değerine oranı, (L/D), yay deformasyon miktarının (δ), serbest yay uzunluğuna (L) oranı, (δ/L) ve yay bitiş tipine göre değişmektedir. Tüm bu faktörlere bağlı olarak Şekil 2.7’de gösterilen grafik ile bir yayın burkulma eğiliminde olup olmadığı tahmin edilebilir [3].



Şekil 2.7. İki farklı yay bitiş tipi için kritik burkulma eğrisi [3]

Yay indisi, Denklem (2.10)’da yerine koyulursa;

$$\tau_{max} = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{1}{2C}\right) = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2.10)$$

Burada K_s , kesme faktörü olarak tanımlanır.

$$K_s = 1 + \frac{1}{2C} \quad (2.11)$$

Eğri kirişlerin i yüzeylerinde gerilme yığılmaları meydana gelir. Helisel yayların iç kısımlarında oluşan gerilme yığılmaları, gerilmeler hesaplanırken dikkate alınması gerekmektedir. Wahl faktörü (K_w), helisel yaylarda hem kesme gerilmelerini hem de eğrisellikten oluşan gerilme yığılmalarını içermektedir [3].

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad (2.12)$$

$$\tau_{max} = K_w \frac{8FD}{\pi d^3} = K_w \frac{8FC}{\pi d^2} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) modeli, dinamik yükler altında yorulmaya maruz kalan yaylar için önerilmektedir. Statik yükler altında çalışan yaylar için Denklem (2.10) modeli kullanılabilir.

Helisel yayların bitiş tipine göre, gerilme ve deformasyon hesaplamalarındaki aktif yay halka sayısı değişmektedir. Hesaplamalarda, bitiş tipine göre aktif halka sayısının kullanılması gerekmektedir. Kapalı uçlu ve kapalı uçlu taşlanmış yaylarda aktif halka sayısı;

$$N_a = N - 2 \quad (2.14)$$

Açık uçlu taşlanmış helisel yaylarda ise aktif halka sayısı;

$$N_a = N - 1 \quad (2.15)$$

Burada (N_a), Aktif Halka Sayısı'nı temsil etmektedir. Helisel yayın F kuvveti altındaki deformasyon miktarı,

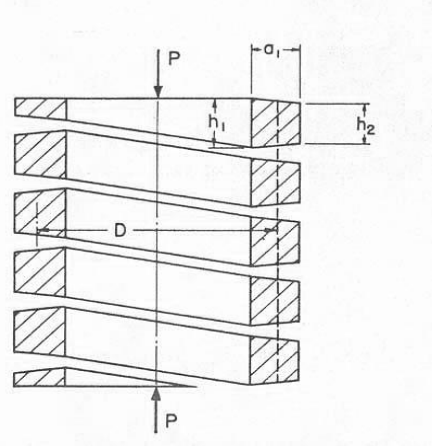
$$\delta = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} = \frac{8FC^3N_a}{dG} \quad (2.16)$$

olur. Helisel basma yaylardaki yay sabiti (k),

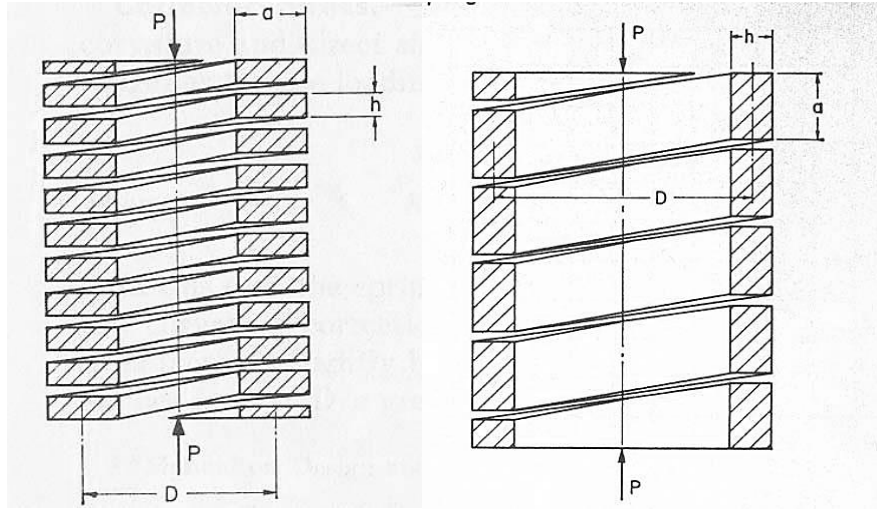
$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{d^4G}{8D^3N_a} = \frac{dG}{8C^3N_a} \quad (2.17)$$

Denklem (2.10) ve Denklem (2.13)'deki gerilme formülasyonlarında, helisel basma yayın geometrik ekseninden yüklenildiği durumlar düşünülmüştür. Eksenden kaçık yüklemelere maruz helisel basma yaylarda, bir taraftaki gerilme miktarı diğer taraftaki gerilme miktarından çok olur.

Dairesel kesitli helisel yaylara ek olarak kare ve dikdörtgen kesitli helisel yaylar da bulunmaktadır. Kare ya da dikdörtgen kesitli helisel yaylarla daha fazla enerji depolamak mümkündür. Kare veya dikdörtgen kesitlik tel malzemenin bükümüyle elde edilen helisel yaylarda, yay kesiti yamuk şeklini alabilmektedir. Bu durum helisel yayın verimini ve enerji kapasitesini düşürmektedir [6].



(a)

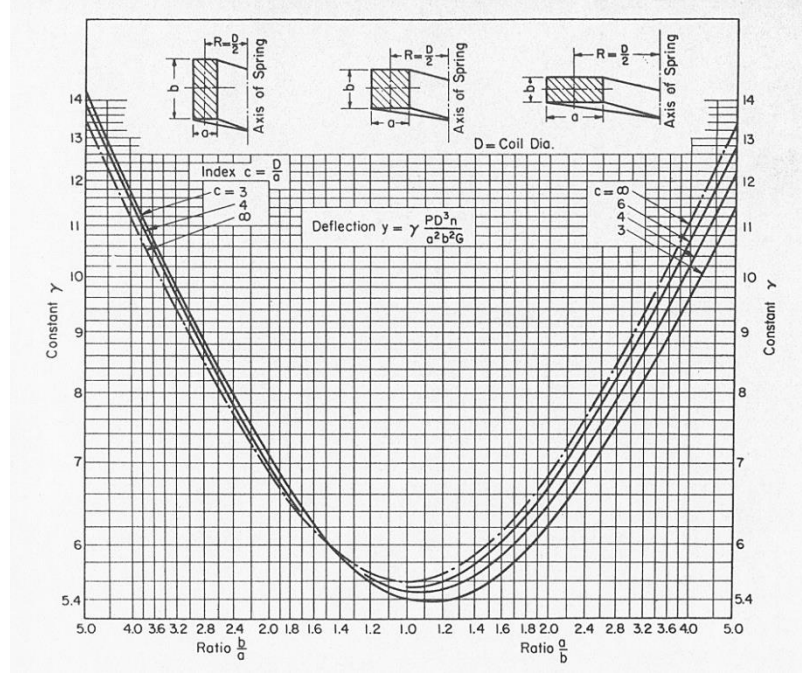


(b)

(c)

Şekil 2.8. Aksenal yüklenmiş yaylar: (a) Kare tel sarımlı helisel yay kesiti, (b) Enine dikdörtgen kesitli helisel yay, (c) Boyuna dikdörtgen kesitli helisel yay [6]

Yuvarlak kesitli sarım yaylarında olduğu gibi kare ve dikdörtgen kesitli helisel yayların da eğriselliğinin etkisi sonucunda deformasyon miktarı değişmektedir. Eğri giriş etkisi ihmal edildiğinde %15 veya daha fazla miktarda hatalı sonuçlar elde edilmektedir. Bu etkiyi azaltabilmek için Şekil 2.9'da verilen grafikten yararlanılır [7].



Şekil 2.9. Deformasyon faktörü (γ) bulma eğrisi [6]

Enine dikdörtgen kesitli helisel yaylar, benzer ebatlardaki dairesel kesitli helisel yaylara göre daha fazla enerji depolama yeteneğine sahiptir. Fakat, dikdörtgen kesitli helisel yaylardaki gerilme dağılımları dairesel kesit kadar düzgün değildir. Bu durum, yükleme tipine bağlı olarak yay performansında düşüklüğe neden olabilir. Ayrıca tekrarlayan yükler altında çalışan yaylarda gerilme dağılımının düzensizliği, yay ömrünü azaltmaktadır. Dikdörtgen kesitli tel sarım helisel yayların bir diğer dezavantajı ise malzeme bakımından yuvarlak kesitli tel sarım helisel yaylara göre zayıftırlar. Dikdörtgen kesitli tel malzemenin üretilebilirliği zordur ve aynı zamanda maliyeti yüksektir [7].

Boyuna dikdörtgen kesitli helisel yaylar (Şekil 2.8(c)), yükleme-deformasyon karakteristiği bakımından daha fazla lineer davranış gösterirler.[7] Kare veya dikdörtgen kesitli telin bükülmesi sonucunda kesitteki bozulmaları Denklem (2.18)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [6].

$$h_1 = h \left\{ 1 + \frac{k(D_0 - D_i)}{D_0 + D_i} \right\} \quad (2.18)$$

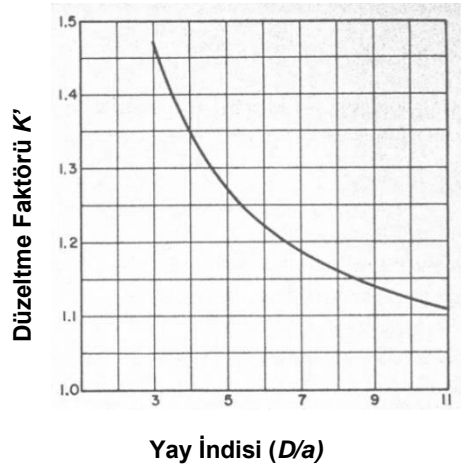
Burada; dış çap " D_0 ", iç çap " D_i ", orijinal tel kalınlığı " h " ve bozulmuş tel kalınlığı " h_1 " olarak ifade edilmiştir. Soğuk çekme malzemede $k = 0.3$, sıcak çekme malzemede ise $k = 0.4$ olarak alınmalıdır [6].

Dikdörtgen kesitli helisel yaylarda “ τ' ”, düzeltilmiş gerilme değerini ifade etmektedir. Bu gerilme değeri eğrisellik etkisini içermektedir. Hesaplamalarda “ K' ” düzeltme faktörü kullanılarak gerilme değeri hesaplanabilir.

$$K' = 1 + \frac{1.2}{c} + \frac{0.56}{c^2} + \frac{0.5}{c^3} \quad (2.19)$$

$$\tau' = K'\tau = \left(1 + \frac{1.2}{c} + \frac{0.56}{c^2} + \frac{0.5}{c^3}\right) \frac{2.4PD}{a^3} \quad (2.20)$$

Burada yay indisi ($C = \frac{D}{a}$), Şekil 2.10'daki grafikte ifade edilmiştir [6].



Şekil 2.10. Kare kesitli helisel yaylar için eğrisellik düzeltme faktörü [6]

Grafik incelendiğinde yay indisi oranı arttıkça düzeltme faktörü değerinin düştüğü görülmektedir. Kare kesitli helisel yaylar için deformasyon miktarı “ δ ”, Denklem (2.21)'deki gibidir [6].

$$\delta = \frac{5.59PD^3 N_a}{Ga^4} \quad (2.21)$$

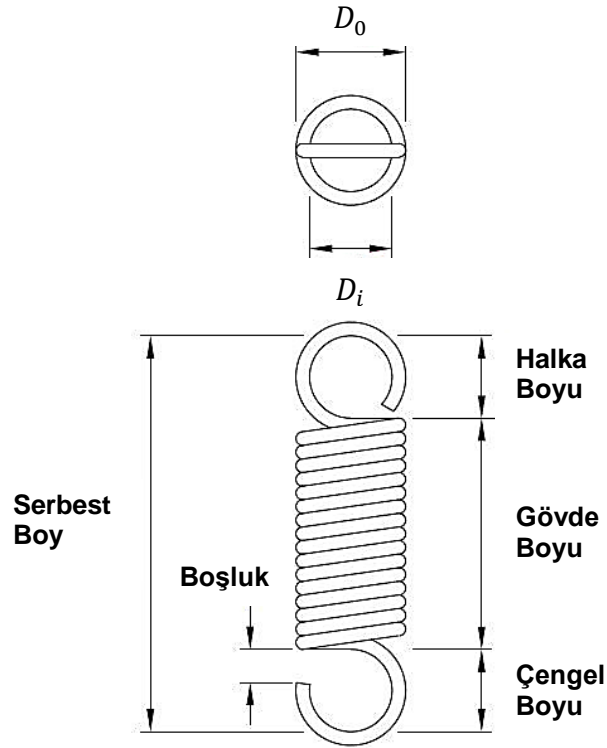
“ G ” rijitlik modülünü ve “ N_a ” aktif halka sayısını ifade etmektedir. Yay indisi 3 ile 4 arasında olduğunda bu formül teorik olarak %2 ile %4 arasında hatalı sonuç vermektedir. Çoğu uygulama için bu değer yeterlidir. [6]

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Ga^4}{5.59D^3 N_a} \quad (2.22)$$

Helis açısı arttıkça bu formülden elde edilecek sonuçlardaki hata miktarı artmaktadır. Bilindiği üzere değişken helis açısına sahip, değişik tipteki malzeme kesitine ve malzeme çeşitinde sahip helisel yaylar için literatürde bilgi yoktur.

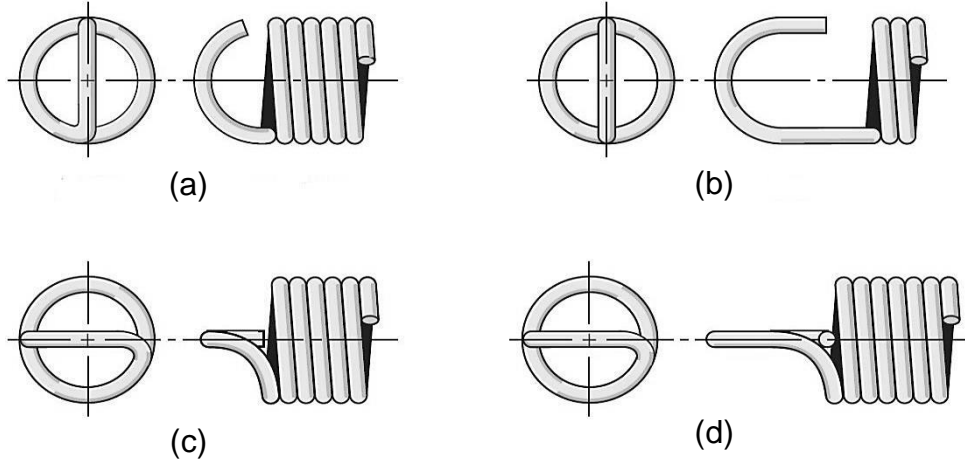
2.2.2. Helisel Çekme Yaylar

Helisel çekme yayların tipleri helisel basma yaylara benzemektedir. Çekme yükleri altında çalışırlar. Sarım halkaları arasındaki boşluk genellikle sıfırdır. Yay bitiş kısımları çengelli yapıdadır [4]. Şekil 2.11'de helisel çekme yay genel görünümü verilmiştir.



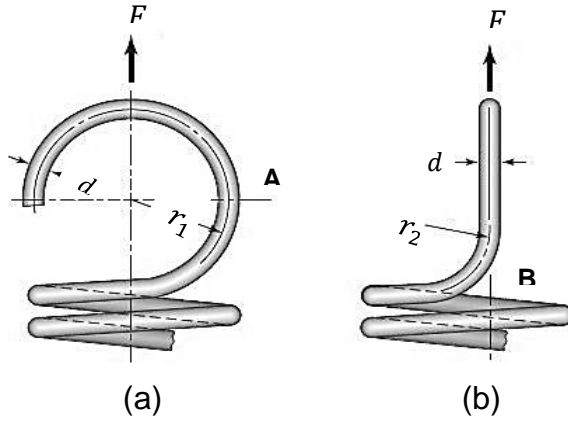
Şekil 2.11. Helisel çekme yay görünümü [3]

Yay bitiş kısımdaki çengel tipleri farklılık gösterebilmektedir. Şekil 2.12'de farklı çengel tiplerine sahip helisel çekme yaylar gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Helisel çekme yay bitiş tipleri: (a) Açık uçlu yarım çengel tipi, (b) Açık uçlu uzun çengel tipi, (c) Kapalı uçlu yarım çengel tipi, (d) Tam kapalı uçlu çengel tipi [4].

Helisel çekme yaylarındaki gerilmeler, helisel basma yaylardaki gerilmelere benzemektedir. Ancak bitiş kısımlarında ekstra eğilme ve burulma momentleri oluşur. Bu gerilmelerin hesaplamalara dahil edilmesi gerekir [4].



Şekil 2.13. Yaygın olarak kullanılan helisel çekme yay bitiş tipi: (a) Ön görünüm, (b) Yan görünüm [4].

Şekil 2.13'de verilen bitiş tipi, helisel çekme yaylardaki en yaygın bitiş tipidir. Eksenel bir F kuvveti ile yüklenmiş çekme yayında A noktasında oluşan maksimum çekme gerilmesi Denklem (2.23)'de verilmiştir.

$$\sigma_A = F \left[(K)_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \quad (2.23)$$

Burada “ $(K)_A$ ” eğri kiriş için eğilme gerilmesi düzeltme faktörüdür.

$$(K)_A = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad (2.24)$$

$$C_1 = \frac{2r_1}{d} \quad (2.25)$$

B noktasındaki maksimum burulma momenti ise;

$$\tau_B = (K)_B \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2.26)$$

Burada “ $(K)_B$ ” eğri kiriş için eğilme gerilmesi düzeltme faktörüdür.

$$(K)_B = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad (2.27)$$

$$C_2 = \frac{2r_2}{d} \quad (2.28)$$

Helisel çekme yaylarındaki sarım halkaları birbirlerine temas halinde olabilirler. Bu durum aralarında sıfır boşluk olduğu anlamına gelmektedir. Bitişik sarımlı yay olarak adlandırılır. Yay üreticileri, serbest yay boyunun düzenli ve daha doğru olması için sarım halkalarına öngerilme kuvveti verirler [4]. Eksenel kuvvetle yüklenmiş helisel çekme yaylarda, yay sabiti “ k ” Denklem (2.29)’daki eşitlikle hesaplanır.

$$k = \frac{F_0 - F_1}{\delta} = \frac{Gd^4}{8N_a D^3} \quad (2.29)$$

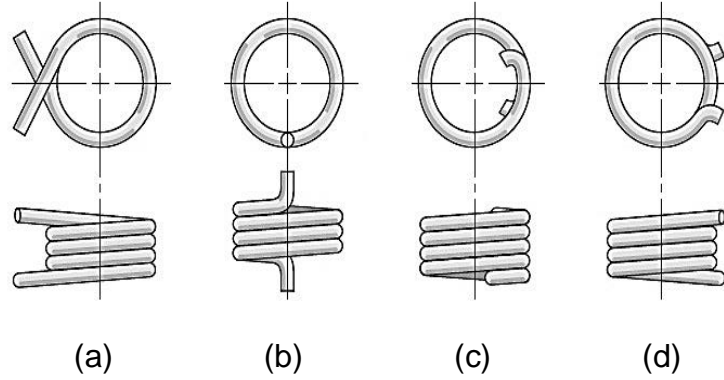
Çekme yaylar için yay indisi ($C = D/d$) değeri, 4-12 arasında olması tavsiye edilmektedir [3]. Yaylardaki deformasyon miktarı, Denklem (2.16)’ya ön gerilme kuvvetinin dahil edilmesiyle Denklem (2.30)’daki gibi bulunur.

$$\delta = \frac{8(F_0 - F_1)D^3 N_a}{d^4 G} \quad (2.30)$$

2.2.3. Helisel Burma Yaylar

Helisel yaylarda; uç kısımlarından radyal kuvvet uygulandığında yay üzerinde bu kuvvete tepki momenti oluşur. Yay üzerinde depolanan bu kuvvet ile tork elde etmek mümkündür. Bu amaçla kullanılan yaylara helisel torsiyon yayı adı verilmektedir. Helisel torsiyon yaylarında, kuvvet ve moment aktarımı yay bacaklarından sağlanmaktadır. Yay bacakları, tasarım gereksinimine göre

farklılıklar gösterebilir. Şekil 2.14'de farklı bitişlere sahip torsiyon yayları gösterilmiştir [3, 4].



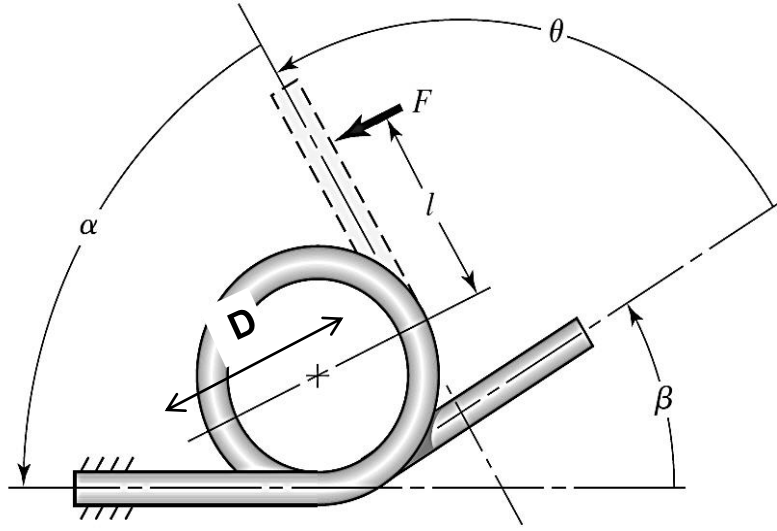
Şekil 2.14. Farklı bitişli helisel torsiyon yayları: (a) Düz bacaklı, (b) Dik bacaklı, (c) Çengel bitişli, (d) Kısa bacaklı [4]

Helisel torsiyon yaylarında, helis sarımları genellikle bitişik tiptedir. Bitişik tipte helisel sarımlı torsiyon yaylarında helisler arasındaki sürtünmeden dolayı doğrusal bir torsiyon elde edilemez. Eğer doğrusal bir torsiyon elde etmek isteniyorsa, helisel sarımlar arasında boşluk olması gerekir. Yay bacaklarından tek yönlü uygulanan kuvvet, yay üzerinde kuvvet dengesizliğine yol açar. Bu durumda yay geometrisinde eğilme meydana gelir. Bu nedenle uygulamalarda, genellikle yay içerisinden masterlık edecek bir mil ile kullanılmaktadırlar. Yay geometrisi, pim veya civata ile bağlantı tipine müsait değildir. Helisel torsiyon yaylarda, tel kesiti genellikle daireseldir. Ancak, daha yüksek moment değerleri elde edilmek istenildiğinde kare veya dikdörtgen kesitli olanlar da mevcuttur.

Helisel torsiyon yaylarında; bacakların birbirlerine göre konumları, hem hesaplamalar hem de tasarım açısından önemlidir. Ön gerilmesiz bir torsiyon yayında, yay bacaklarının birbirlerine göre konumu Şekil 2.15'de verilmiştir. Burada, " β " bacaklar arasındaki açığı göstermektedir. Bacakların birbirlerine göre tur sayısı ise;

$$N_p = \beta/360^\circ \quad (2.31)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 2.15. Helisel torsiyon yayı, yay bacakları konumları [4]

Burada; “ θ ” yay burulma açısını, “ α ” burulma arka açısını, “ F ” uygulanan kuvveti, “ D ” yay nominal çapını, “ l ” ise yay merkezine göre kuvvet kolunu temsil etmektedir [4]. Yay üzerinde uygulanan kuvvete karşı tepki momenti oluşmaktadır. Torsiyon yayının toplam sarım sayısı “ N_b ” Denklem (2.32)’de verilmiştir.

$$N_b = \text{Serbest yay halka sayısı} + \frac{\beta}{360^\circ} \quad (2.32)$$

Helisel torsiyon yaylarında, burulmadan dolayı yay teli üzerinde eğilme gerilmeleri meydana gelir. Eğilme gerilmelerini hesaplamak için eğri kiriş teoreminden faydalanılır.

$$\sigma = K \frac{Mc}{I} \quad (2.33)$$

Burada “ M ” eğilme momenti, “ K ” gerilme düzeltme faktörüdür. Düzeltme faktörü, tel kesit şekline bağlıdır [6]. Dairesel kesitli bir telin kesit modülü;

$$\frac{I}{c} = \frac{d^3}{32} \quad (2.34)$$

Eğilme momenti yerine Denklem (2.35) yazılırsa,

$$M = Fl = Fr \quad (2.35)$$

$$K_i = \frac{4C^2 - C - 1}{4C(C - 1)} \quad (2.36)$$

$$K_o = \frac{4C^2 + C - 1}{4C(C + 1)} \quad (2.37)$$

Burada " $C = D/d$ ", dairesel tel kesitli helisel yay indisidir. " K_i " yay telinin iç kısmı için, " K_o " ise yay telinin dış kısmı için geçerlidir. Dairesel kesitli gerilme hesaplamalarında ortak bir değer olarak ve her zaman daha büyük değere sahip olan " K_i " düzeltme faktörü kullanılır. Denklem (2.33)'deki $\left(\frac{l}{c}\right)$ eşitliği yerine Denklem (2.34) yazılırsa, yay üzerindeki eğilme gerilmesi,

$$\sigma = K_i \frac{32Fr}{\pi d^3} \quad (2.38)$$

olarak bulunur. Helisel torsiyon yaylarında açısal deformasyon, radyan cinsinden ya da tur miktarı olarak ifade edilir. Denklem (2.39)'da yay oranı " k' " tur cinsinden ifade edilmiştir.

$$k' = \frac{M_1}{\theta'_1} = \frac{M_2}{\theta'_2} = \frac{M_2 - M_1}{\theta'_2 - \theta'_1} \quad (2.39)$$

Helisel torsiyon yaylarında, deformasyon hesaplanırken yay bacağına uç kısımlarındaki açısal deformasyon miktarı da dikkate alınmalıdır. Ankastre giriş teoremine göre hesaplanırsa,

$$\theta_e = \frac{Fl^2}{3EI} = \frac{64Ml}{3\pi d^4 E} \quad (2.40)$$

Helisel torsiyon yaylarında, sarım halkalarındaki deformasyon miktarının da dikkate alınması gerekmektedir. Eğilmeden dolayı oluşan gerinim enerjisi,

$$U = \int \frac{M^2 dx}{2EI} \quad (2.41)$$

" F " kuvvetinin yay burulma açısı " θ " miktarı oluşuna kadar toplamda " $r\theta$ " kadar mesafe aldığı dikkate alarak; integral sınırları, yay teli boyunca olacak şekilde Castigliano teoremi Denklem (2.42)'de uygulanmıştır.

$$r\theta = \frac{\partial U}{\partial F} = \int_0^{\pi DN_b} \frac{\partial}{\partial F} \left(\frac{F^2 r^2 dx}{2EI} \right) = \int_0^{\pi DN_b} \frac{F^2 r^2 dx}{EI} \quad (2.42)$$

Denklem (2.42)'deki " I " yerine dairesel kesitli tel için Denklem (2.43)'deki eşitlik yazılır.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.43)$$

$$\theta = \frac{64FrDN_b}{d^4E} = \frac{64MDN_b}{d^4E} \quad (2.44)$$

Torsiyon yay bacak uzunlukları “ l_1 ” ve “ l_2 ” olarak kabul edip toplam açısal deformasyon miktarı Denklem (2.45)’deki gibi hesaplanır.

$$\theta_t = \frac{64MDN_b}{d^4E} + \frac{64Ml_1}{3\pi d^4E} + \frac{64Ml_2}{3\pi d^4E} = \frac{64MD}{d^4E} \left(N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \right) \quad (2.45)$$

Aktif tur sayısının eş değeri olarak “ N_a ”,

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \quad (2.46)$$

Açısal yay sabiti “ k_θ ”, Denklem (2.47)’deki gibi hesaplanır.

$$k_\theta = \frac{Fr}{\theta_t} = \frac{M}{\theta_t} = \frac{d^4E}{64DN_a} \quad [Nm/rad] \quad (2.47)$$

Yay sabitinin tur cinsinden ifadesi için “ k' ”,

$$k' = \frac{2\pi d^4E}{64DN_a} = \frac{d^4E}{10.2DN_a} \quad (2.48)$$

Yapılan testlere göre sarım halkaları arasındaki sürtünmelerden dolayı Denklem (2.48)’deki 10.2 katsayısı, 10.8 değerine yükselmektedir [4].

$$k' = \frac{d^4E}{10.8DN_a} \quad (2.49)$$

Denklem (2.45) yeniden düzenlenirse,

$$\theta' = \frac{10.8MD}{d^4E} \left(N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \right) \quad (2.50)$$

Elde edilen bu denklemlere göre helisel torsiyon yaylarda hesaplamalar yapılmaktadır. Helisel torsiyon yaylarda tel kesiti dairesel yerine kare veya dikdörtgen olduğunda bu Denklemlerin düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun için Walh’ın yaptığı analitik çalışmaya göre kare veya dikdörtgen tel kesitli helisel torsiyon yaylarında düzeltme faktörü “ K_2 ” Denklem (2.51)’deki gibi elde edilir.

$$K_2 = \frac{3C^2 - C - 0.8}{3C(C - 1)} \quad (2.51)$$

$$C = D/h \quad (2.52)$$

Burada “ h ”, radyal yöndeki kesit kenar uzunluğunu temsil etmektedir. Kare kesitli helisel torsiyon yaylarında açısal deplasman miktarı tur cinsinden Denklem (2.53)’deki gibidir [6].

$$\theta' = \frac{6MDN_a}{Eh^4} \quad (2.53)$$

Yay üzerindeki gerilme ise Denklem (2.54)'deki gibi elde edilir [6].

$$\sigma = K_2 \frac{6M}{h^3} \quad (2.54)$$

Dikdörtgen kesitli tel sarımlı helisel torsiyon yaylarında açısal deplasman miktarı tur cinsinden Denklem (2.56)'daki gibi ifade edilir.

$$\sigma = K_2 \frac{6M}{h^3} \quad (2.55)$$

$$\theta' = \frac{6MDN_a}{Ebh^3} \quad (2.56)$$

Yay üzerindeki gerilme ise Denklem (2.57)'deki gibidir [6].

$$\sigma = K_2 \frac{6M}{bh^2} \quad (2.57)$$

2.3. Helisel İşleme Yaylar

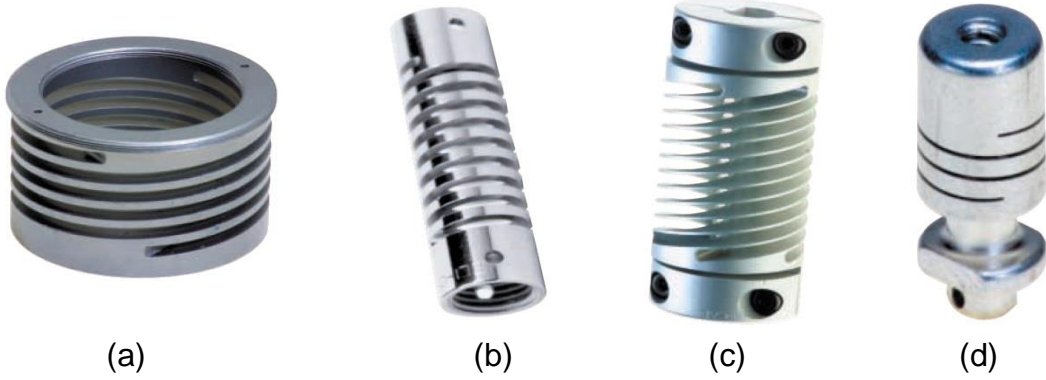
Geleneksel tipteki yaylar, sanayi devrimi çağından itibaren kullanılmaktadırlar. Günümüzdeki modern makinaların ihtiyacını geleneksel tipteki yaylar her zaman karşılayamamaktadır. Bu nedenle geleneksel tipteki yaylar yerine farklı arayışlar ortaya çıkmıştır.

Bu tezde çalışılan işleme yaylar, geleneksel tipteki helisel yaylarla aynı amaç için kullanılırlar. Talaşlı imalat üretim teknikleriyle elde edilirler. Özel tasarım alanları için geleneksel tipteki yaylara göre daha yüksek performans ve daha fazla fonksiyon elde etmek için tercih edilirler. Kullanılacakları yere uygun bağlantı arayüzü ile bir bütün halinde olmaları en büyük özelliklerindedir. Şekil 2.16'da farklı kullanım alanları için üretilmiş işleme yaylar gösterilmiştir [8].



Şekil 2.16. Farklı tipteki işleme yaylar [9]

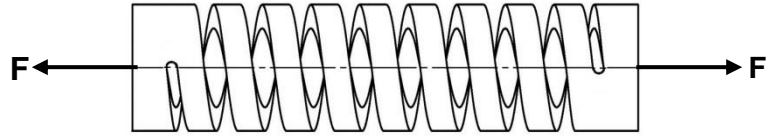
İşleme yaylar, yüksek açısal deformasyonlarda doğrusal yay sabiti sağlayabilmektedirler. Havacılık ve uzay sektörü, medikal uygulamalar gibi alanlarda tercih edilmektedirler [8]. Şekil 2.17’de farklı sektör ve uygulamalarda kullanılmış işleme yay görselleri verilmiştir.



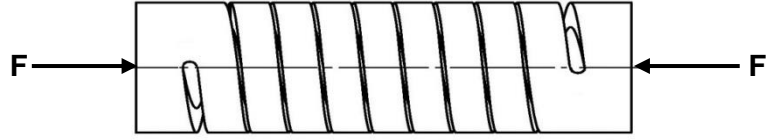
Şekil 2.17. Farklı Sektörlerde Kullanılan İşleme Yay Modelleri; (a) Hubble teleskop, (b) Mars aracı, (c) Medikal uygulama, (d) Uçak Elektronikleri [9]

2.3.1. İşleme Yay Mekanik Tasarım Özellikleri

İşleme yaylar; çekme, basma, burma, yanıl eğilme ve yanıl ötelenme durumlarında çalışmaktadır. Şekil 2.18’de çekme ve basma yükleri altında çalışan yay tipleri verilmiştir.



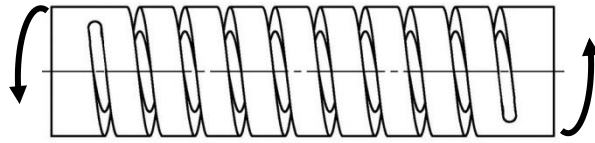
(a)



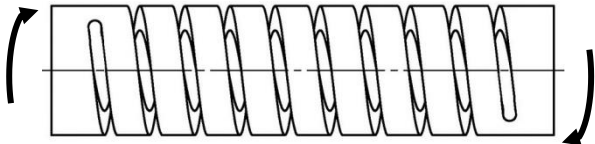
(b)

Şekil 2.18. Çekme ve basma yüklerinde çalışan işleme yay modelleri: (a) Çekme yükü işleme yay modeli, (b) Basma yükü işleme yay modeli [10]

Çekme ve basma yükleri altında çalışan işleme yaylarda; yay bitiş kısımlarının tasarımı, yay doğrusallığını arttırmaktadır [9]. Burma yükleri altında çalışan işleme burulma yaylarına ait çalışma yönleri Şekil 2.19'da verilmiştir.



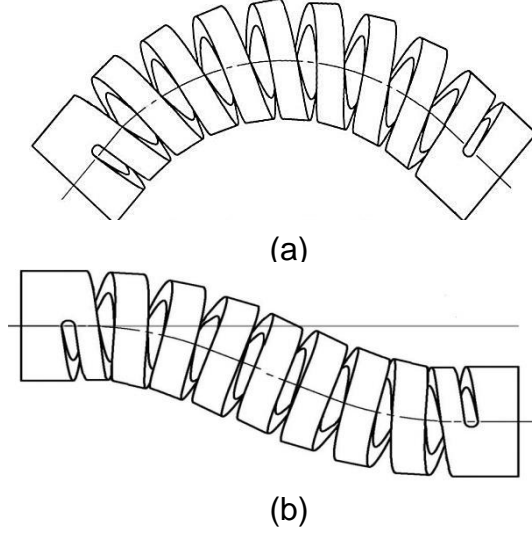
(a)



(b)

Şekil 2.19. İşleme burulma yay çalışma yönleri: (a) Açma yönü, (b) Kapama yönü [10]

İşleme yaylar, açma ve kapama yönleri çalışma koşullarında doğrusal davranış sergilemektedir. Yanal eğilme ve yanal ötelenme çalışma tipleri Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20. İşleme yay yanal eğilme ve yanal ötelenme çalışma durumları: (a) Yanal eğilme, (b) Yanal ötelenme [10]

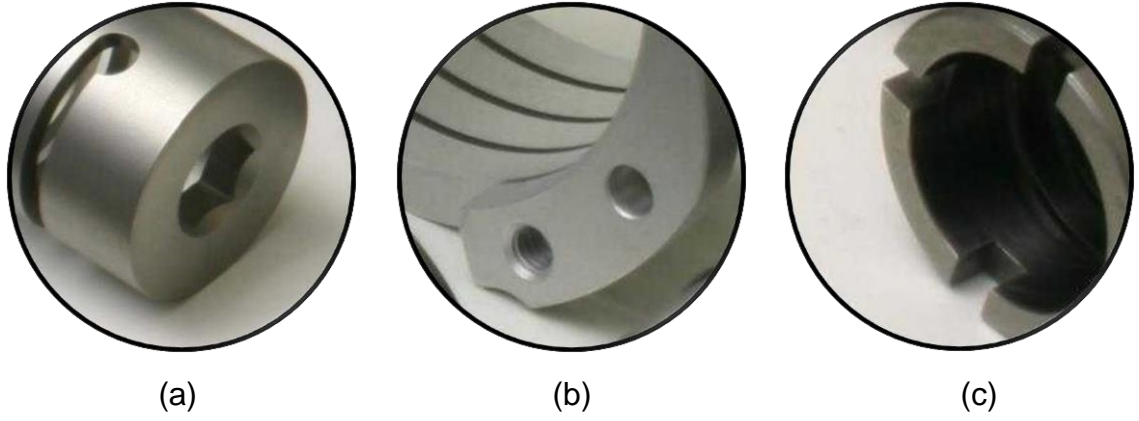
İşleme yaylarda; yay üzerindeki en yüksek gerilmeler, helis bitiş kısımlarında olmaktadır. Bu kısımlardaki gerilmeleri bütün yay üzerine yayabilmek ve yay üzerinde oluşabilecek hasarları önlemek için gerilme rahatlatma delikleri açılmaktadır. Bu gerilme rahatlatma delikleri, yay ömrünü önemli ölçüde artırmaktadır [9]. Gerilme rahatlatma delikleri, Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. İşleme yay gerilme rahatlatma deliği [9]

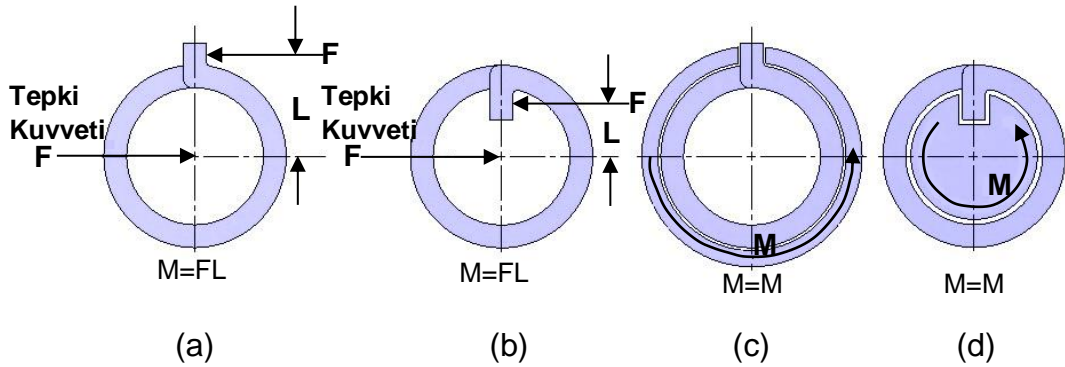
İşleme yaylarda, tasarım isterlerine bağlı olarak farklı tiplerde bağlantı arayüzü tasarımı yapılabilmektedir. Bağlantı arayüzünün yay ile bütün halinde olması, en

önemli özelliklerindedir. Yaygın olarak tercih edilen farklı tiplerdeki bağlantı arayüzü örnekleri Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22. İşleme burulma yay bağlantı tipleri: (a) Altıgen tip, (b) Pim delikli tip, (c) Kanallı tip [9]

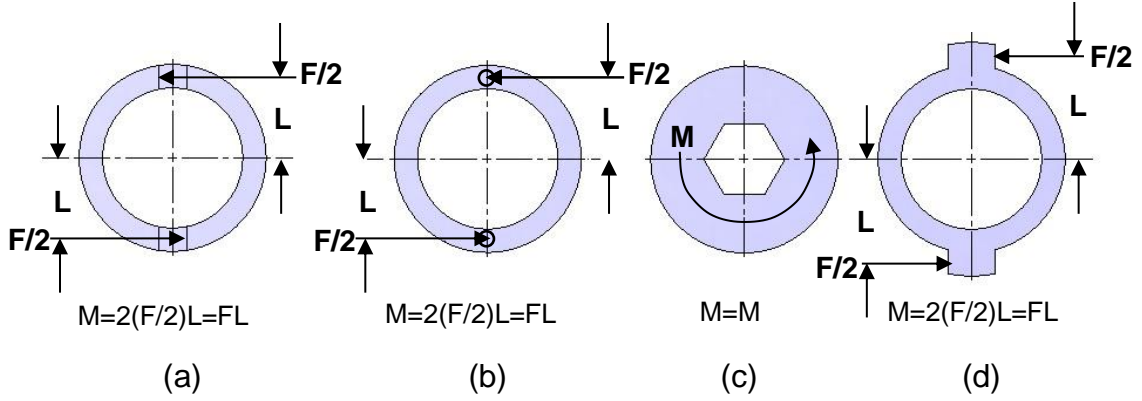
Bağlantı arayüzü tasarımı, uygulanan momentin yay üzerinde dengeli dağılımı ile doğrudan ilişkilidir. Yay üzerine uygulanacak kuvvete karşı oluşacak kuvvetler, burkulmalara ve yayın burulma moment miktarında düşüşlere sebep olur. İşleme yaylarının bağlantı arayüz tasarımları, dengelenmemiş kuvvetlerin oluşmasını engelleyecek biçimdedir. Bu durum, tel sarımlı yaylara göre daha yüksek performans ve saf moment elde etmeye yaramaktadır. Şekil 2.23’de tel sarımlı burulma yaylara ait bağlantı tipleri verilmiştir [10].



Şekil 2.23. Tel sarımlı farklı bitişlere sahip burulma yaylar üzerindeki momentler: (a) Dıştan çengelli, (b) İçten çengelli, (c) Dıştan destekli, (d) İçten destekli [10]

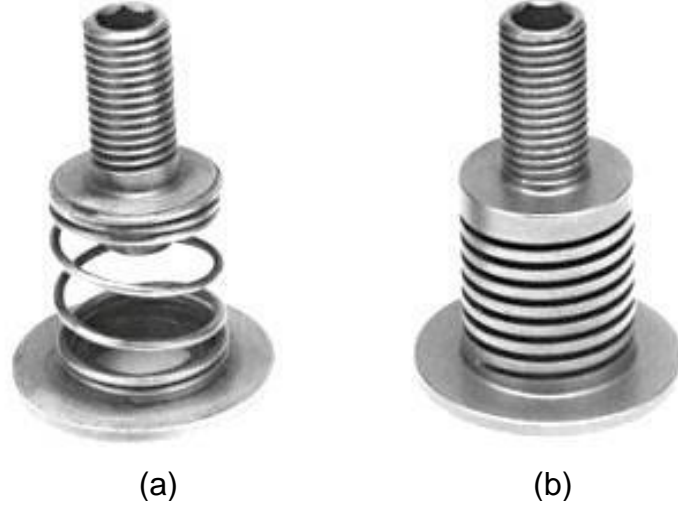
Şekil 2.23(a) ve (b)’deki gibi bir bağlantı tipine sahip tel sarımlı burulma yaylarında, uygulanan F kuvvetine karşılık tepki kuvveti olarak yay merkezine doğru bir F

kuvveti oluşur. Bu durum, burulma yayının burkulmasına ve istenilen moment değerinin altında bir moment elde edilmesine sebep olabilir. Aynı zamanda, Şekil 2.23(c) ve (d)'deki gibi bir bağlantı tipiyle yüklenen tel sarımlı burulma yayları ise, çalıştıkları alan içerisinde sıkışarak sistemde kasılmalara sebep olabilir. Görüldüğü gibi tel sarımlı burulma yaylarının bağlantı tipi yay performansını doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.24'de ise, burulma yüklemesi altındaki işleme yaylarına ait bağlantı tipleri verilmiştir.



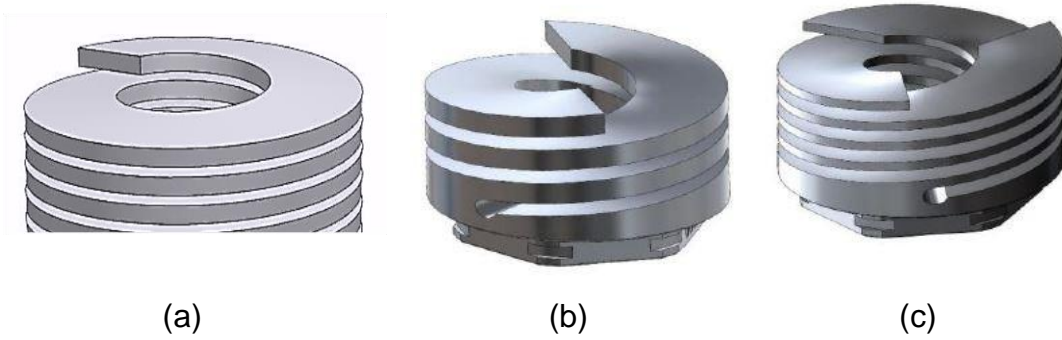
Şekil 2.24. Farklı bitişlere sahip işleme burulma yaylar üzerindeki momentler: (a) Yarık tip, (b) Delikli tip, (c) Altıgen tip, (d) Çentikli tip [10]

İşleme yaylarının bitiş tipleri, yay üzerine uygulanan kuvvetin dengeli biçimde dağılmasını sağlamaktadır. Yaylar üzerinde tepki kuvvetleri oluşmamaktadır. Kuvvet çiftleri birbirlerini dengelemektedir. Bu durum, işleme burulma yaylarda burkulma durumunu en aza indirmektedir. Yaylardan saf moment elde edilebilmektedir. Bağlantı arayüzünün yay ile bütün halinde olması, yay bağlantısını sağlayabilmek için gerekli parça sayısını en aza indirmektedir. Bu durum, yayların kullanıldığı tasarımları basitleştirmekte ve güvenilirliklerini arttırmaktadır. Şekil 2.25'de aynı tasarım alanında kullanılacak tel sarımlı yay ile işleme yayın kıyaslaması yapılmıştır. Tel sarımlı bir yayın tercih edilmesi durumunda üç farklı parçanın birleştirilerek kullanılması gerekirken, işleme yay kullanılması durumunda ise yalnızca tek parça kullanılmaktadır.



Şekil 2.25. Aynı boyutlardaki yaylar: (a) Tel sarımlı yay, (b) İşleme yay [11]

İşleme yaylar, birden fazla helise sahip şekilde üretilebilirler. Helis sayısının fazla olması yayın denge ve performansını arttırmaktadır. Yaylardaki serbestlik derecesini düşürebilmek için helis sayısının artırılması gerekir. İşleme yaylarda serbestlik derecesi bir ile sınırlandırılabilirken, tel sarımlı yaylarda serbestlik derecesi altıdır. Tel sarımlı yaylarda, yalnızca bir adet helis bulunur. Şekil 2.26'da farklı helis sayısına sahip işleme yaylar gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Farklı helis sayısındaki işleme yaylar: (a) Tek helisli yay, (b) İki helisli yay, (c) Üç helisli yay [12]

İşleme yayların yay sabiti, farklı yükleme kuvvetleri altında önemli ölçüde değişmemektedir. Bu durum, yayların doğrusal davranış göstermesini sağlamaktadır. Bu özellik, pek çok statik ve statığe yakın elastik uygulamalar için oldukça yararlıdır [10].

2.3.2. İşleme Yaylarda Kullanılan Malzeme Tipleri

İşleme yaylar, farklı yükleme koşulları altında çalışabilmektedir. Bu koşullara en uygun malzeme seçiminin yapılması gerekir. Yay helisleri ve gerilme rahatma delikleri etrafında yüksek gerilmeler meydana gelebilir. Yay malzemesinin bu durumlarda yapısal başarısızlığa uğramaması için tavlama ve ısıtma işlem görmesi gerekir. İşleme yaylarda, çalışma koşullarına en uygun malzeme seçimi yapılır. İşleme yaylarda kullanılan malzemeler;

- Korozyona Dayanıklı Orta Dayanımlı Çelikler
 - 17-4 PH
 - 15-5 PH
 - CC455
- Yüksek Dayanımlı Çelik
 - C300
 - C350
- Demir Dışı Alaşımlar
 - Alüminyum 7075-T6
 - Alüminyum 7068-T6511
 - Titanyum 38644 Beta C
- Plastikler
 - Derlin 100
 - Ultem 2300
 - Polikarbonat ,şeklindedir. [8, 13]

Tel sarım yaylarda malzeme yorulma direncini arttırmak için tel malzemedeki haddeleme yapılabilmektedir. Ancak işleme yaylarda bu mümkün değildir. Bu nedenle işleme yaylarda kanal bitim kısımlarında gerilme rahatlatma boşlukları bırakılmaktadır (Şekil 2.21). Ayrıca, seçilen malzemenin yüksek dayanımlı olması yorulma direncini arttıran önemli bir özelliktir.

2.3.3. İşleme Yaylar ile Tel Sarımlı Yayların Karşılaştırılması

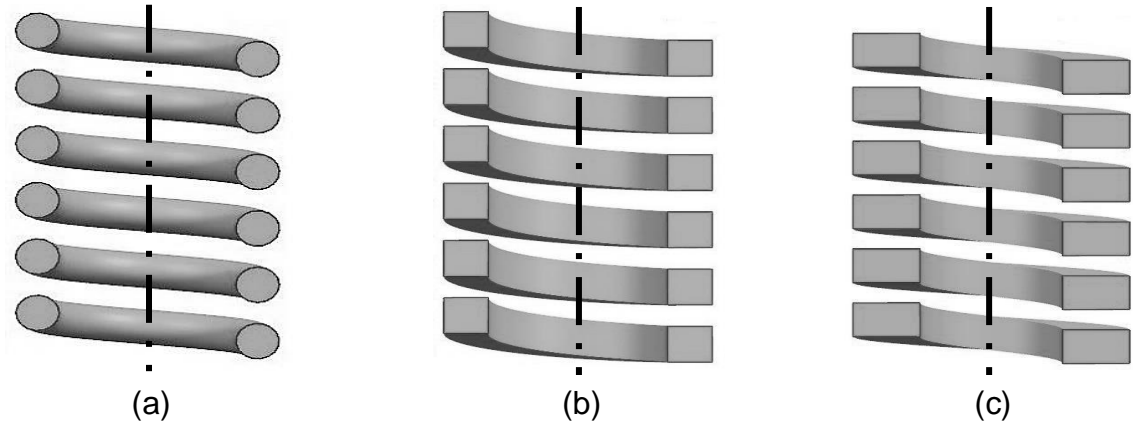
İşleme yaylar, geleneksel tipteki sarım yaylarla aynı amaçlar için kullanılırlar. Fakat, üretim yöntemleri farklıdır. İşleme yayların üretiminde, işlenebilir metal, plastik birçok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Metal malzemelerin kullanıldığı

durumda genelde izlenen üretim yöntemi çubuk halindeki malzemenin içinin boşaltılması, yay için gerekli bağlantı arayüzleri oluşturulması ve daha sonra yay halkalarının işlenmesi şeklindedir. İşleme yayların maliyeti, tel sarım yaylara göre daha fazladır. Tel sarımlı yaylar, birkaç saniye içerisinde üretilebilirken işleme yayların üretim süresi daha uzundur. İşleme yayların üretiminde bilgisayar kontrollü üretim makinaları kullanılmaktadır. Şekil 2.27'de küçük ebatlardaki tel sarım yaylarla işleme yaylara ait örnekler verilmiştir [8].



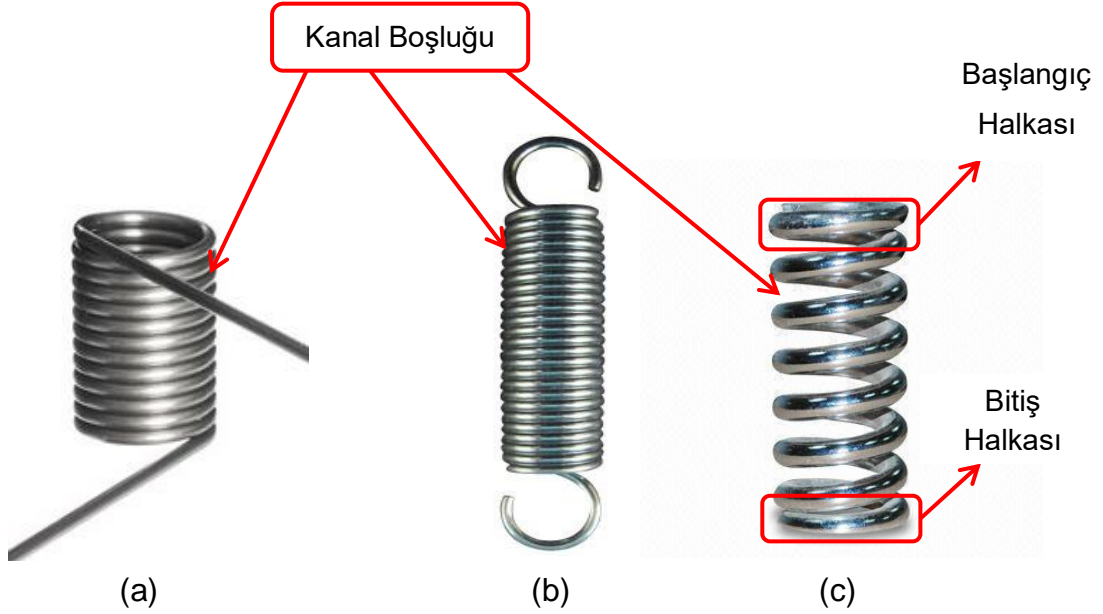
Şekil 2.27. Küçük yay örnekleri: (a) Tel sarım yaylar, (b) İşleme yaylar [8]

Tel sarım yayların yay kesiti; dikdörtgen, kare veya yuvarlak olmaktadır (Şekil 2.28). Ancak işleme yaylarda, yay kesiti üretim tekniklerine uygun olmadığından dolayı yuvarlak olarak üretilmemektedir. Dikdörtgen veya kare çeşitleri vardır.



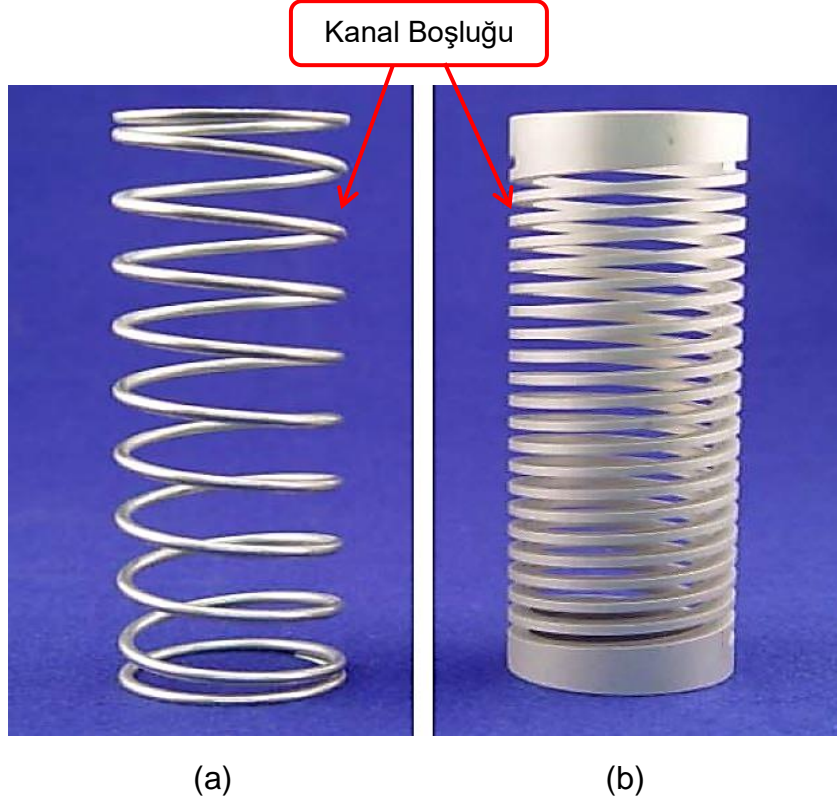
Şekil 2.28. Farklı tipteki yay kesitleri: (a) Yuvarlak kesit, (b) Kare kesit, (c) Dikdörtgen kesit

Şekil 2.29'da helisel yaylardaki kanal boşlukları gösterilmiştir. Bu yaylarda, halkalar arasındaki mesafe "kanal boşluğu" olarak adlandırılmıştır. Tel sarımlı burulma yaylarında kanal boşlukları genellikle eşit mesafede ve birbirlerine bitişik vaziyette olmaktadır. Tel sarım basma yaylarında ise halkalar arasındaki kanal boşluğu eşittir. Ancak, yay başlangıç ve bitiş halkaları eşitliği bozmaktadır. Tel sarımlı çekme yaylarında ise halkalar arasındaki boşluk miktarı genellikle sıfır olmaktadır.



Şekil 2.29. Tel sarım yay kanal boşlukları: (a) Helisel burulma yayı, (b) Helisel çekme yay, (c) Helisel basma yay [14]

İşleme yaylarda ise, minimum kanal boşluğu 0.5 mm mertebelerinde, maksimum kanal boşluğu ise 6.35 mm mertebelerinde olmaktadır. İşleme yaylarda, tel sarımlı yaylardaki gibi başlangıç ve bitiş kısımlarındaki kanal boşluk mesafesi değişmemektedir. Kanal boşluk mesafesinin düzgün dağılımı, yüksek hassasiyet ve yüksek tekrarlanabilirlik elde etmeye yaramaktadır [8]. Şekil 2.30'da aynı çap ve boy ölçüsüne sahip sarım yay ve işleme yay kanal boşlukları karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.30. Yay kanal boşluğu karşılaştırması: (a) Helisel basma Yay, (b) İşleme yay [8]

İşleme yaylar ile sarım yayların halka sayıları farklılık göstermektedir. Sarım yayların halka sayısı çok fazla olabilir. Fakat, işleme yaylarda halka sayısı 30 ile limitlidir. Genellikle 20'yi geçmemektedir [8].

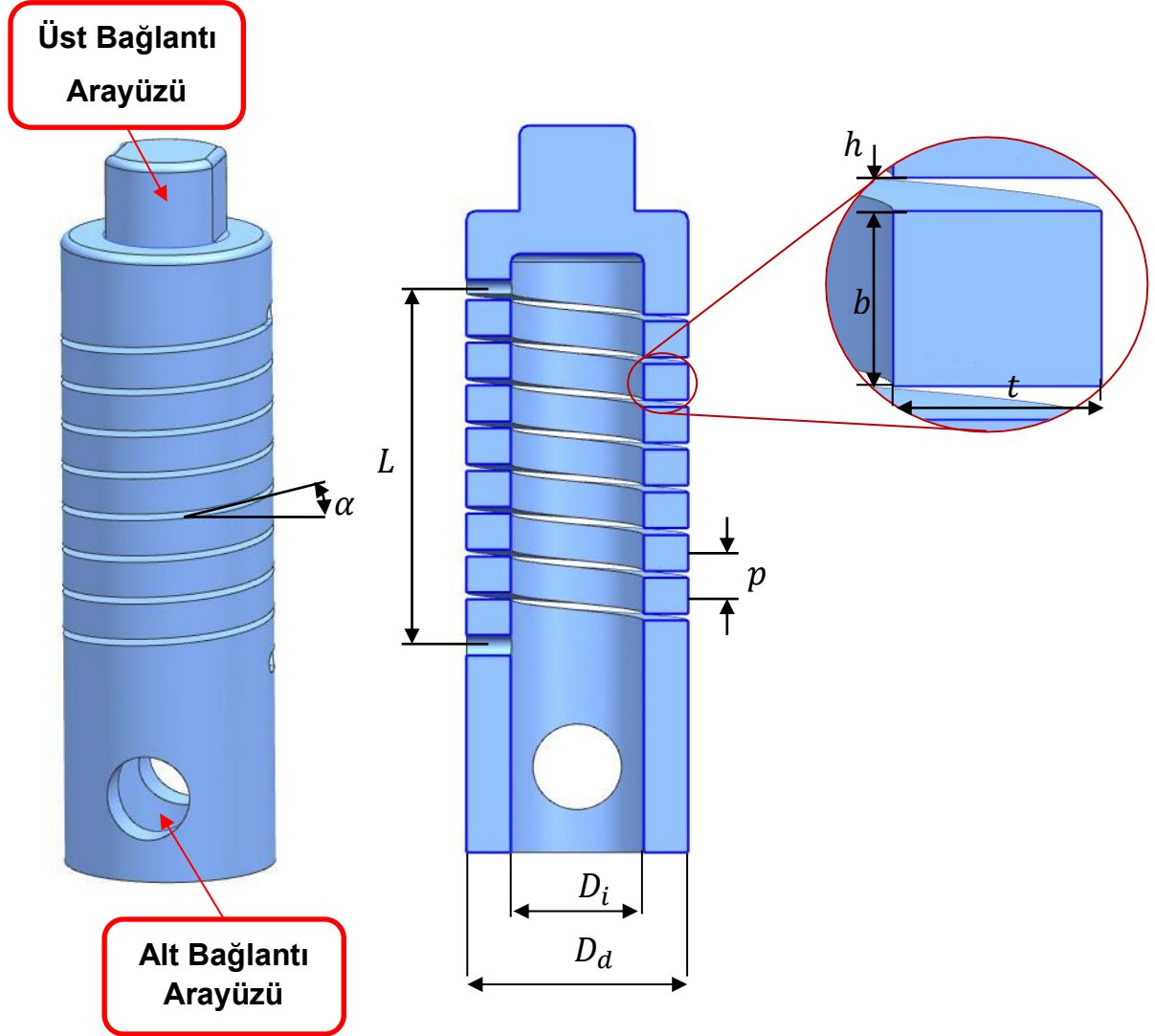
Sarım yaylarda ebatlar geniş çeşitlilik göstermektedir. İşleme yaylarda ise yay boyutları işleme tezgahlarının kapasitesiyle sınırlıdır. İşleme yaylarda elde edilen en küçük çap 2.54 mm, en büyük çap ise 152 mm'dir. En büyük yay boyu ise 610 mm'dir [8]. İşleme yaylarla, tel sarım yayların farkları Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Yay özellikleri karşılaştırma tablosu [8]

		SARIM YAYLAR	İŞLEME YAYLAR
Kesit Tipi	• Yuvarlak	Evet	Hayır
	• Kare	Evet	Evet
	• Dikdörtgen(Açısal)	Evet	Evet
	• Dikdörtgen (Yüksek Oranda Açısal)	Hayır	Evet
	• Dikdörtgen	Evet	Evet
	• Dikdörtgen,(En-Boy oranı fazla)	Evet	Evet
Kanal Boşluğu	• Sıfır Boşluk	Evet	Evet (özel üretim yöntemleri)
	• Sıfır boşluk (ÖnGerilmeli)	Evet	Hayır
	• 2.54 mm boşluk	Evet	Evet
	• 6.35 mm'den fazla boşluk	Evet	Nadir
Halka Sayısı	• 1	Evet	Evet
	• 20	Evet	Evet
	• 50	Evet	Belki
Kuvvet Hassasiyeti	• %10	Evet	Evet
	• %1	Belki	Evet
	• %0.1	Hayır	Belki

2.3.4. İşleme Yay Boyutsal Parametreleri ve Burulma Katsayısı Hesaplamaları

İşleme yayların tasarımını oluşturan birtakım boyutsal ölçüler bulunmaktadır. Bu boyutsal ölçülerin işleme yay üzerindeki gösterimi, Şekil 2.31’de verilmiştir.



Şekil 2.31. İşleme yay boyutsal parametreler

Buradaki boyutsal parametrelerin ifadeleri aşağıdaki gibidir.

L	:Helis Boyu [mm]	h	:Kanal Boşluğu [mm]
p	:Helis adımı [mm]	b	:Eksenal Et Kalınlığı [mm]
D_i	:İç çap [mm]	t	:Radyal Et Kalınlığı [mm]
D_d	:Dış çap [mm]	α	: Helis Açısı [°]

Helisel işleme yaylar, geleneksel tipteki yaylara göre oldukça yeni tipteki yaylardır. Literatürdeki pek çok formül, geleneksel tipteki yaylar için türetilmiştir. Geleneksel tipteki yaylar için türetilen formüllerin işleme yaylar için ne ölçüde kullanılabilir oldukları, araştırılması gereken bir konudur. İşleme yaylarda, burulma yay sabitinin (k_t) hesaplanmasında Denklem (2.58) kullanılmaktadır [15].

$$k_t = \frac{Ebt^3}{2160D_m N_a} \quad (2.58)$$

Burada, " D_m " ortalama çap değerini ve " N_a " ise aktif tur sayısını ifade etmektedir.

$$D_m = \frac{(D_i + D_d)}{2} \quad (2.59)$$

2.4. Önceki Çalışmalar

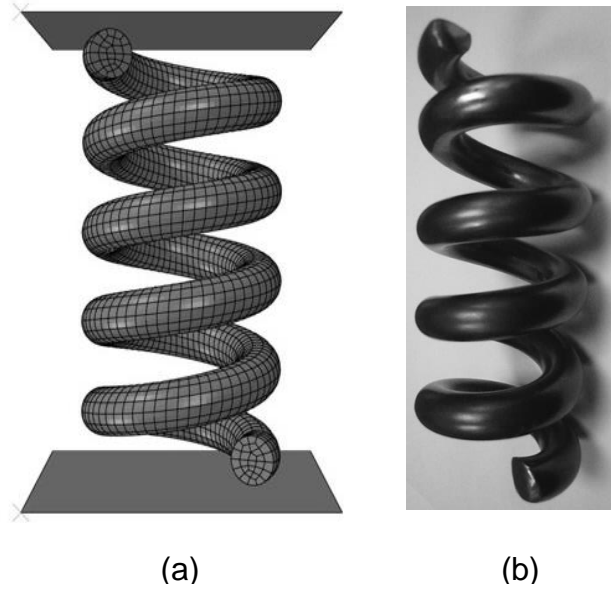
Helisel yaylarla ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak, bu tezin konusunu oluşturan helisel işleme yaylarla ilgili literatürde bilgi nadirdir. Bu nedenle hem işleme helisel yaylarla ilgili çalışmalar hem de helisel yaylarla ilgili çalışmalar incelenmiştir. Tezin konusu çerçevesinde deneysel ve nümerik çalışmalar mevcuttur.

İşleme yayların mekanik benzetimi için kullanılan en yaygın nümerik metod, sonlu elemanlar yöntemidir. Salwiski ve Michalczyk [16], işleme yaylarda sonlu elemanlar yöntemleriyle gerilme analizi yapmışlardır. Geleneksel yaylar için olan teorik formüllerle de hesaplamalar yapmışlardır. Teorik formüllerden elde ettikleri gerilmeler, gerçek gerilmelerden daha küçük çıkmıştır. Çünkü, yay deformasyonunun yalnızca burulma gerilmelerinden etkilendiğini ve yayın simetrik yüklendiğini kabul etmişlerdir. Ahmed ve arkadaşları [17], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak işleme yayların statik ve dinamik karakteristik özelliklerini araştırmıştır. Üç kanallı ve dört kanallı iki farklı işleme yayı kıyaslamıştır. Bu çalışmanın sonucunda, dört kanallı yayın üç kanallı yaydan daha yüksek katılık ve daha yüksek doğal frekans değerlerini gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. V. Brijpuria ve Jain [18], ANSYS programını kullanarak helisel yaylarda şekil optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Yayın, statik kuvvetle yüklendiğini varsaymışlardır. Çalışma sonucunda tasarım sınırları içerisinde kullanılacak minimum ağırlıkta yay elde etmeyi amaçlamışlardır. Nama [19], dikdörtgen kesite sahip helisel

yaylarda, Solidworks programını kullanarak maksimum gerilme, maksimum deformasyon ve doğal frekans değerlerini araştırmıştır. Teorik ve nümerik sonuç çıktıları ile sonuçları kıyaslamıştır. Choube ve Bhope [20], ANSYS programını kullanarak, dairesel, kare ve dikdörtgen kesite sahip yayların gerilme ve burkulma performansını incelemiştir. Ayrıca analitik yöntemlerle de hesaplamalar yapmışlardır. Sonuç olarak dairesel kesitli yaylarda, yay deformasyonu ve kesme gerilmelerinin kare ve dikdörtgen kesitli yaylara göre daha küçük olduğunu ortaya koymuşlardır. Zeydan [7], işleme basma yaylarda; basma yükü altında helis açısının yay uç kısımlarındaki deformasyona etkisini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda helis açısı arttıkça yay uç kısımlarındaki deformasyonun arttığı sonucuna ulaşmıştır. Poul ve Nikam [21], CATIA ve UNI Graphics katı modelleme yazılımlarını kullanarak, periyodik yükler altında helisel basma yayların yorulma analizini yapmışlardır. Yıldırım [22], helisel yayların doğal frekanslarını bulmaya yönelik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmasında, 12 serbestlik derecesine sahip helisel yayları taşıma matrisi yöntemlerinden faydalanarak direngenlik matrisini oluşturmuştur. Bu matrisin çözümü için nümerik yöntemlerden faydalanmıştır.

Literatürde sonlu eleman yöntemi çalışmaları dışında analitik çalışmaların da yapıldığını görmekteyiz. Krzysztof [23], işleme yaylarda maksimum gerilmeyi hesaplamak için bir matematik modeli önermiştir. Bu model, gerilme yığılma katsayısı ve gerilme dağılımı katsayısının maksimum gerilme üzerindeki etkilerini içermektedir. Ahmed ve arkadaşları [24], işleme yayların katılığı üzerinde analitik ve teorik çalışmalar yürütmüştür. Bunun sonucunda, yay üzerindeki kanal sayısı arttıkça yayın katılığının ve doğal frekans değerlerinin arttığını ortaya koymuştur. Taktak [25], silindirik izotropik helisel yayın doğal frekans hesaplamaları ve dinamik analizi için analitik model geliştirmiştir. Bu modelde karma-hibrit formülasyonu kullanarak katılık matrisi elde etmiştir. Calderon ve Perez [12], işleme yaylar ile geleneksel tel sarım yayları, avantaj ve verimlilik bakımından kıyaslamışlardır. İşleme yayların özel tasarımlar için daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Nama [26], dikdörtgen kesite sahip işleme yaylarda, helis açısının yay uzama miktarına ve yay üzerinde oluşan kesme gerilmelerine etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, farklı helis açılarına sahip yay geometrileri kullanmıştır. Helis açısının artması sonucunda, yay uzama miktarının arttığını ve yay üzerindeki kesme gerilmelerinin azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Mirzaeifar ve arkadaşları [27],

şekil hafızalı alaşımdan yapılmış helisel yay için analitik, numerik ve deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, helisel yayın aksenal yüklendiği durumu düşünmüşlerdir. Analitik çalışmalarında, eğri kiriş gerilme etkisinin olduğu ve eğri kiriş gerilme etkisini ihmal ettikleri farklı durumları irdelemişlerdir. Analitik sonuçları, yapmış oldukları sonlu eleman çalışmalarıyla kıyaslamışlardır. Şekil 2.32'de, kullanmış oldukları sonlu eleman modeli ve deneysel çalışmalarda kullandıkları yay görselleri verilmiştir.



Şekil 2.32. (a) Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen şekil hafızalı yay, (b) Deneysel çalışmalarda kullanılan şekil hafızalı yay [27].

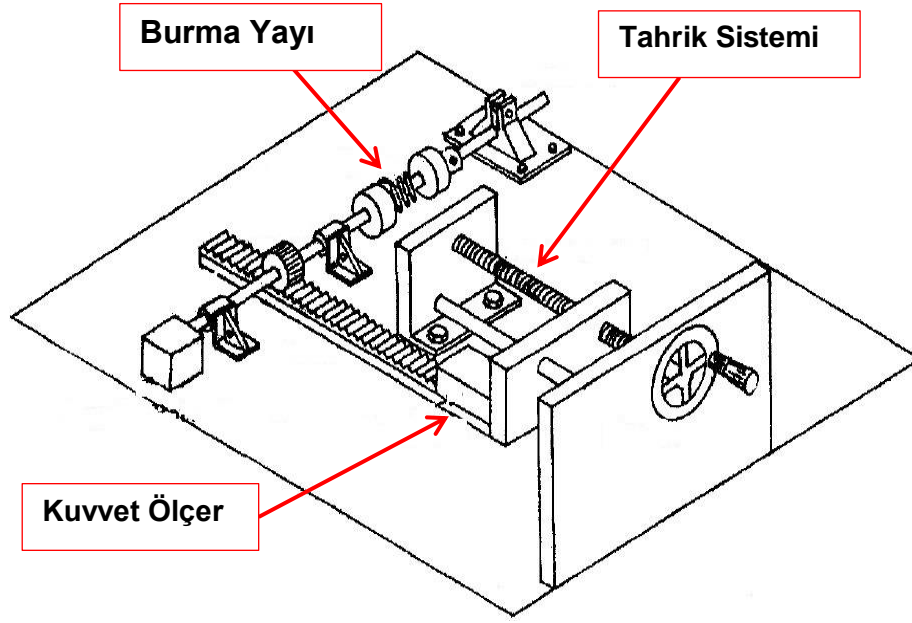
Tüm sonuçları, deneysel ortamda aksenal olarak yüklenmiş yay sonuçları ile kıyaslamışlardır. Farklı yay parametrelerinin, malzeme özelliklerinin ve ortam koşullarının yay performansı üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Wu ve Hsu [28], yapmış oldukları çalışmada helisel burma yayının doğrusal olmayan moment ve açısal deplasmanını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemişlerdir.

3. YAY TEST DÜZENEĞİ TASARIMI

Bu bölümde; farklı geometrik boyutlara sahip işleme burulma yayları, deneysel olarak incelenmiştir. Dört farklı geometrik boyuta sahip yayların herbirinden iki adet numune kullanılarak toplamda sekiz numune için testler gerçekleştirilmiştir. Yayların testlerinde kullanılmak üzere test düzeneği tasarımı yapılmıştır. Çalışmada, yaylar tek ucundan sabitlenip diğer ucundan açısal deplasman uygulanarak, üzerlerinde oluşan momentler tespit edilmiştir. Elde edilen moment değerleri ile yayların açısal yay sabitleri “k” belirlenmiştir. Farklı yükleme koşulu senaryoları oluşturularak, yayların açısal deplasmana bağlı tepki momentleri incelenmiştir. Bu kısımda elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modelin doğrulanmasında kullanılmıştır. Tasarlanan hassas test düzeneği ile burulma yaylarının açısal deplasman altında oluşturdukları tepki momentleri okunabilmektedir.

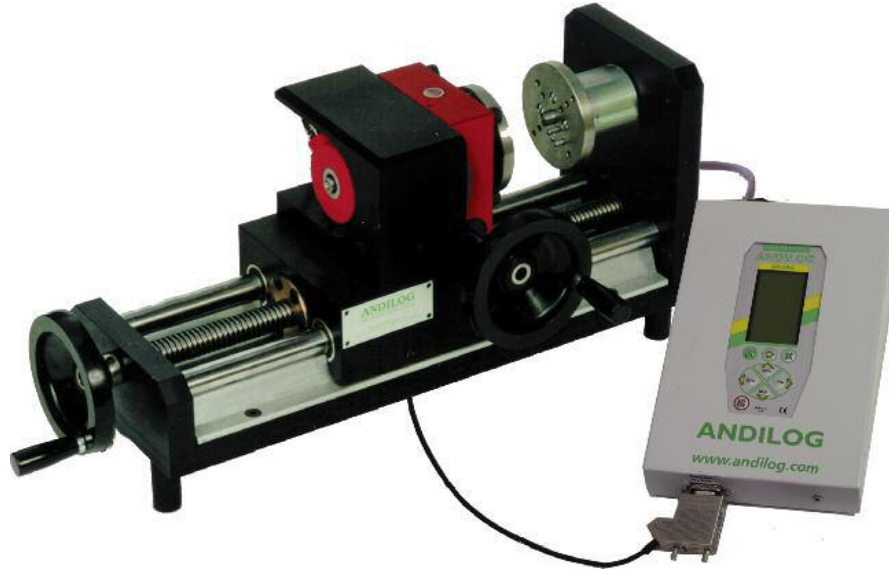
İşleme burulma yayları; tasarım alanlarında, bir ucu sabit diğer ucu açısal deplasmana müsait olacak şekilde kullanılmaktadır. Açısal deplasmana uğrayan burulma yayı üzerinde moment depolamaktadır. Bu momentin tasarım gereksinim sınırları içerisinde olması gerekmektedir. Bu momenti belirleyebilmek için yay test düzeneği tasarımı yapılmıştır. Burulma yayının tasarımlardaki bağlantı tipi dikkate alınarak bağlantı detayları test düzeneğine yansıtılmıştır.

Yay test düzeneği tasarımında literatürde kullanılmış düzenekler ve piyasadaki mevcut ürünler incelenmiştir. Wu ve Hsu [28], yapmış oldukları çalışmada helisel burulma yaylarının moment değerlerini Şekil 3.1'deki düzenekle ölçmüşlerdir.



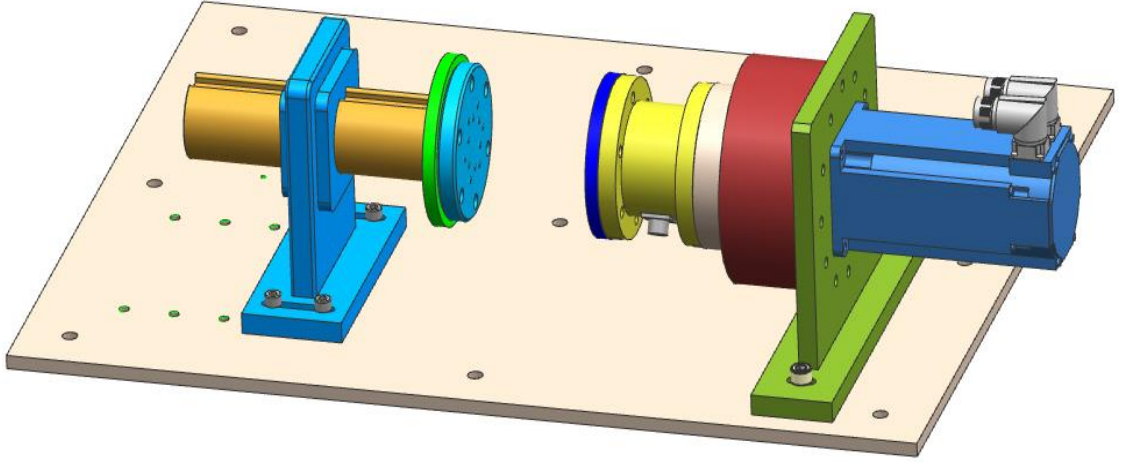
Şekil 3.1. Burma yayı test düzeneği görünümü [28]

Piyasadaki burma yaylarının tork miktarını ölçen sistemler incelenmiştir. Andilog firmasına ait tork ölçüm düzeneği Şekil 3.2'deki gibidir.



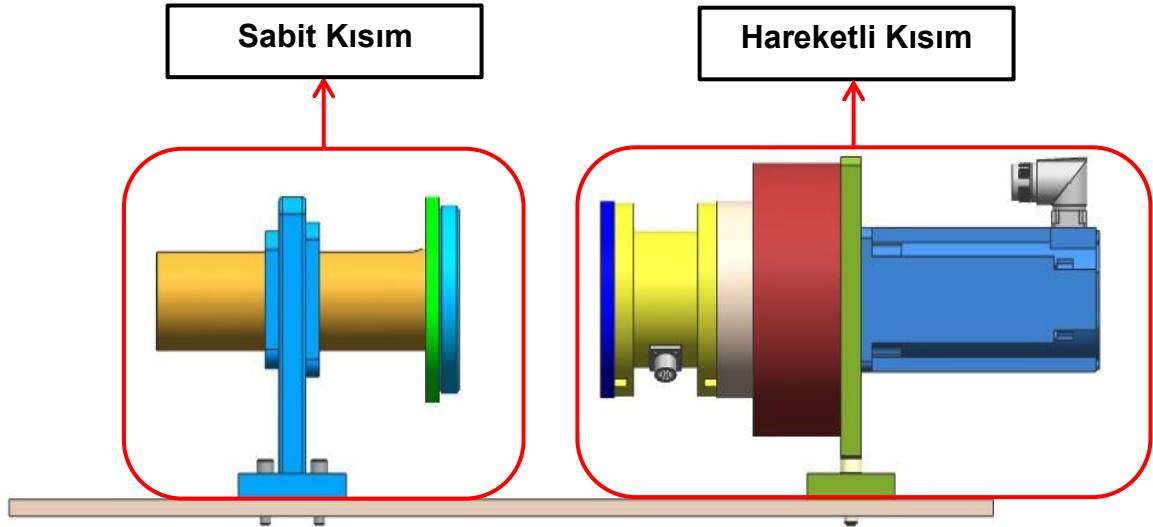
Şekil 3.2. Andilog burma yay test cihazı [29]

Piyasadaki burma yay test cihazlarının oldukça pahalı oluşundan dolayı yay test düzeneği tasarımına karar verilmiştir. Benzer sistemlerin araştırılmasından sonra yay test düzeneği tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.3'de, test düzeneği katı modeli göstermiştir.



Şekil 3.3. Test düzeneği katı model görünümü

Test düzeneği, yay numunelerini bir ucundan sabitleyerek diğer ucundan tork uygulayacak kabiliyette tasarlanmıştır. Sabit kısım ve hareketli kısımdan oluşmaktadır. Sabit kısım ve hareketli kısım Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



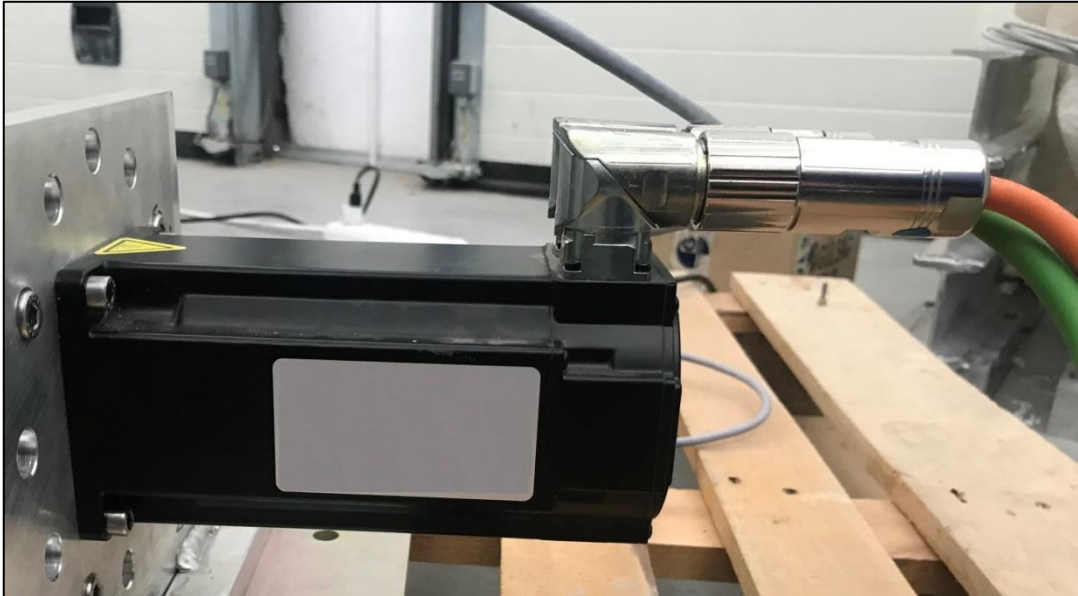
Şekil 3.4. Test düzeneği alt bileşen görüntüleri

3.1. Test Düzeneğinde Kullanılan Parçalar

İşleme burulma yaylarının istenilen açıda burulabilmesi için motor ve redüktörlü bir sistem tasarlanmıştır. Test düzeneğinin tasarımında kullanılan parçalar aşağıdaki gibidir;

- Servo Motor,
- Hassas Harmonik Redüktör,
- Tork Sensörü,
- Motor Sürücüsü,
- Veri Toplama Kartı,
- Güç Adaptörü,
- Sinyal yükseltici.

Test düzeneğinde kullanılan parçaların hassasiyeti, numunelerin ölçümünü etkileyeceğinden hazır parçaların özelliklerine dikkat edilmiştir. Test düzeneğinde kullanılan bileşenler, bu kısımda anlatılmıştır. Düzenekteki açısal hareketi sağlayan servo motor, yüksek kesinlikli açısal kontrole olanak sağlamaktadır [30]. Servo motor frenli tiptedir. Şekil 3.5'de servo motor görünümü, Çizelge 3.1'de ise motorun özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Servo motor görünümü

Çizelge 3.1. Servo motor özellikleri [30].

<i>Parametreler</i>	<i>Tolerans</i>	<i>Sembol</i>	<i>Birim</i>	
Tork Sabiti	$\pm 10\%$	K_t	N.m/A _{rms}	0.89
Back EMF Sabiti	$\pm 10\%$	K_e	V/k _{rpm}	57.4
Motor Sabiti	Nominal	K_m	N-m/ \sqrt{W}	0.501
Sürekli Tork (Yüklenmiş Durum)			N.m	4.82
Anlık Max. Tork (Yüklenmiş Durum)				14
Oransal Hız			RPM	5500

Servo motorun kontrolünü sağlayabilmek için servo motor sürücüsü kullanılmıştır. Motor sürücüsü ile servo motorun hız ve açısal konumu programlanmıştır. Motor sürücüsünün görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Motor sürücüsü görünümü

Test düzeneğinde harmonik redüktör kullanılarak sistemin hem açısal hassasiyetinin artırılması hem de yüksek tork kapasitesine sahip test numunelerinin test edilebilmesi sağlanmıştır. Harmonik redüktörün görünümü Şekil 3.7'de verilmiştir.



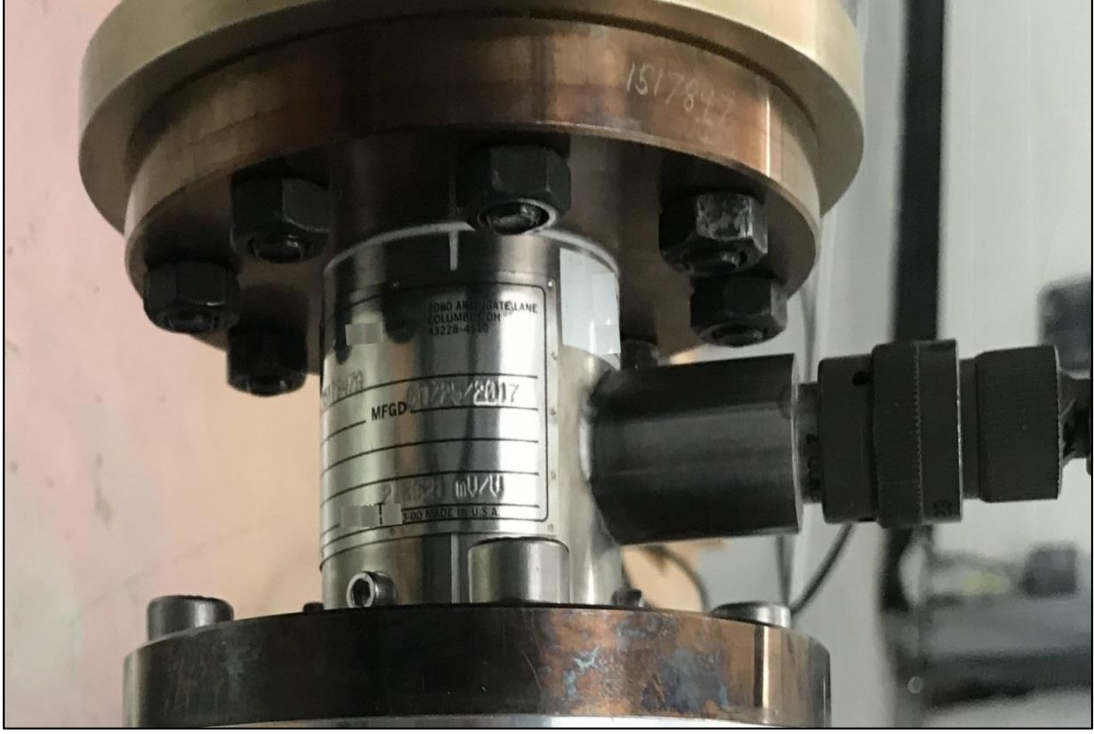
Şekil 3.7. Harmonik redüktör görünümü

Seçilen redüktör, hassas pozisyonlama gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir üründür. Endüstriyel robot kolları, kaynak pozisyoneri, hassas anten pozisyoneri gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [31]. Harmonik redüktör özellikleri, Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Harmonik redüktör özellikleri [31]

Parametreler	Birim	
Redüksiyon Oranı		89
İzin Verilen Giriş Gücü	kW	1.06
Nominal Çıkış Torku	N.m	396
Çıkış Hızı	RPM	22.5

İşleme yaylarının açısal deplasman altındaki tork miktarları, uygun tork sensörü kullanılarak yapılmıştır. Tork sensöründen elde edilen sinyaller, sinyal yükselticiden geçirilmiştir. Tork sensörünün görünümü Şekil 3.8'de verilmiştir.

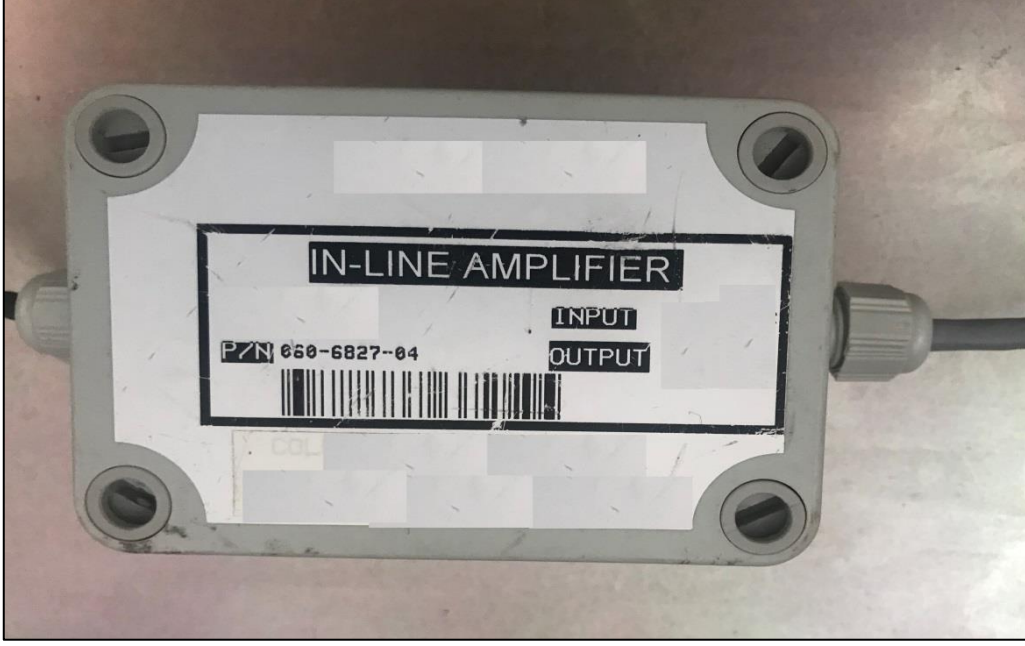


Şekil 3.8. Tork sensörü görünümü

Tork sensörünün seçiminde, test numunelerinin tork kapasitelerine uygun aralık dikkate alınmıştır. Tork sensörünün özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Tork sensörüne bağlı bir sinyal yükseltici kullanılmıştır. Sinyal yükselticinin görünümü Şekil 3.9’da verilmiştir.

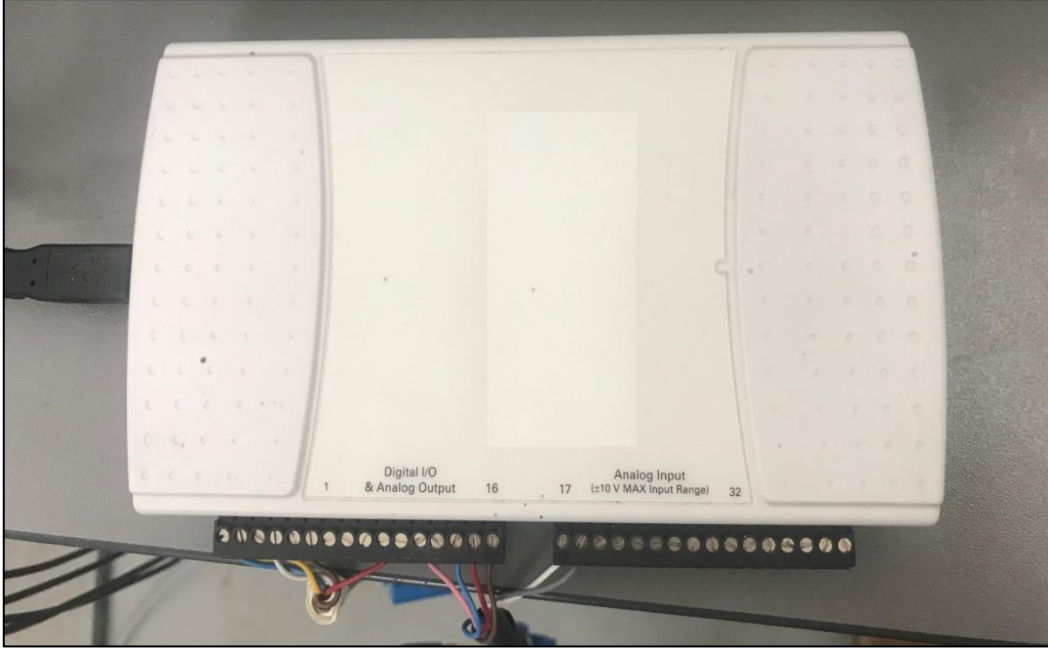
Çizelge 3.3. Tork sensörü özellikleri [32]

Parametreler	Birim	
Tork Aralığı	N.m	---
Doğrusalsızlık	-	±0.1%
Histerisis	N.m	±0.1%
Çıkış Voltajı	mV/V	2.5



Şekil 3.9. Sinyal yükseltici görünümü

Sinyal yükseltici ile tork sensöründen okunan milivolt sinyalleri, ± 10 Vdc sinyallerine çevrilmektedir. Test sisteminden elde edilen verilerin toplanması ve bilgisayar ortamına aktarımı için veri toplama kartı kullanılmıştır. Bu kart aynı zamanda, test sistemi ile bilgisayar program arayüzü arasında bağlantı sağlamaktadır. Veri toplama kartının görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Veri toplama kartı görünümü

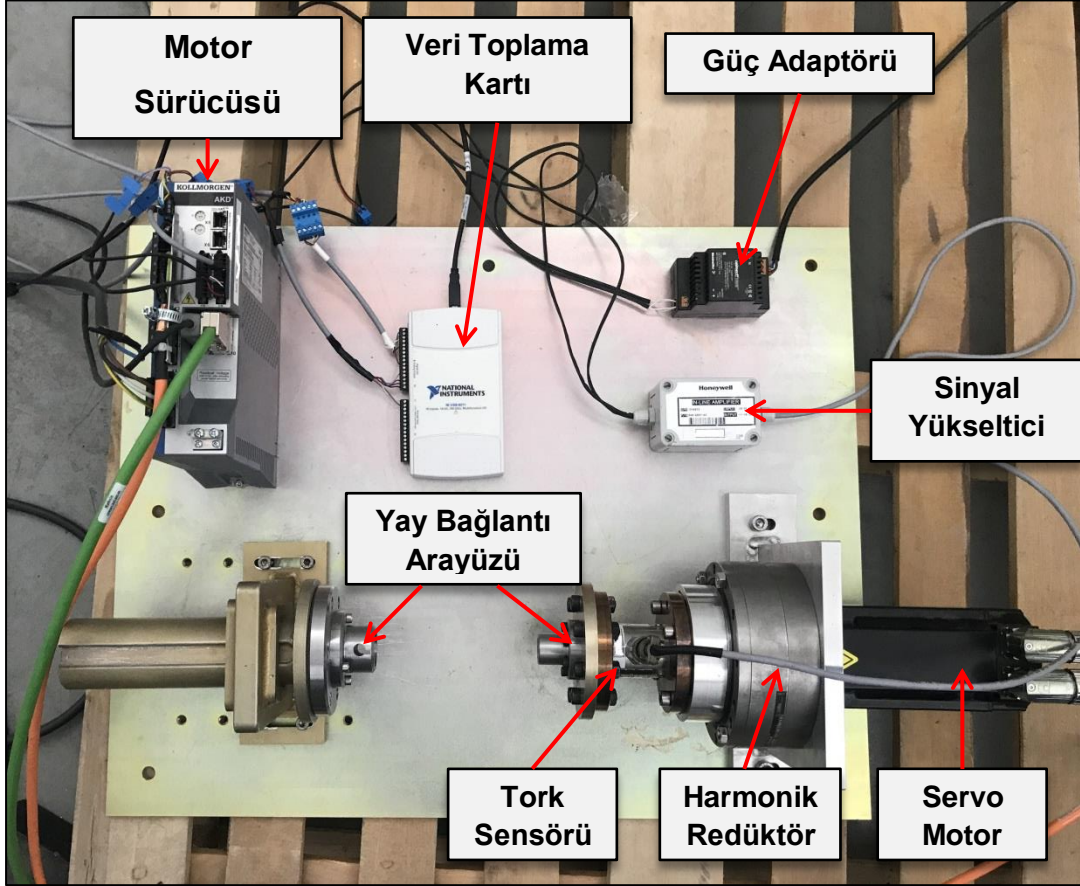
Test düzeneğindeki tork sensörü ve motor sürücüsü için gerekli voltajı sağlayacak güç adaptörü kullanılmıştır. Güç adaptörü, şehir şebeke hattından gelen alternatif akımı 24 V DC akıma çevirmektedir. Şekil 3.11’de test düzeneğinin bütünlenmiş görünümü verilmiştir.



Şekil 3.11. Güç adaptörü görünümü

3.2. Test Düzeneği Genel Görünümü

Tet düzeneğinde kullanılan parçalar temin edildikten sonra, sistemin bütünlemesi yapılmıştır. Tasarlanan bu sistem, farklı yayların tork kapasitesini ölçebilmesi amacıyla bir plakaya sabitlenmiştir. şekil 3.12'de test düzeneğinin genel görünümü verilmiştir.



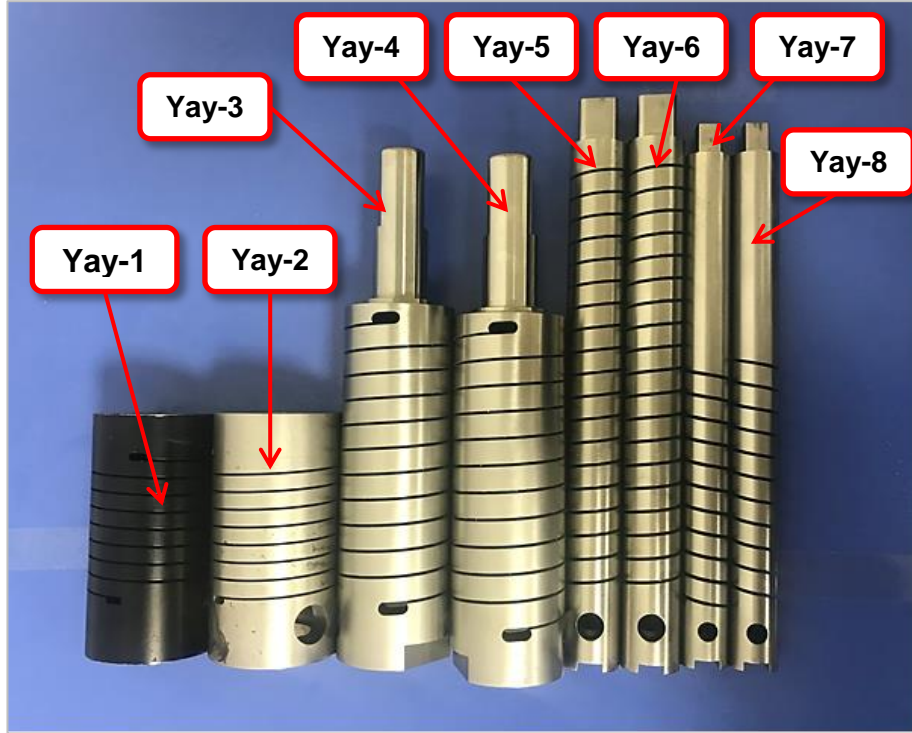
Şekil 3.12. Test düzeneği genel görünümü

4. İŞLEME YAY MEKANİK TESTLERİ

Bu bölümde; farklı geometrik boyutlara sahip işleme burulma yayları, deneysel olarak incelenmiştir. Dört farklı geometrik boyuta sahip yayların herbirinden iki adet numune kullanılarak toplamda sekiz numune için testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, yaylar tek ucundan sabitlenip diğer ucundan açısız deplasman uygulanarak, üzerlerinde oluşan momentler tespit edilmiştir. Elde edilen moment değerleri ile yayların açısız yay sabitleri “ k ” belirlenmiştir. Farklı yükleme koşulları senaryoları oluşturularak, yayların açısız deplasmana bağlı tepki momentleri incelenmiştir.

4.1. Test Numuneleri

Testlerde kullanılan yaylar, yurtdışından temin edilmiştir. Çalışmada, yüksek alaşımlı çelikten üretilmiş toplam sekiz adet işleme yay kullanılmıştır. Aynı ebatlardaki yaylar gruplandırılmıştır. Her bir yay isimlendirilmiştir. Yayların görseli Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. İşleme yay test numuneleri

Testlerde kullanılan numunelere ait boyutsal parametreler; Radyal et kalınlığı (t), aksenal et kalınlığı (b), helis boyu (L), kanal boşluğu (h) ve ortalama çap (D_m) Çizelge 4.1’de verilmiştir.

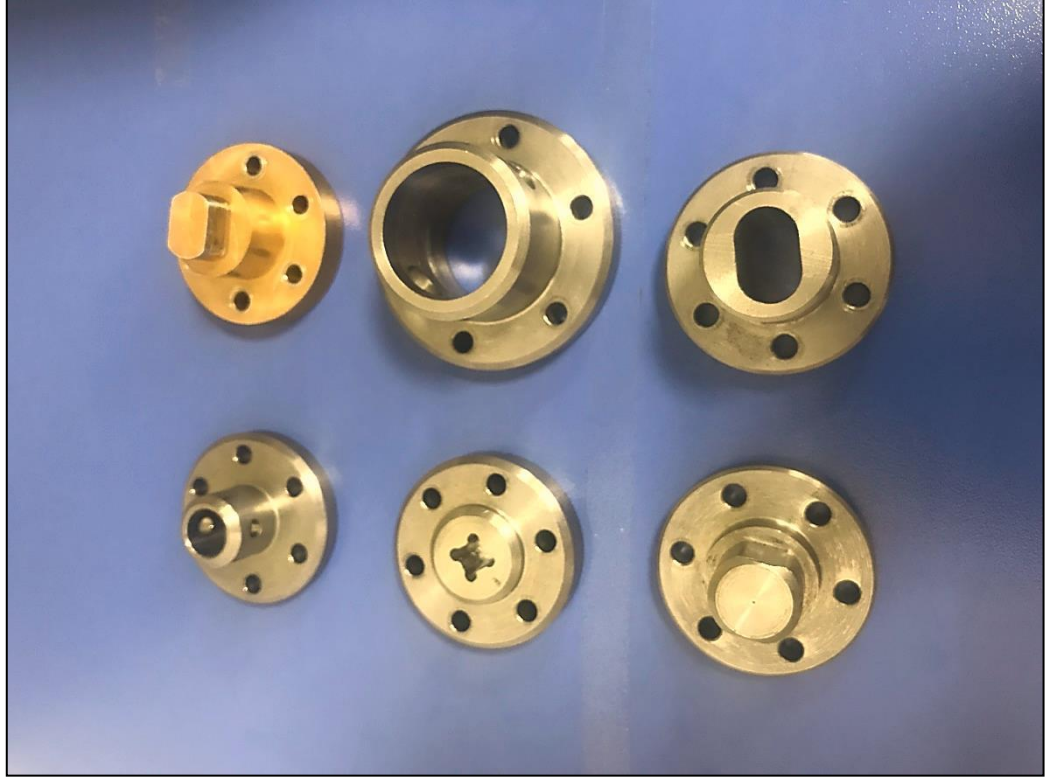
Çizelge 4.1. Test numunelerinin boyutsal parametre değerleri

Yay Grupları	Yay İsmi	Radyal Et Kalınlığı	Eksenel Et Kalınlığı	Helis Boy	Kanal Boşluğu	Ortalama Çap
		t [mm]	b [mm]	L [mm]	h [mm]	D_m [mm]
Grup-1	Yay-1	5.5753	3.81	35.4	0.635	28.435
	Yay-2	5.5753	3.81	35.4	0.635	28.435
Grup-2	Yay-3	7.5	6.2	74.1	0.635	22.5
	Yay-4	7.5	6.2	74.1	0.635	22.5
Grup-3	Yay-5	5.019	5.08	119.7	0.635	10.48
	Yay-6	5.019	5.08	119.7	0.635	10.48
Grup-4	Yay-7	4.66	4.572	67.6	0.635	7.85
	Yay-8	4.66	4.572	67.6	0.635	7.85

Testlerde numunelerinin üretiminde yüksek alaşımlı maraging 300 çeliği kullanılmıştır. Bu malzeme, yüksek mekanik dayanıma sahip alaşım çeliğidir. Genellikle yüksek mekanik dayanım gerektiren yerlerde tercih edilmektedir [33].

4.2. Test Bağlantı Arayüzleri

Testlerde kullanılan numunelerin bağlantı arayüzleri birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle her bir numuneyi test cihazına bağlayabilmek için gerekli arayüz tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de yay bağlantı arayüzleri gösterilmiştir.

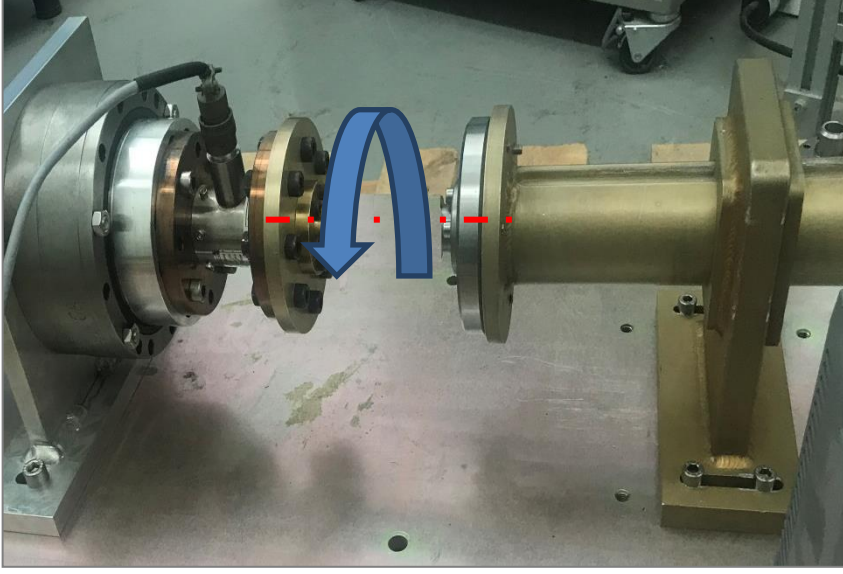


Şekil 4.2. Test numuneleri bağlantı arayüzleri

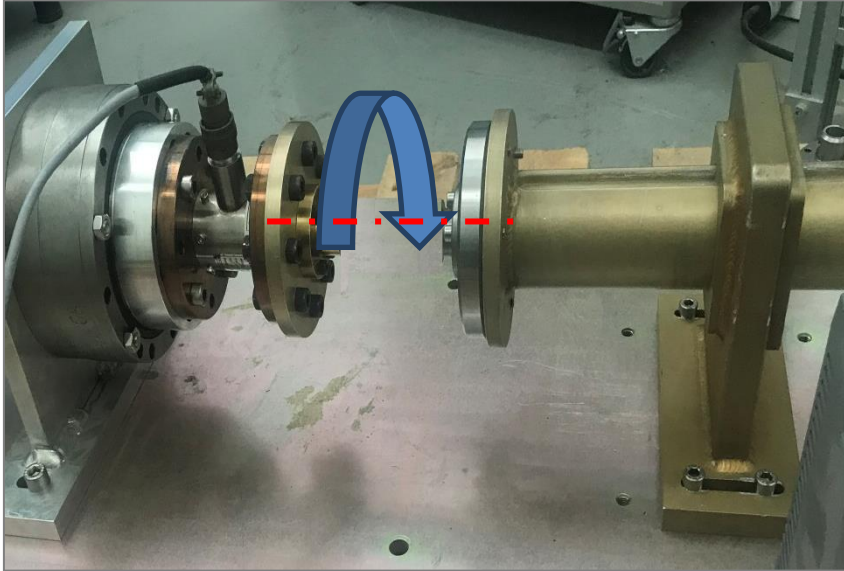
Bağlantı arayüzlerinin üretiminde, çelik ve alüminyum malzeme tercih edilmiştir.

4.3. Test Yükleme Senaryoları ve Uygulanan Açısal Deplasman Profilleri

Test numuneleri bir ucundan sabitlenip diğer ucundan elektrikli motor redüktör tahrik sistemiyle açısal deplasmana uğratılmaktadır. Numunelerin burulma testleri, sabit açısal deplasman ve değişken açısal deplasman profilleri ile yapılmıştır. Bu iki farklı profil, pozitif ve negatif yönlerde de uygulanmıştır. Toplamda 4 farklı senaryo, oluşturulan 4 farklı test grubuna uygulanmıştır. Test cihazının pozitif ve negatif hareket yönleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Açısal deplasman profilleri, zamana bağlı olarak tanımlanmıştır. Uygulanan 4 farklı açısal deplasman profili Şekil 4.4'de verilmiştir.

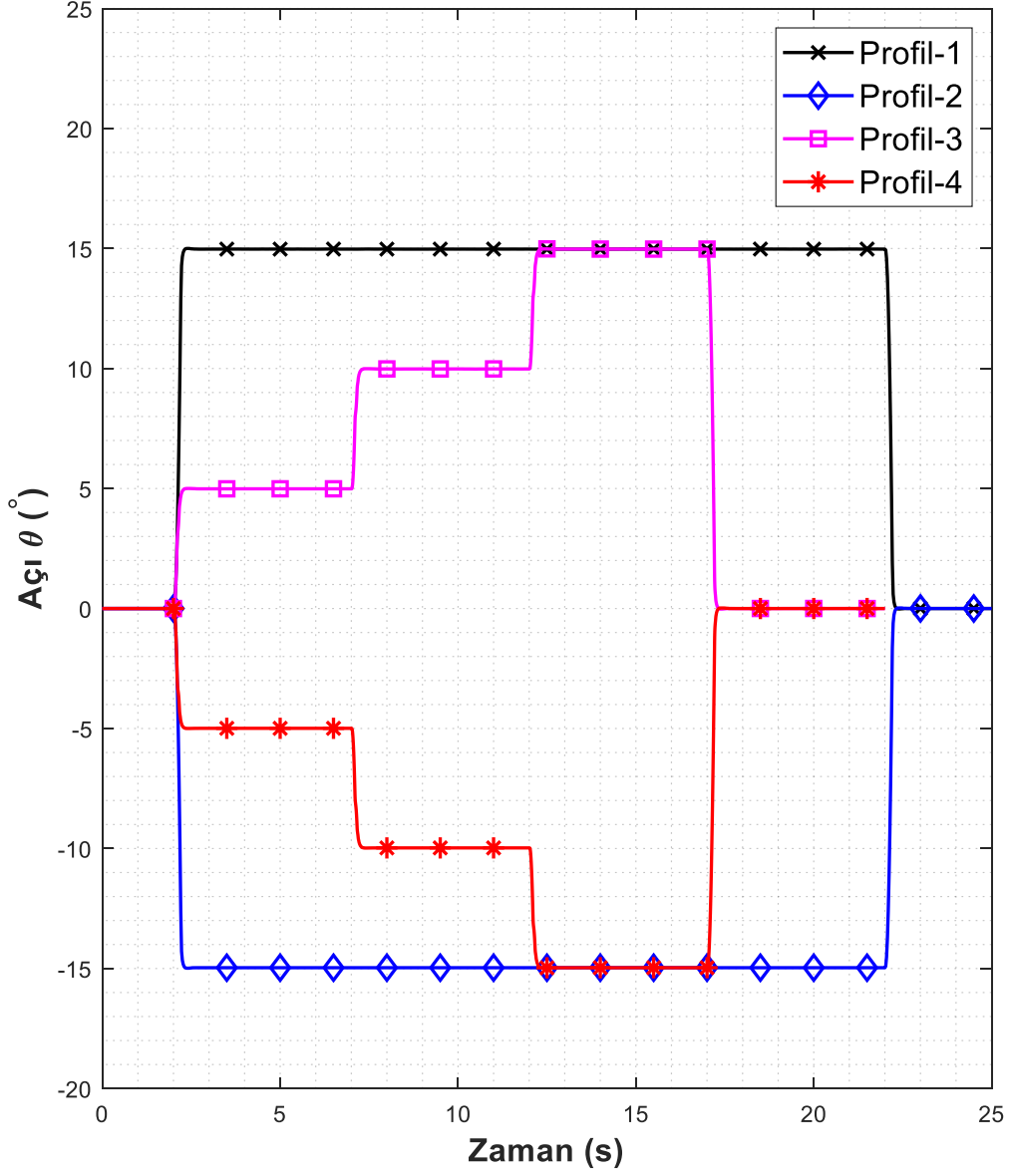


(a)



(b)

Şekil 4.3. Test Düzeneği Hareket Yönleri: (a) Pozitif Yön, (b) Negatif Yön



Şekil 4.4. Açısal deplasman profilleri

Tanımlanan bu yükleme profillerine göre 4 farklı gruptaki işleme yayar test edilmiştir. Her bir açı profili, sistem için yükleme senaryosu olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.2'de yükleme senaryo numaraları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Açı profil senaryo numaraları

Açı Profil İsmi	Senaryo No.
Açı Profili-1	1
Açı Profili-2	2
Açı Profili-3	3
Açı Profili-4	4

4.4. Testlerin Yapılması

Çizelge 4.1’de boyutsal özellikleri verilen test numunelerinin burulma testleri yapılmıştır. Test düzeneğinde, her bir test numunesi için 1000 Hz frekansında veri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla test numunelerine ait tork-zaman grafikleri çizdirilmiştir. Elde edilen ham verilerdeki gürültülerin temizlenmesi için filtreleme uygulanmıştır. Numunelerin ortalama yay sabiti değerleri “*k*” hesaplanmıştır. Yay sabiti “*k*” nın değeri hesaplanırken her bir veri için ayrı ayrı yay sabitleri hesaplanmıştır. Daha sonra bütün yay sabitlerinin ortalaması alınarak asıl yay sabiti değeri hesaplanmıştır. Yay sabitlerinin gösteriminde, sonuçların karışmaması için alt indislerden yararlanılmıştır. Yani yay sabitleri;

k_{ii} : Yay Sabiti Değeri [*N.m/derece*]
: Uygulanan senaryo numarası
: Yay numarası

şeklinde ifade edilmiştir. Yay sabiti “*k*” nın hesaplanmasında Denklem (4.1) kullanılmıştır.

$$k = \frac{T}{\theta} \quad (4.1)$$

Bu formülde;

T : Tork [*N.m*]

θ : Açı [°]

k : Yay sabiti [*N.m/°*]

ifade etmektedir.

Ortalama değerlerin hesaplanmasında;

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{n} = \frac{X_1+X_2+\dots+X_N}{n} \quad (4.2)$$

Formülü kullanılmıştır. Burada;

\bar{X} : Ortalama değer,

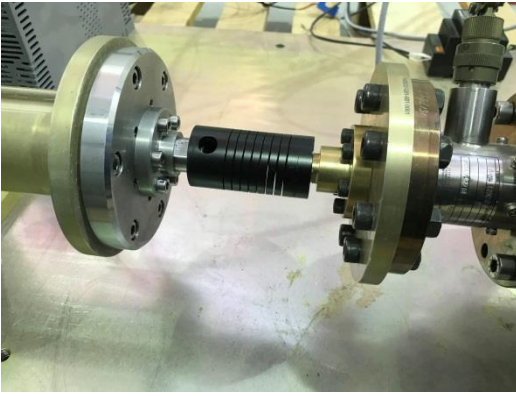
X_i : Örnekleme değeri,

n : Toplam örnek sayısı,

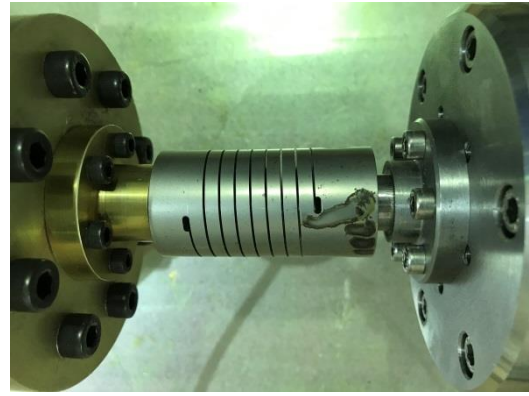
olarak ifade edilmiştir.

Yay gruplarında tanımlanan her bir numunenin test düzeneğindeki görünümüleri

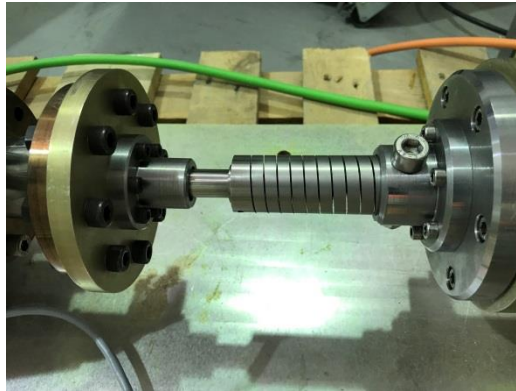
Şekil 4.5'de verilmiştir.



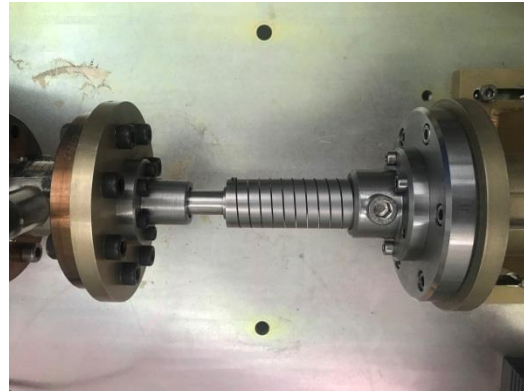
(a)



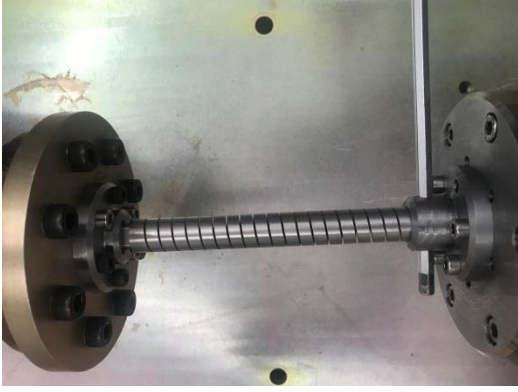
(b)



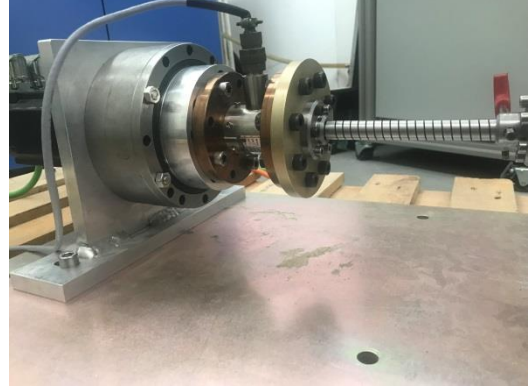
(c)



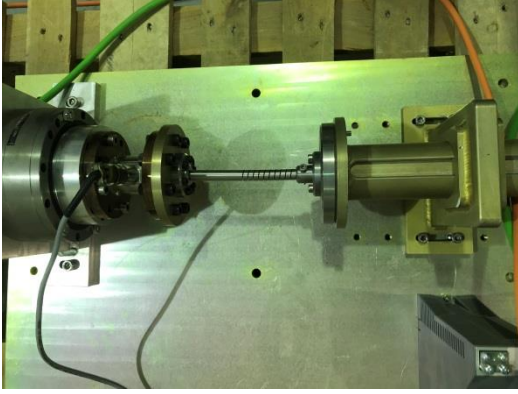
(d)



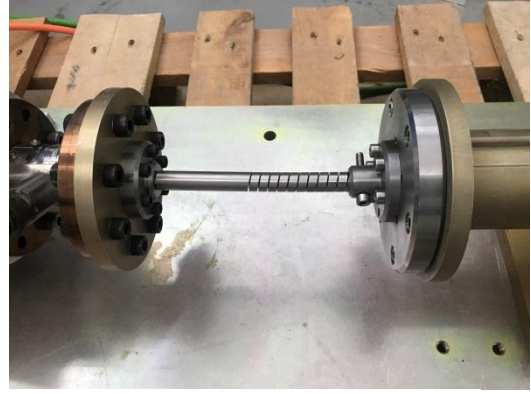
(e)



(f)



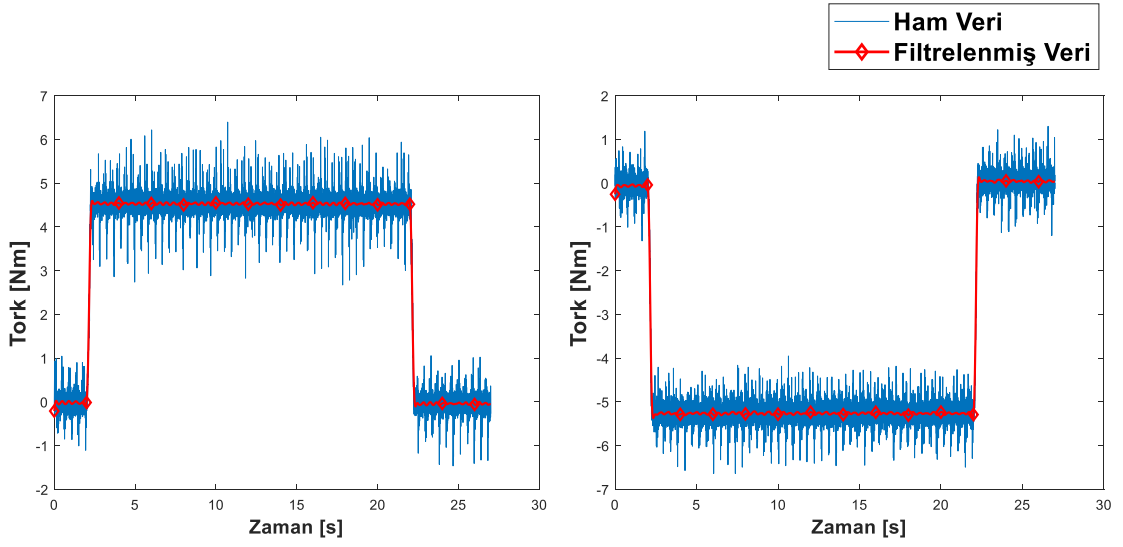
(g)



(h)

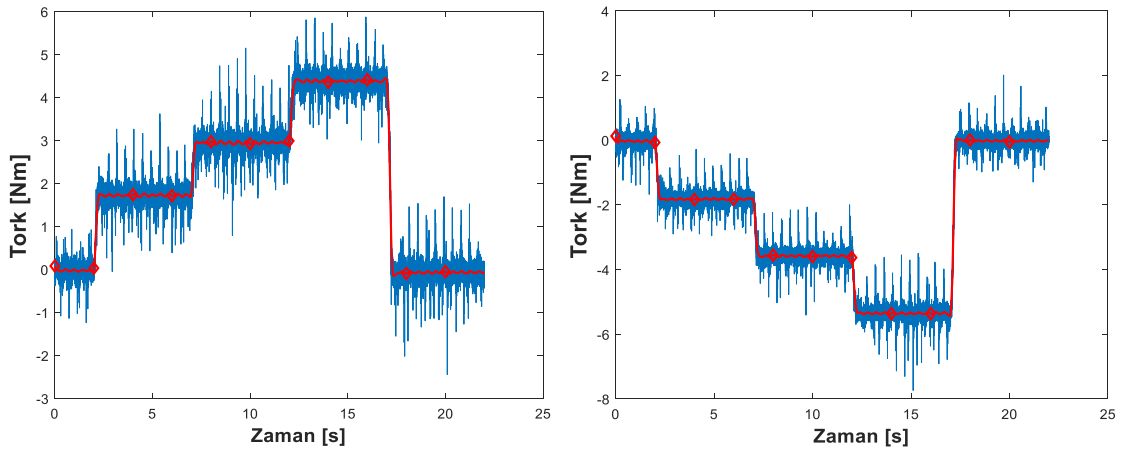
Şekil 4.5. Test düzeneği görünümleri: (a) Yay-1, (b) Yay-2, (c) Yay-3, (d) Yay-4, (e) Yay-5, (f) Yay-6, (g) Yay-7, (h) Yay-8

4.5. Grup-1 Test Sonuçları



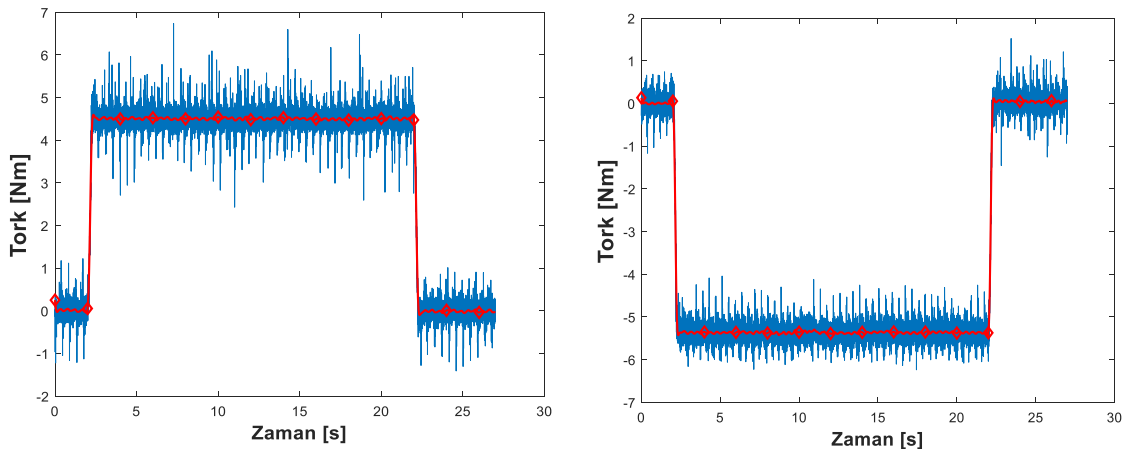
(a)

(b)



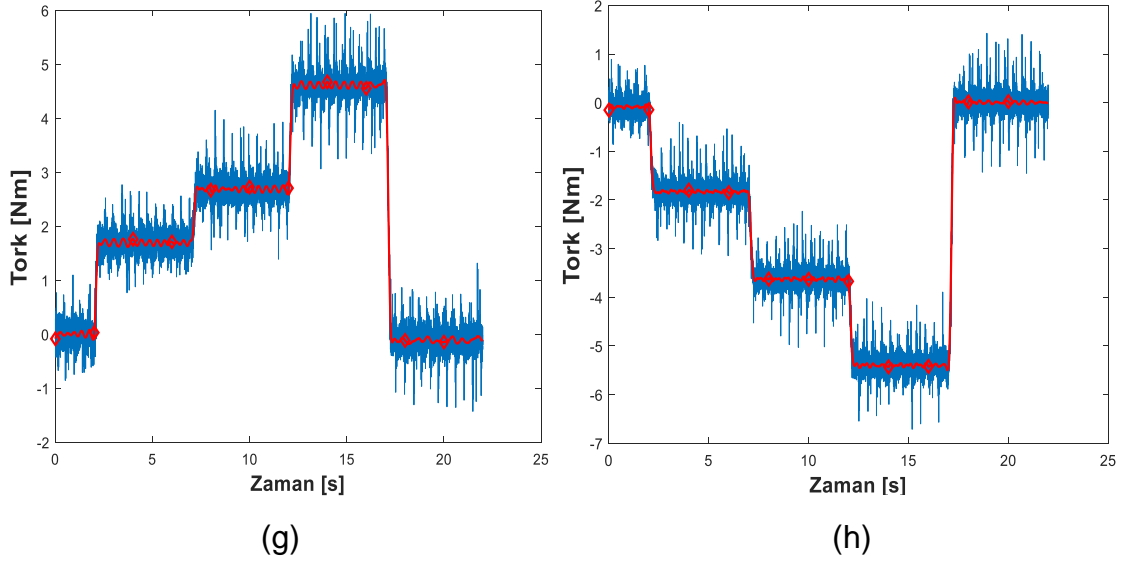
(c)

(d)



(e)

(f)

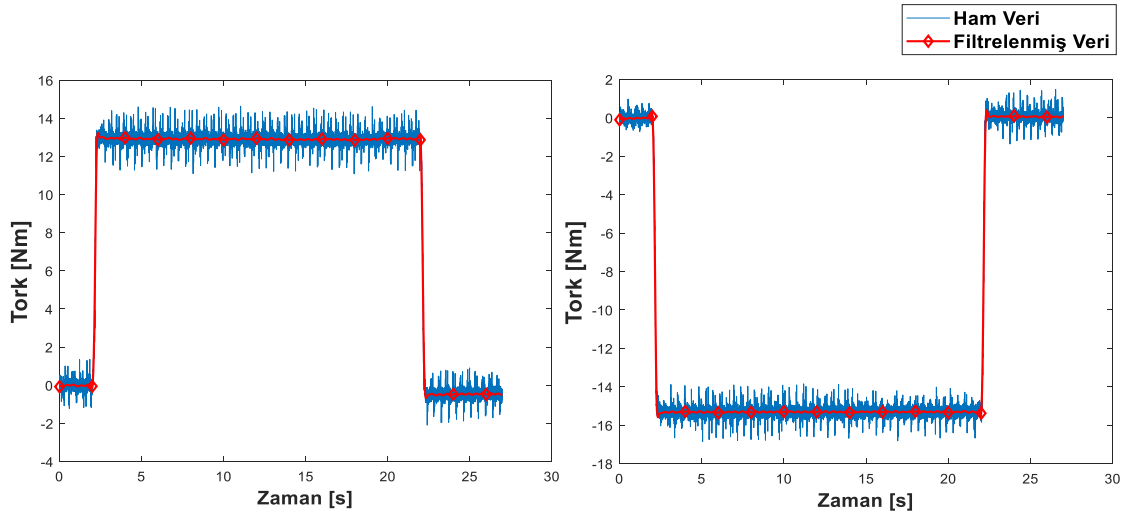


Şekil 4.6. Grup-1 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-1 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-1 grafiği, (c) Senaryo-3'e göre Yay-1 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-1 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-2 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-2 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-2 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-2 grafiği

Çizelge 4.3. Grup-1 test sonuçları özet tablosu

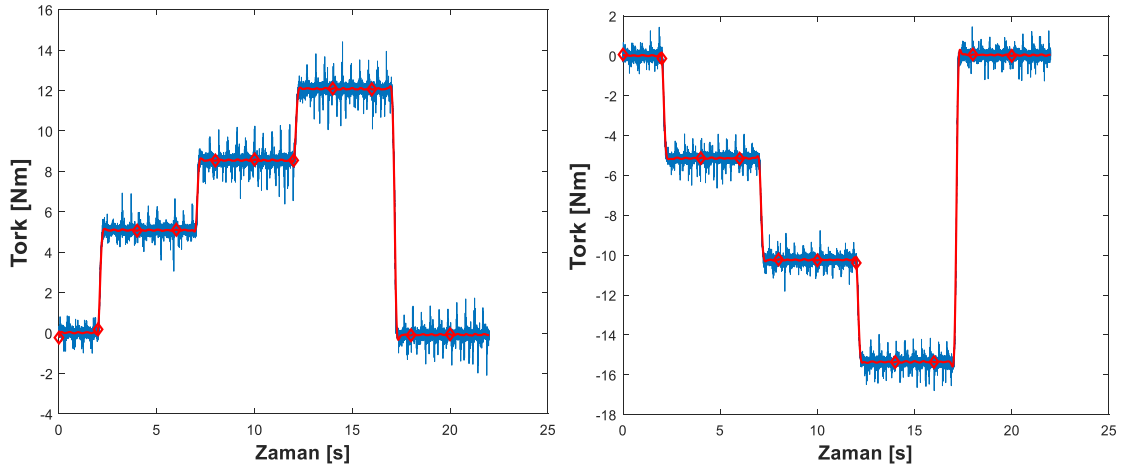
Senaryo Numarası	Hareket Yönü	Yay-1		Yay-2	
		Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]
1	Kapama	$k_{11} = 0.3041$	$k_{21} = 0.3001$	$k_{11} = 0.3041$	$k_{21} = 0.3001$
2	Açma	$k_{12} = 0.3479$	$k_{22} = 0.3593$	$k_{12} = 0.3479$	$k_{22} = 0.3593$
3	Kapama	$k_{13} = 0.3139$	$k_{23} = 0.3055$	$k_{13} = 0.3139$	$k_{23} = 0.3055$
4	Açma	$k_{14} = 0.3573$	$k_{24} = 0.3533$	$k_{14} = 0.3573$	$k_{24} = 0.3533$

4.6. Grup-2 Test Sonuçları



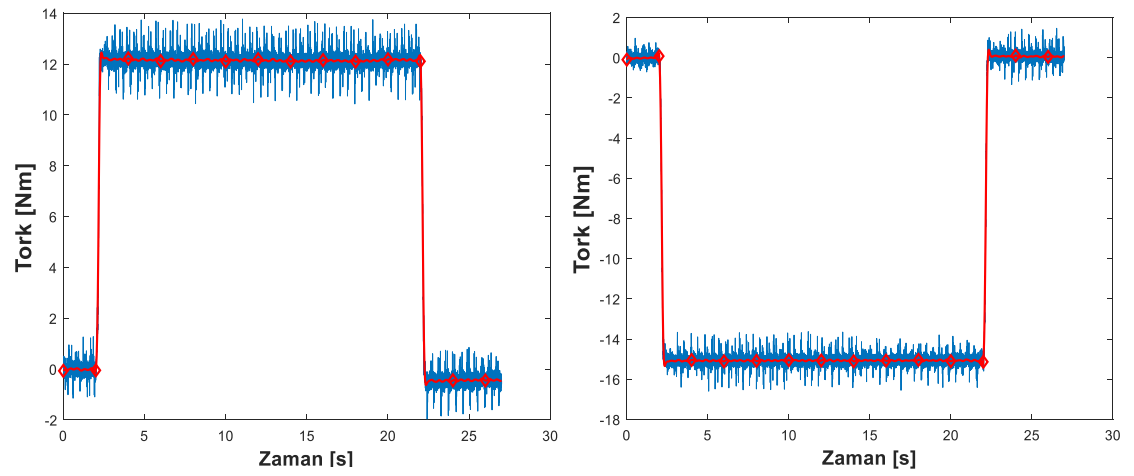
(a)

(b)



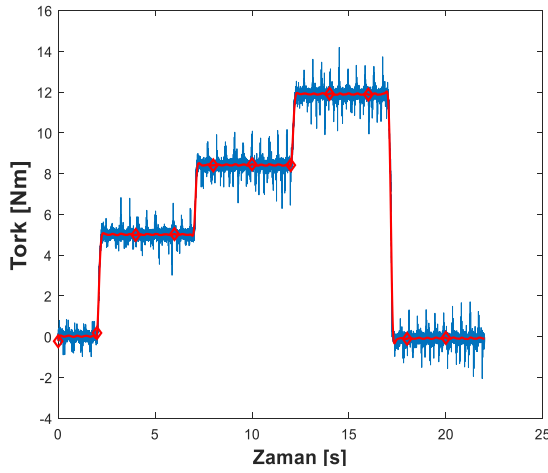
(c)

(d)

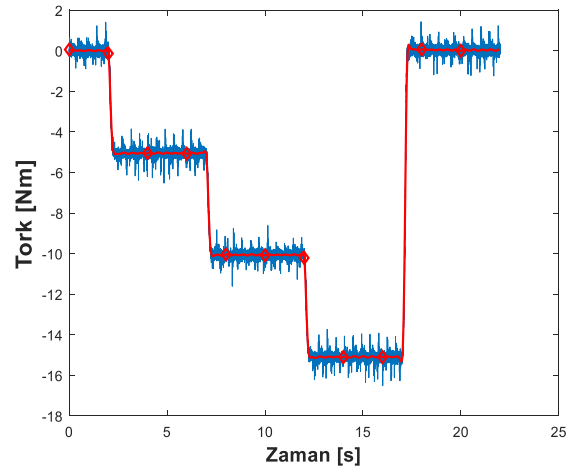


(e)

(f)



(g)



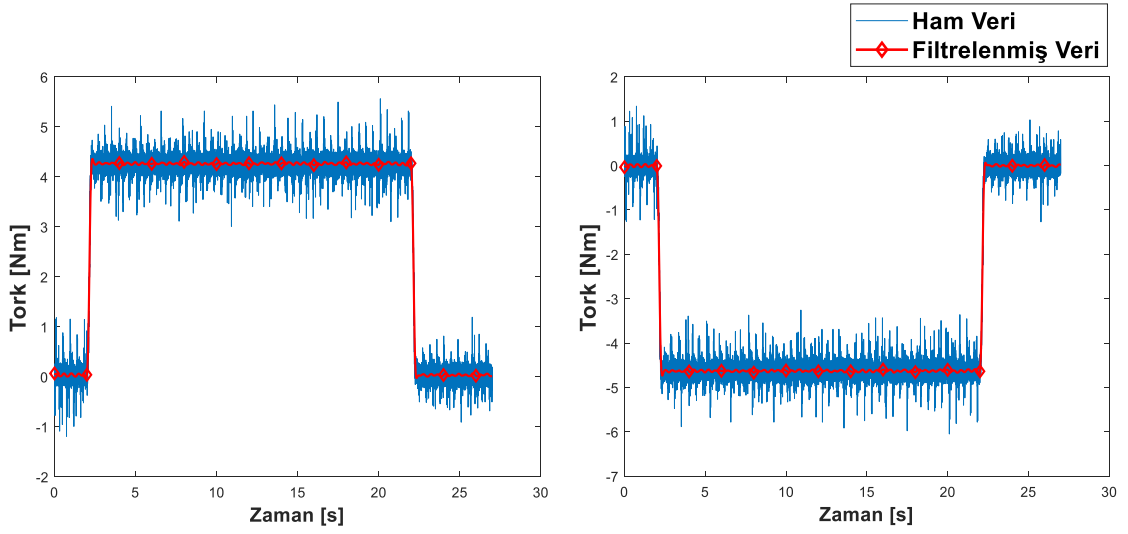
(h)

Şekil 4.7. Grup-2 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-3 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-3 grafiği, (c) Senaryo-3'e göre Yay-3 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-3 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-4 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-4 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-4 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-4 grafiği

Çizelge 4.4. Grup-2 test sonuçları özet tablosu

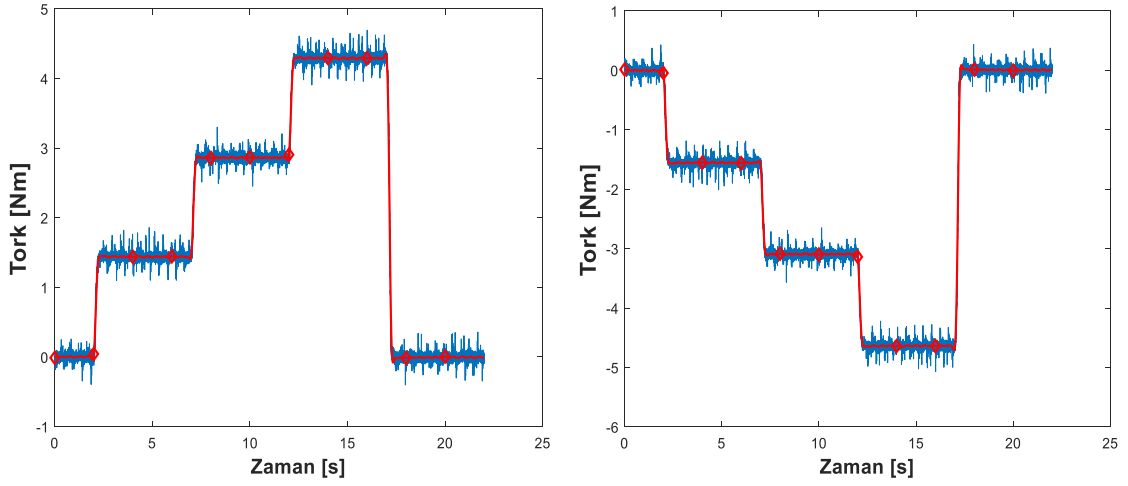
Senaryo Numarası	Hareket Yönü	Yay-3		Yay-4	
		Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]
1	Kapama	$k_{31} = 0.8432$	$k_{41} = 0.8367$	$k_{31} = 0.8432$	$k_{41} = 0.8367$
2	Açma	$k_{32} = 1.0170$	$k_{42} = 1.001$	$k_{32} = 1.0170$	$k_{42} = 1.001$
3	Kapama	$k_{33} = 0.8512$	$k_{43} = 0.8437$	$k_{33} = 0.8512$	$k_{43} = 0.8437$
4	Açma	$k_{34} = 1.0291$	$k_{44} = 1.011$	$k_{34} = 1.0291$	$k_{44} = 1.011$

4.7. Grup-3 Test Sonuçları



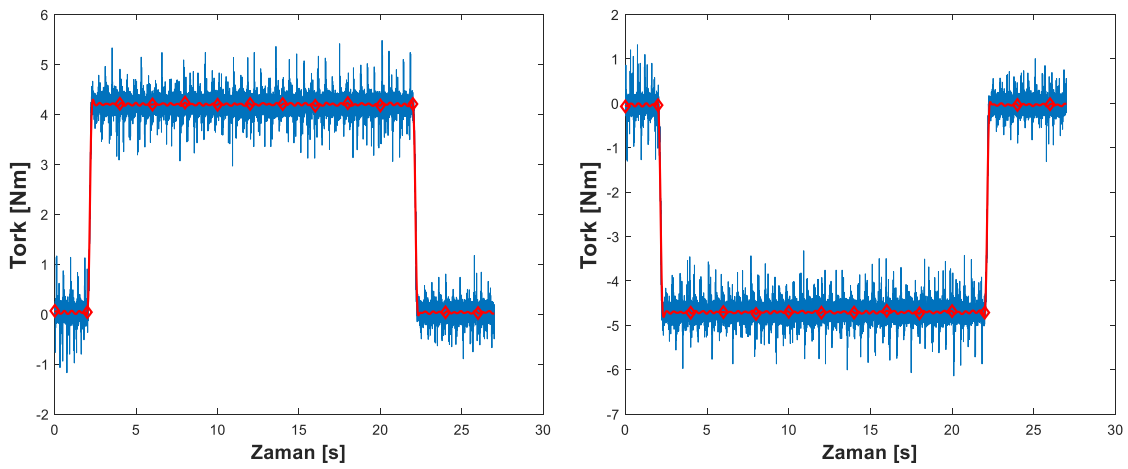
(a)

(b)



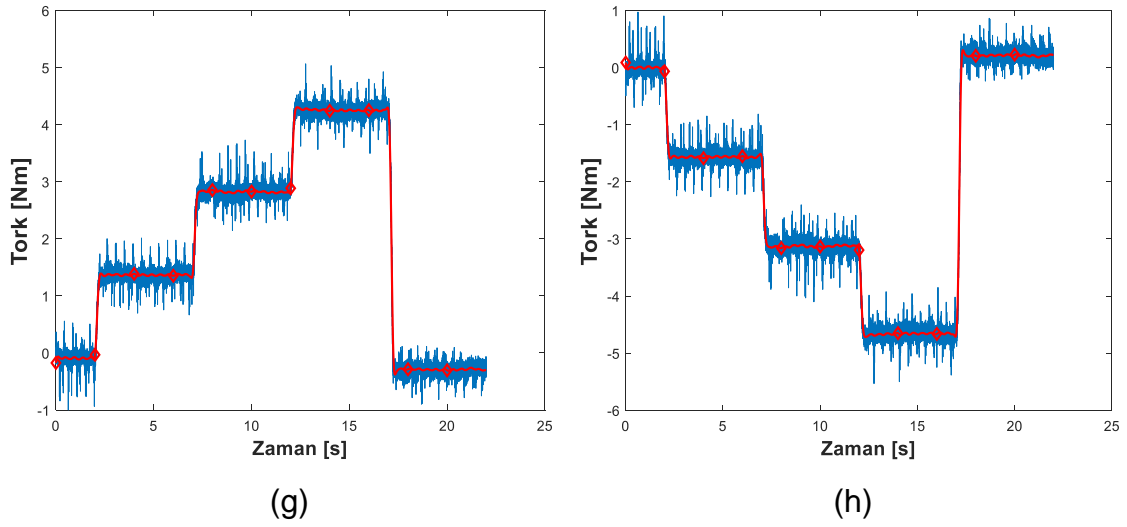
(c)

(d)



(e)

(f)

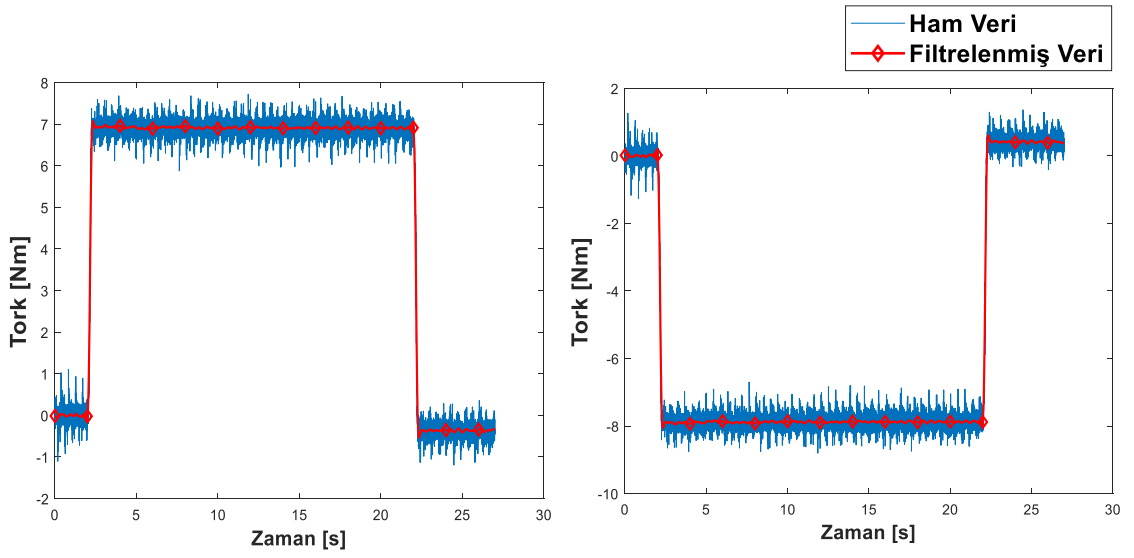


Şekil 4.8. Grup-3 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-5 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-5 grafiği, (c) Senaryo-3'e göre Yay-5 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-5 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-6 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-6 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-6 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-6 grafiği

Çizelge 4.5. Grup-3 test sonuçları özet tablosu

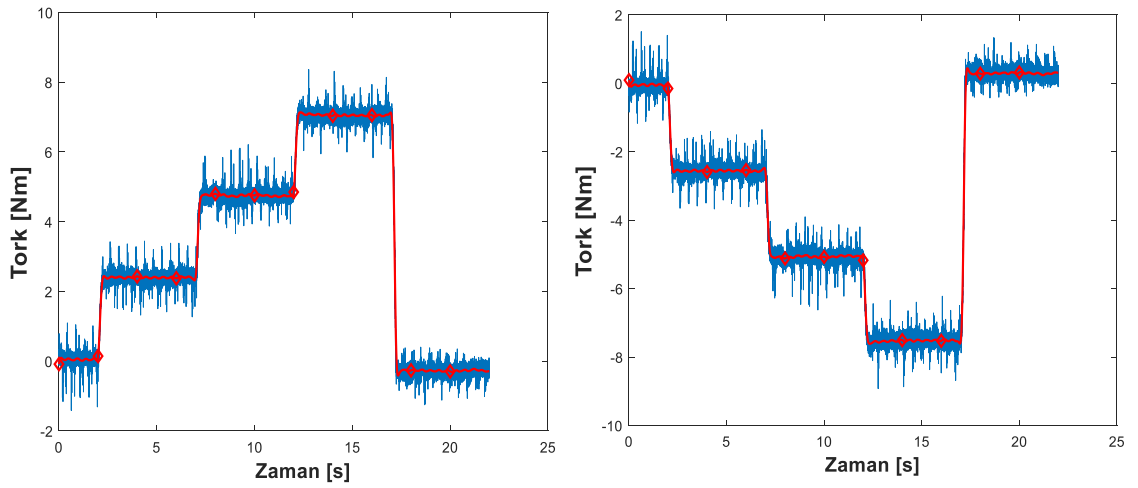
Senaryo Numarası	Hareket Yönü	Yay-5		Yay-6	
		Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]
1	Kapama	$k_{51} = 0.2564$	$k_{61} = 0.2694$	$k_{51} = 0.2564$	$k_{61} = 0.2694$
2	Açma	$k_{52} = 0.3091$	$k_{62} = 0.3120$	$k_{52} = 0.3091$	$k_{62} = 0.3120$
3	Kapama	$k_{53} = 0.2598$	$k_{63} = 0.2708$	$k_{53} = 0.2598$	$k_{63} = 0.2708$
4	Açma	$k_{54} = 0.3105$	$k_{64} = 0.3129$	$k_{54} = 0.3105$	$k_{64} = 0.3129$

4.8. Grup-4 Test Sonuçları



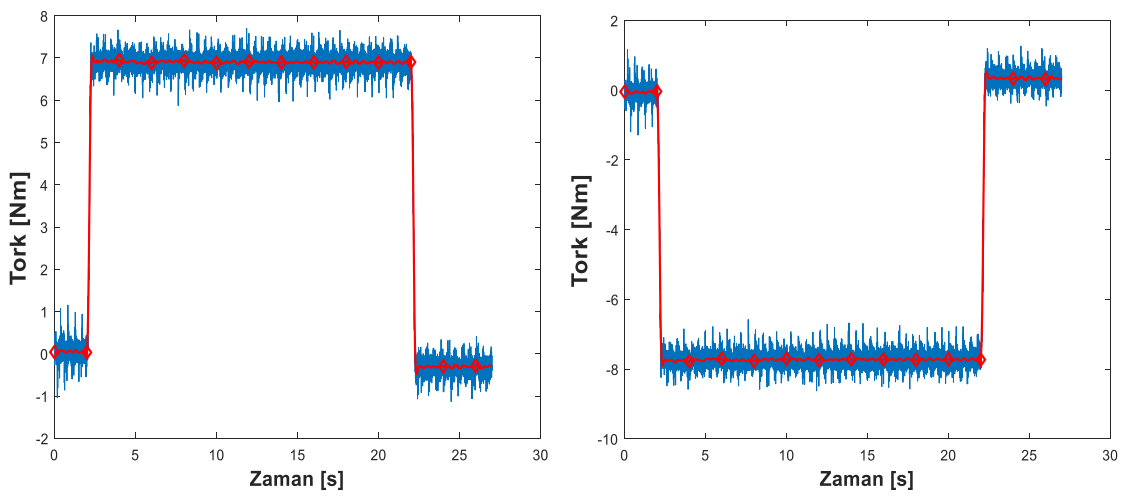
(a)

(b)



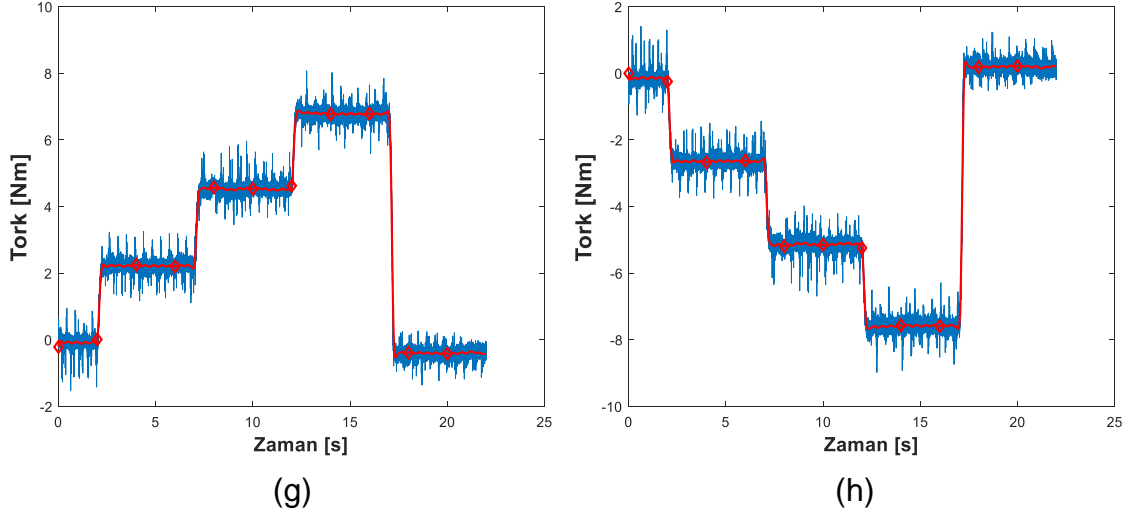
(c)

(d)



(e)

(f)



Şekil 4.9. Grup-4 Tork-Zaman Grafikleri: (a) Senaryo-1'e göre Yay-7 grafiği, (b) Senaryo-2'ye göre Yay-7 grafiği, (c) Senaryo-3'e göre Yay-7 grafiği, (d) Senaryo-4'e göre Yay-7 grafiği, (e) Senaryo-1'e göre Yay-8 grafiği, (f) Senaryo-2'ye göre Yay-8 grafiği, (g) Senaryo-3'e göre Yay-8 grafiği, (h) Senaryo-4'e göre Yay-8 grafiği

Çizelge 4.6. Grup-4 test sonuçları özet tablosu

Senaryo Numarası	Hareket Yönü	Yay-7		Yay-8
		Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti [Nm/°]	Ortalama "k" Sabiti % Fark
1	Kapama	$k_{71} = 0.3901$	$k_{81} = 0.3881$	%0.514
2	Açma	$k_{72} = 0.5272$	$k_{82} = 0.5130$	%2.730
3	Kapama	$k_{73} = 0.4055$	$k_{83} = 0.3975$	%1.993
4	Açma	$k_{74} = 0.5023$	$k_{84} = 0.4994$	%0.579

4.9. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, 4 farklı geometrik ebata sahip 8 adet işleme yayın farklı yükleme senaryolarına göre burulma testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda, açısal deplasmana bağlı olarak yaylar üzerinde oluşan moment değerleri okunmuştur. Elde edilen moment değerleri ile yayların burulma direngenlik sabitleri (k) hesaplanmıştır.

İşleme yaylara ait sonuçlar incelendiğinde; açısal deplasmana bağlı olarak yayların direngenlik sabitlerinde, büyük bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Yani, açısal deplasmana bağlı olarak elde edilen moment değerleri doğrusal bir davranış göstermektedir. 8 farklı test numunesinden elde edilen moment değerlerine göre hesaplanan ortalama " k " sabitleri Çizelge 4.7'de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 4.7. İşleme yay ortalama " k " sabitleri özet tablosu

Grup No.	Yay No.	Açma Yönü		Kapama Yönü	
		<i>Ortalama "k" Sabiti</i> [N.m/°]	<i>Grup Ortalama "k" Sabiti</i> [N.m/°]	<i>Ortalama "k" Sabiti</i> [N.m/°]	<i>Grup Ortalama "k" Sabiti</i> [N.m/°]
<i>Grup-1</i>	1	0.3526	0.3545	0.3090	0.3059
	2	0.3563		0.3028	
<i>Grup-2</i>	3	1.0231	1.015	0.8472	0.8437
	4	1.006		0.8402	
<i>Grup-3</i>	5	0.3098	0.3112	0.2581	0.2641
	6	0.3125		0.2701	
<i>Grup-4</i>	7	0.5148	0.5105	0.3978	0.3953
	8	0.5062		0.3928	

Çizelge 4.7'ye göre, aynı ebatlara sahip aynı gruptaki yaylara ait test sonuçlarının çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Yay sabitlerinin yükleme yönüne bağlı olarak bir miktar değişim gösterdiği görülmüştür. Açma yönü moment değerleri, kapama yönü moment değerlerinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü helis geometrisi düşünüldüğünde, yükleme yönüne göre atalet momentleri değişmektedir. Elde edilen test verileri ile bir sonraki bölümde sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen test numunelerinden elde edilen sonuçlar kıyaslanacaktır.

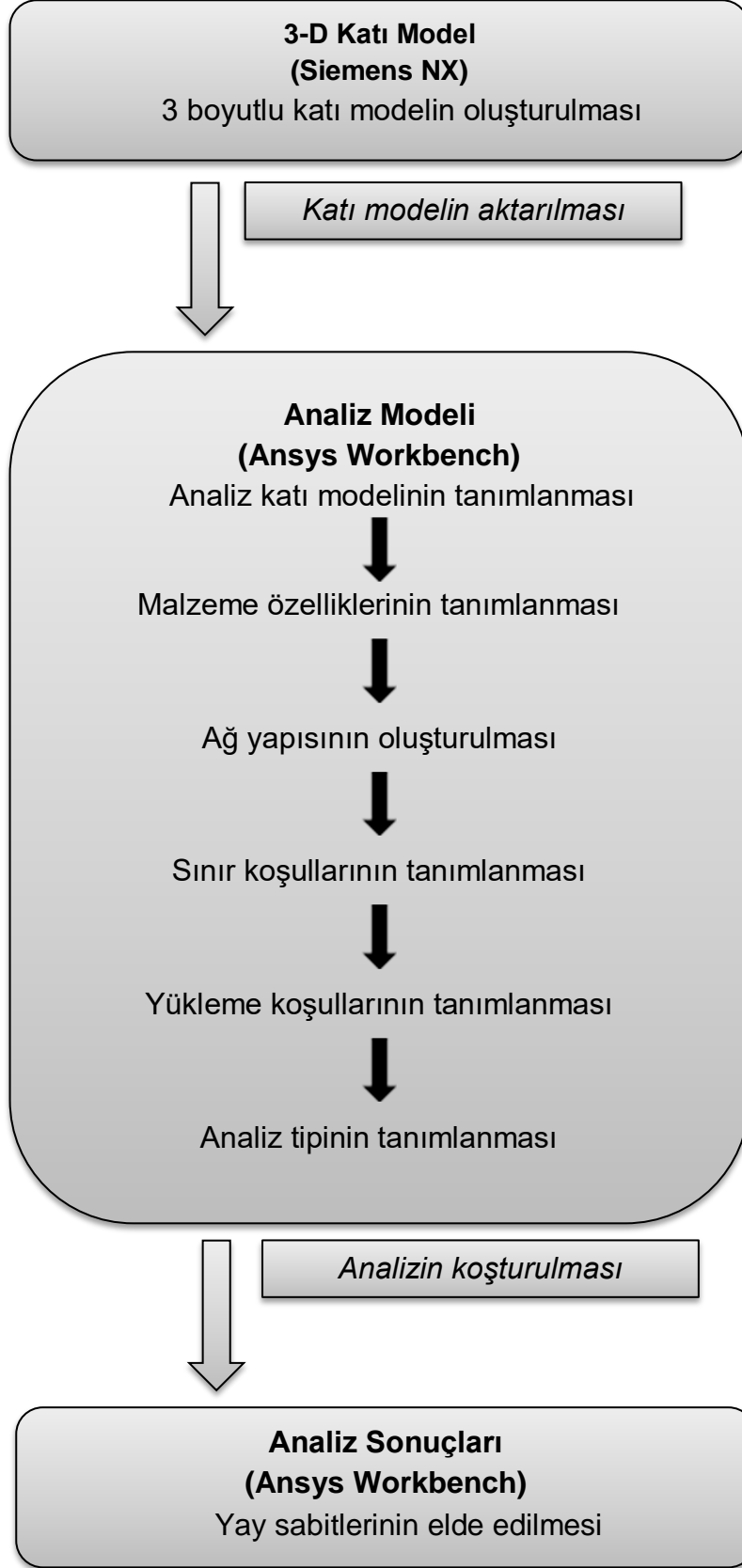
5. İŞLEME YAYLARIN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE BURULMA ANALİZLERİ

5.1. Giriş

Çalışma kapsamında; burulma testleri yapılan 4 farklı geometrik ebattaki işleme yayların tıpkı deneysel çalışmalardaki gibi yükleme ve sınır koşulları tanımlanarak sonlu eleman çözümlenmeleri yapılmıştır.

Sonlu eleman çözümlenmeleri deneysel çalışmalara göre zaman ve maliyet bakımından çok daha avantajlıdır. Ancak elde edilen sonuçların doğrulanması gereklidir. Bir önceki bölümde testleri yapılan işleme yaylar için analiz modelleri oluşturulmuştur. Testler sonucunda elde edilen yay sabitleri ile bu bölümde analiz modellerinden elde edilen yay sabitleri kıyaslanarak analiz modellerinin doğruluğu araştırılmıştır.

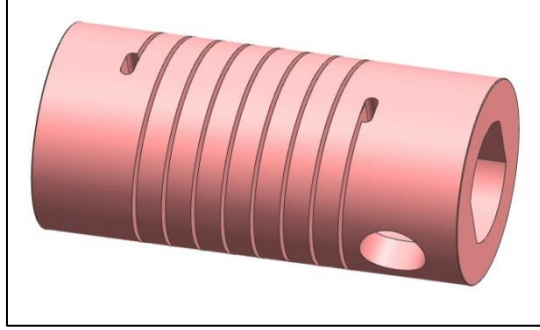
Daha sonraki bölümde anlatılan parametrik analiz çalışmalarında, 720 adet farklı geometrideki işleme yay için aynı analiz modelleri tekrarlanarak her bir işleme yay modeli için yay sabiti değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla bir veri tabanı oluşturulacağı için bu sonuçların doğruluğu önemlidir. Analiz modelinin oluşturulmasında izlenen adımları anlatan akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



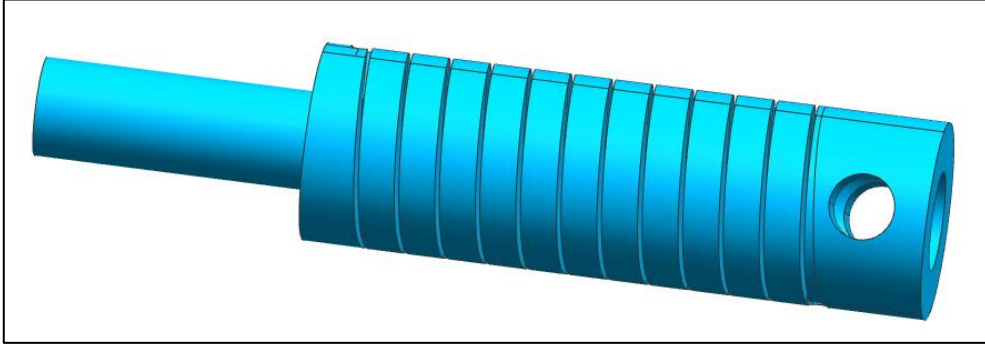
Şekil 5.1. Analiz modeli akış şeması

5.2. Analiz Modelleri ve Ağ Yapısı

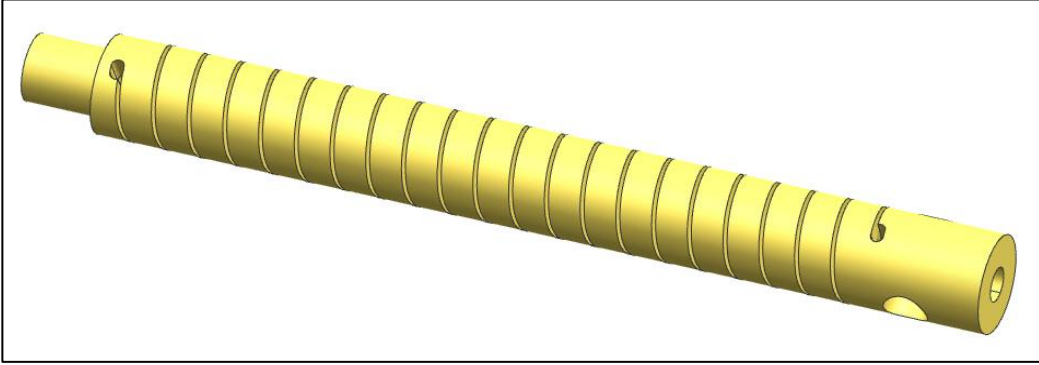
Analizleri yapılacak işleme yayların Siemens NX [34] katı model programında modellenmiş görünüşleri Şekil 5.2’de verilmiştir.



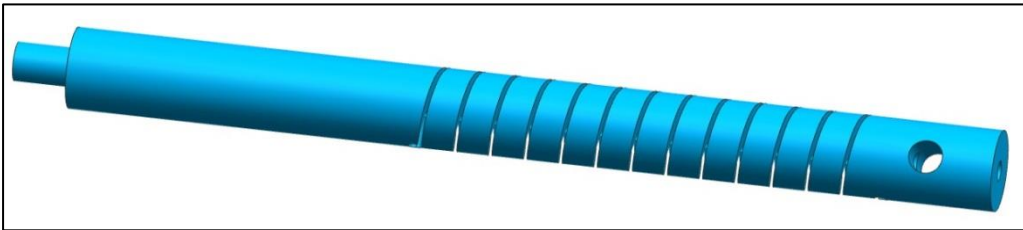
(a)



(b)



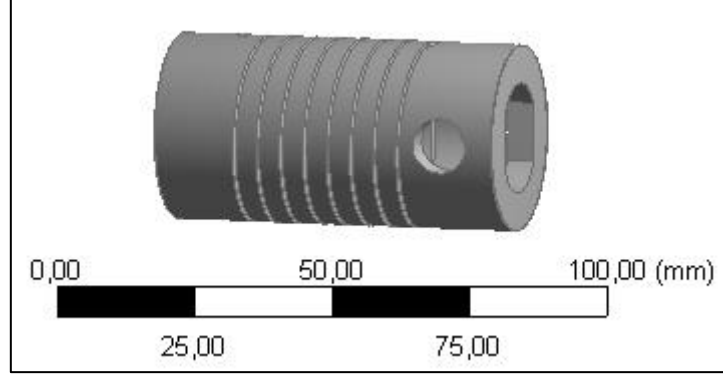
(c)



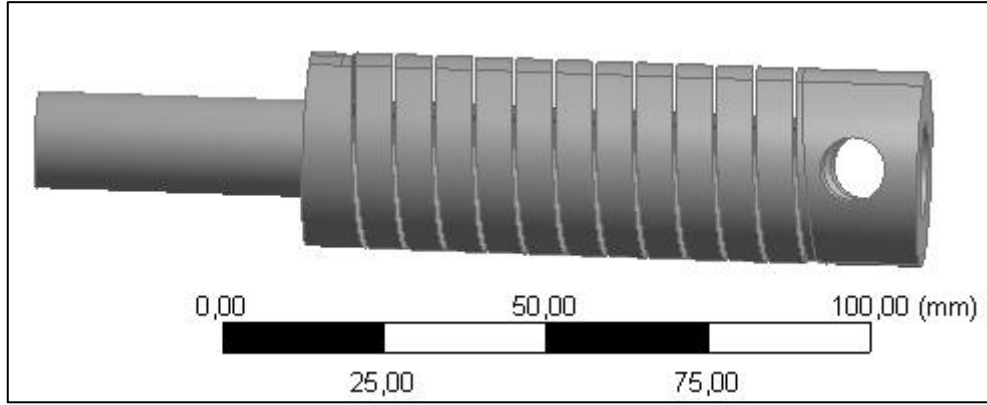
(d)

Şekil 5.2. İşleme yay katı model görünüşleri: (a) Yay-1 ve Yay-2 modeli, (b) Yay-3 ve Yay-4 modeli, (c) Yay-5 ve Yay-6 modeli, (d) Yay-7 ve Yay-8 modeli

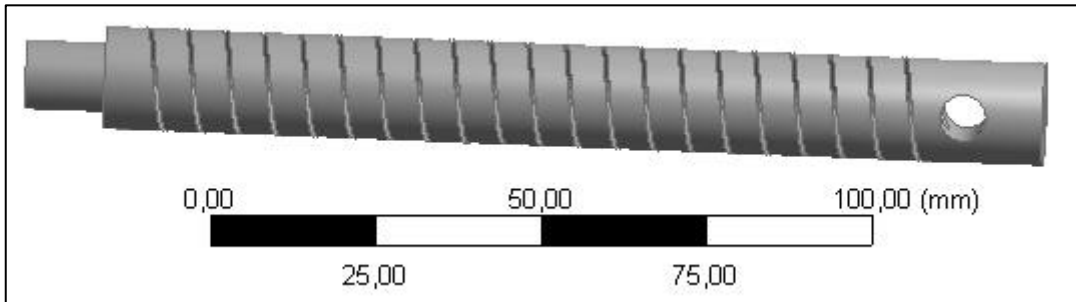
Deneyisel alışmalar kısmında kullanılan işleme yaylara ait modeller, Ansys Workbench [35] programına aktarılmıştır. Bu modellerin geometrik ebatları; Bölüm 4'deki, izelge 4.1'de verilmiştir. Ansys uygulamasındaki görünümleri ise şekil 5.3'de verilmiştir.



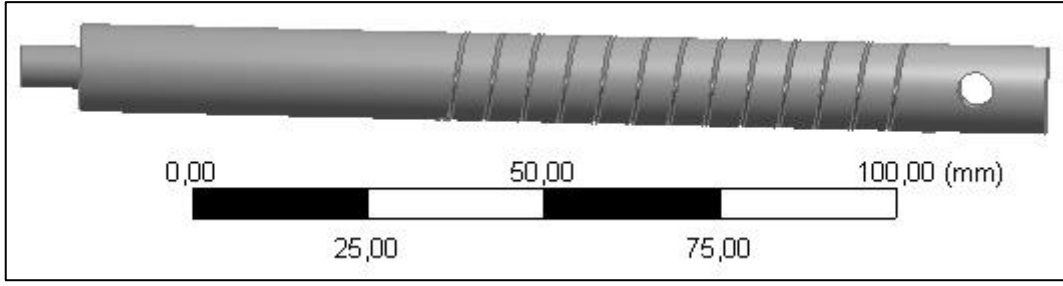
(a)



(b)



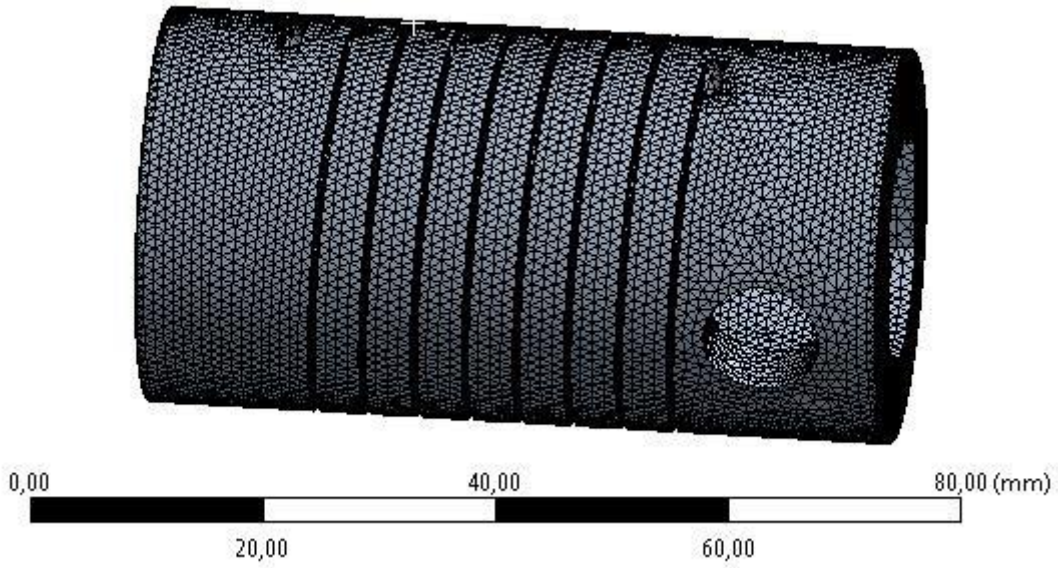
(c)



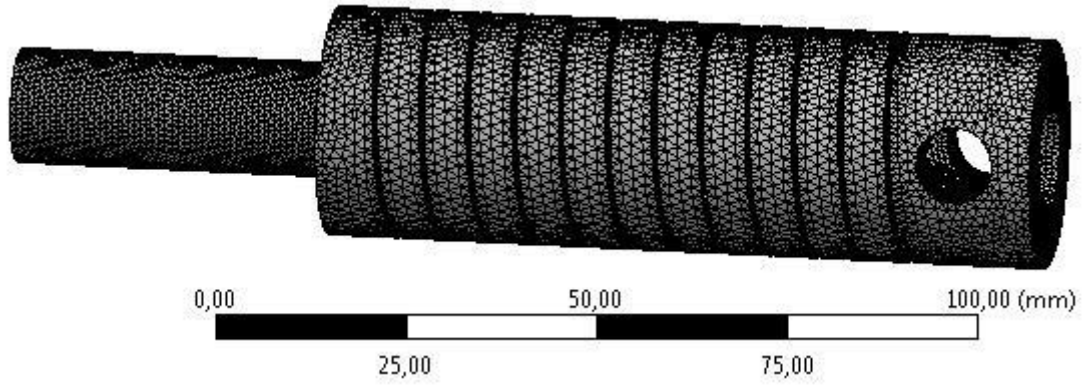
(d)

Şekil 5.3. Analiz modelleri: (a) Yay 1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4,(c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8

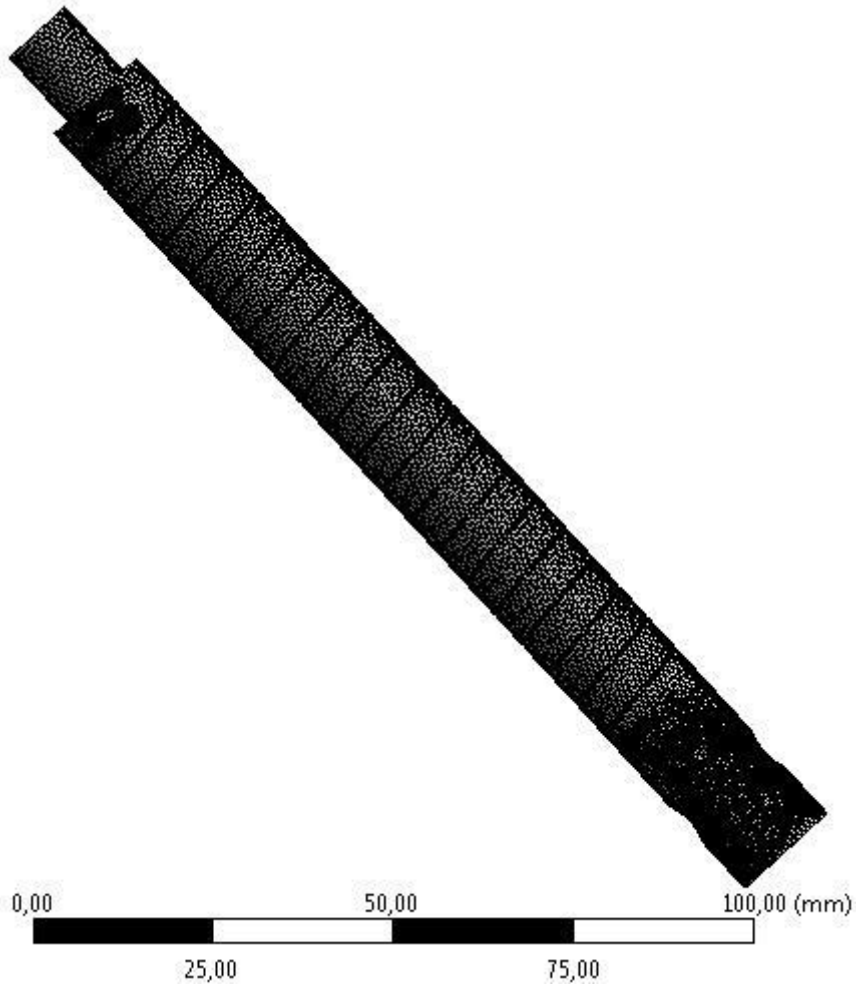
Her bir analiz modeli için yayların çözüm ağları Ansys Workbench programında modellenmiştir. Analiz modellerinde oluşturulan ağ yapıları, Şekil 5.4'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4. Analiz modellerinin ağ yapıları: (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8

Analiz modellerinde, 10 düğümlü 4 yüzlü tetrahedral eleman tipi kullanılmıştır. Kullanılan elemanlara ait özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ağ yapılarının özellikleri

Yay Model No.	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
1,2	Tetrahedral	104937	178991
3,4	Tetrahedral	171251	285956
5,6	Tetrahedral	141172	238943
7,8	Tetrahedral	168159	275734

5.3. Malzeme Özellikleri

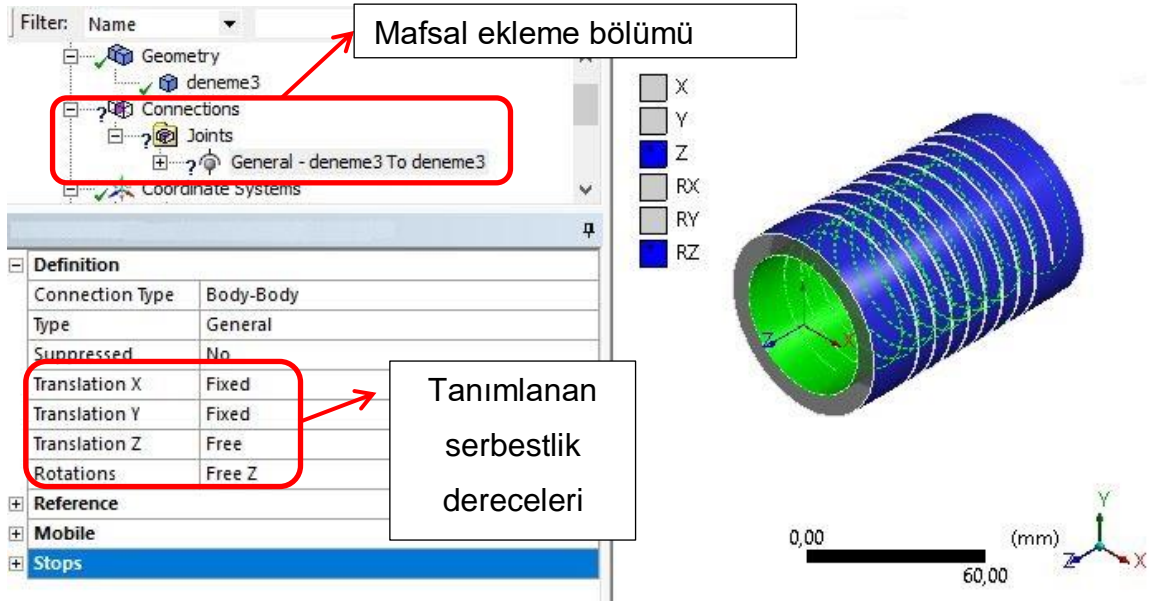
Analiz modellerinde tanımlanan malzemeler, testlerde kullanılan işleme yayların malzemeleridir. Analizleri yapılan bütün işleme yayların malzemesi Maraging C350 çeliğidir. Bu malzemenin analiz modelinde tanıtılması için kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Malzeme özellikleri [36]

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa) (E)	Poisson Oranı (ν)	600°F' de ısıtılmış işlem uygulanmış Akma Gerilmesi (Mpa) (σ_{ak})
C350 Çelik	200	0.3	2033

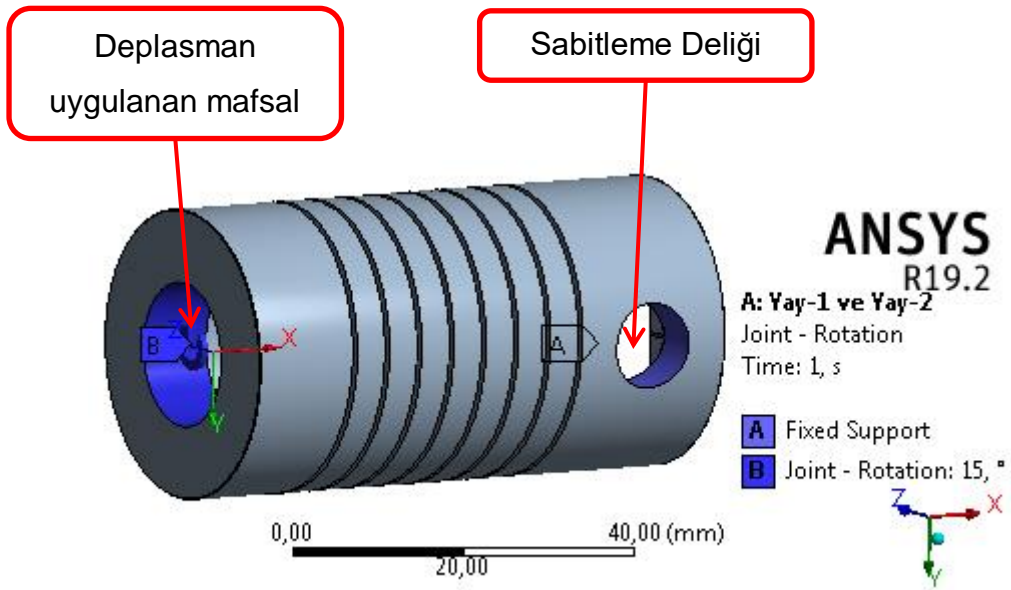
5.4. Sınır Koşulları, Yükleme ve Diğer Analiz Parametreleri

İşleme yaylar analiz modellerinde, bir ucundan sabitlenerek diğer ucundan 15° açısal deplasmana uğratılmışlardır. Açısal deplasmanın uygulandığı kısma mafsalsal tanımlanarak bu mafsala dönme ve eksenel ötelenme yönünde serbestlik tanımlanmıştır. Bu mafsalsal ile işleme yayların tıpkı test düzeneğinde sahip oldukları serbestlik dereceleri analiz modelinde de tanımlanmıştır. Ansys uygulamasında mafsalsal tanımlamanın nasıl yapıldığı Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Mafsal tanımlanması

Uygulanan sınır koşulları ve yüklemeler Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



(a)

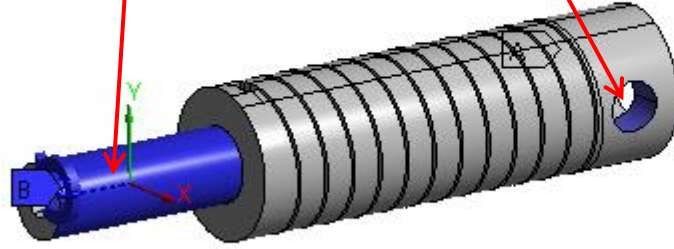
Deplasman uygulanan mafsals

Sabitlenme Deliği

ANSYS
R19.2

A: Yay-3 ve Yay-4
Joint - Rotation
Time: 1, s

A Fixed Support
B Joint - Rotation: 15, °



0,00 35,00 70,00 (mm)



(b)

Deplasman uygulanan mafsals

Sabitlenme Deliği

ANSYS
R19.2

A: yay-5 ve Yay-6
Joint - Rotation
Time: 1, s

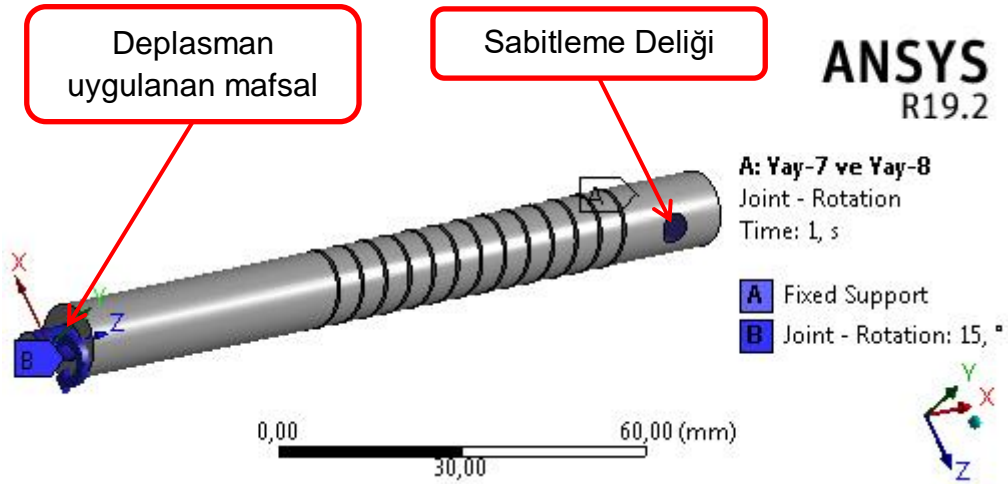
A Fixed Support
B Joint - Rotation: 15, °



0,00 30,00 60,00 (mm)



(c)



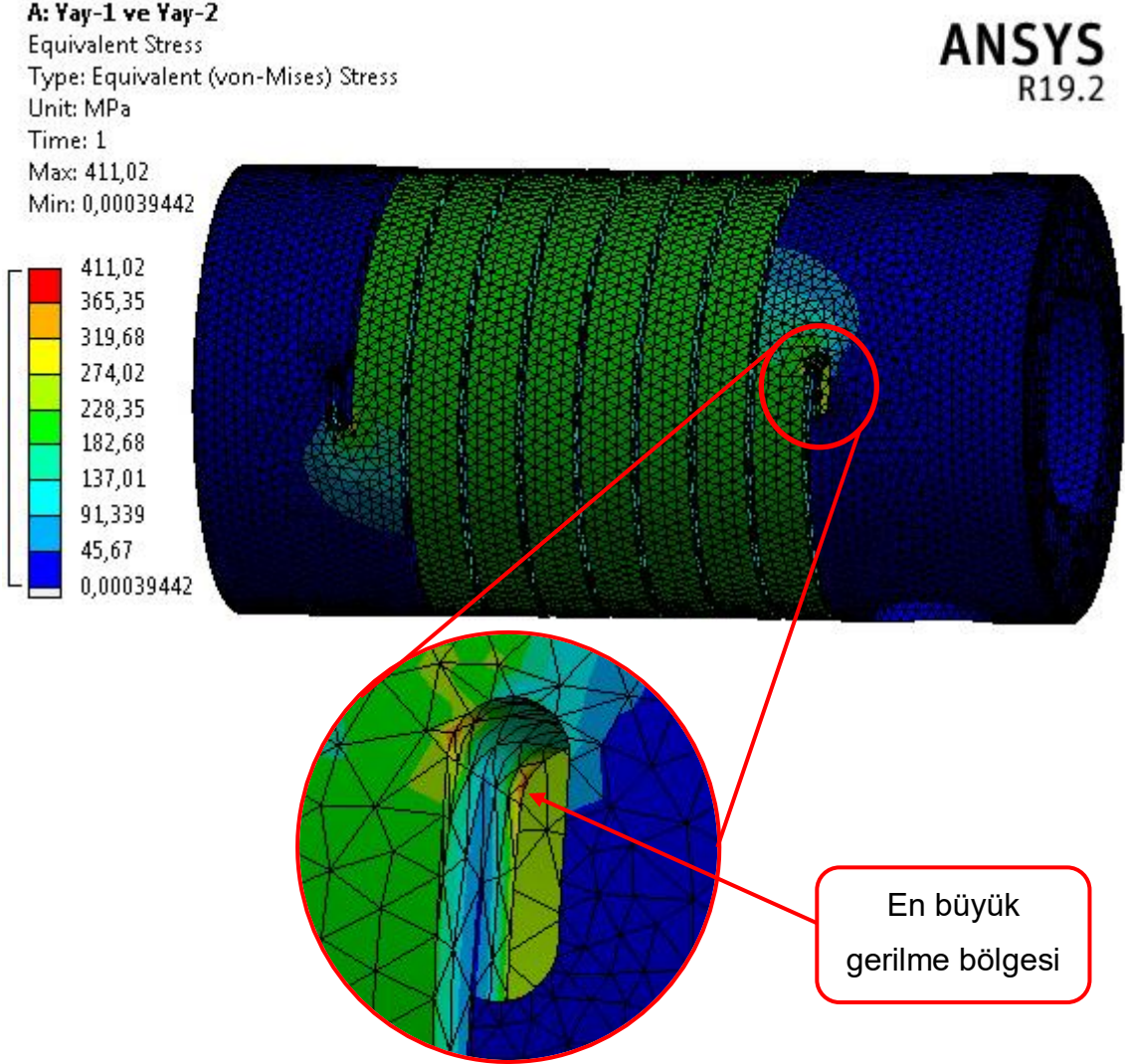
(d)

Şekil 5.6. İşleme yaylar için yükleme ve sınır koşulları: (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8

Yapılan bütün analiz çalışmalarında yapısal statik analiz tipi kullanılmıştır. Uygulanan açısal deplasman miktarı oldukça büyük olduğu için büyük deformasyon durumu analiz çözüm tipine dahil edilmiştir. Bu durum, analiz çözüm süresini oldukça uzatmasına rağmen bu analiz senaryosunda doğru sonuçlar elde etmek için gerekli bir adımdır.

5.5. Analiz Sonuçları

Yapılan analizler sonucunda; açılmal deplasman altında moment değerleri ve işleme yay geometrileri üzerinde oluşan von Mises gerilme dağılımları elde edilmiştir. İşleme yaylara ait von Mises gerilme dağılımları, Şekil 5.7'de verilmiştir.



(a)

A: Yay-3 ve Yay-4

Equivalent Stress

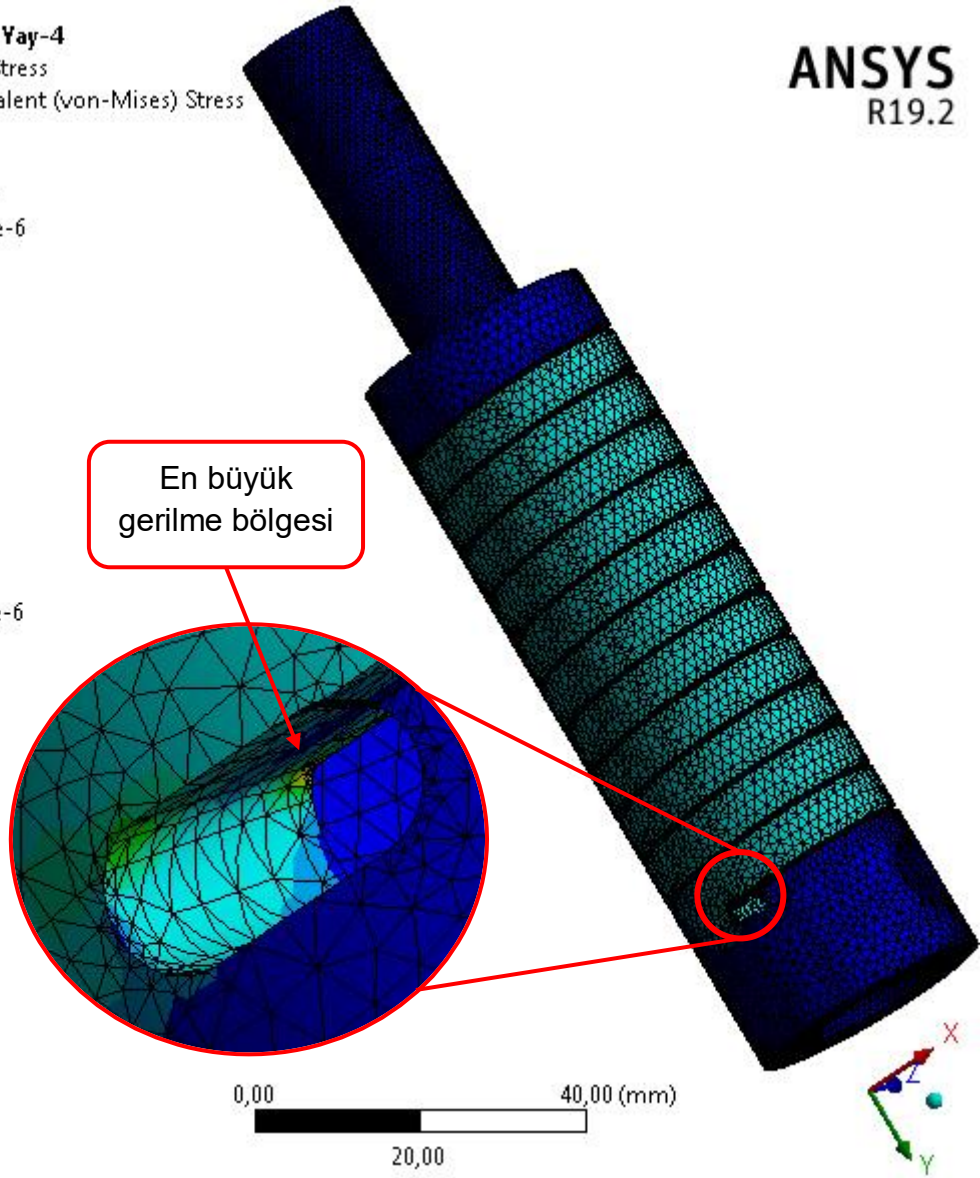
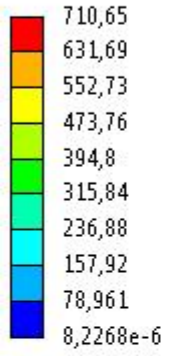
Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

Max: 710,65

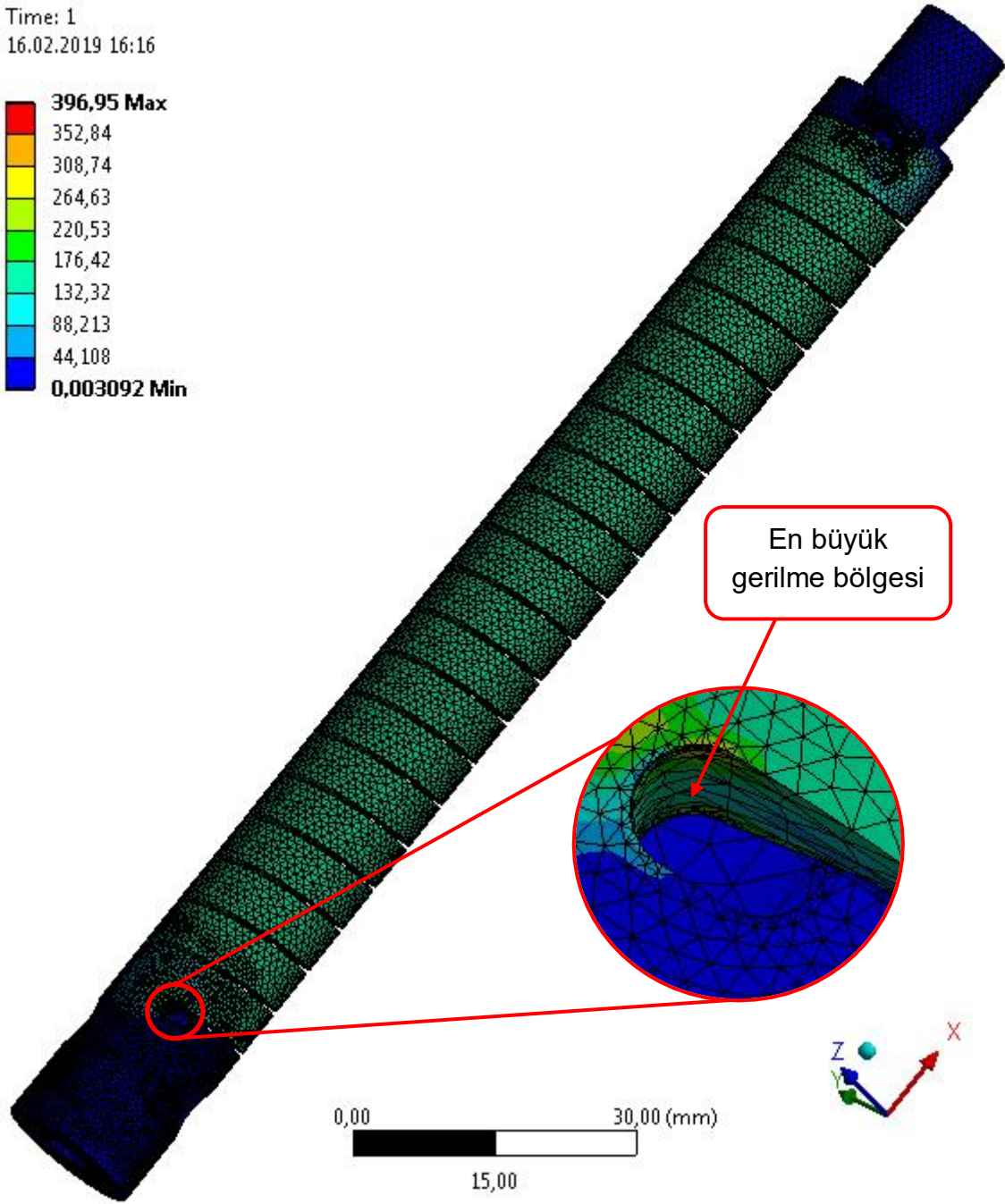
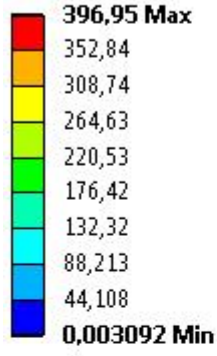
Min: 8,2268e-6



(b)

A: yay-5 ve Yay-6
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
16.02.2019 16:16

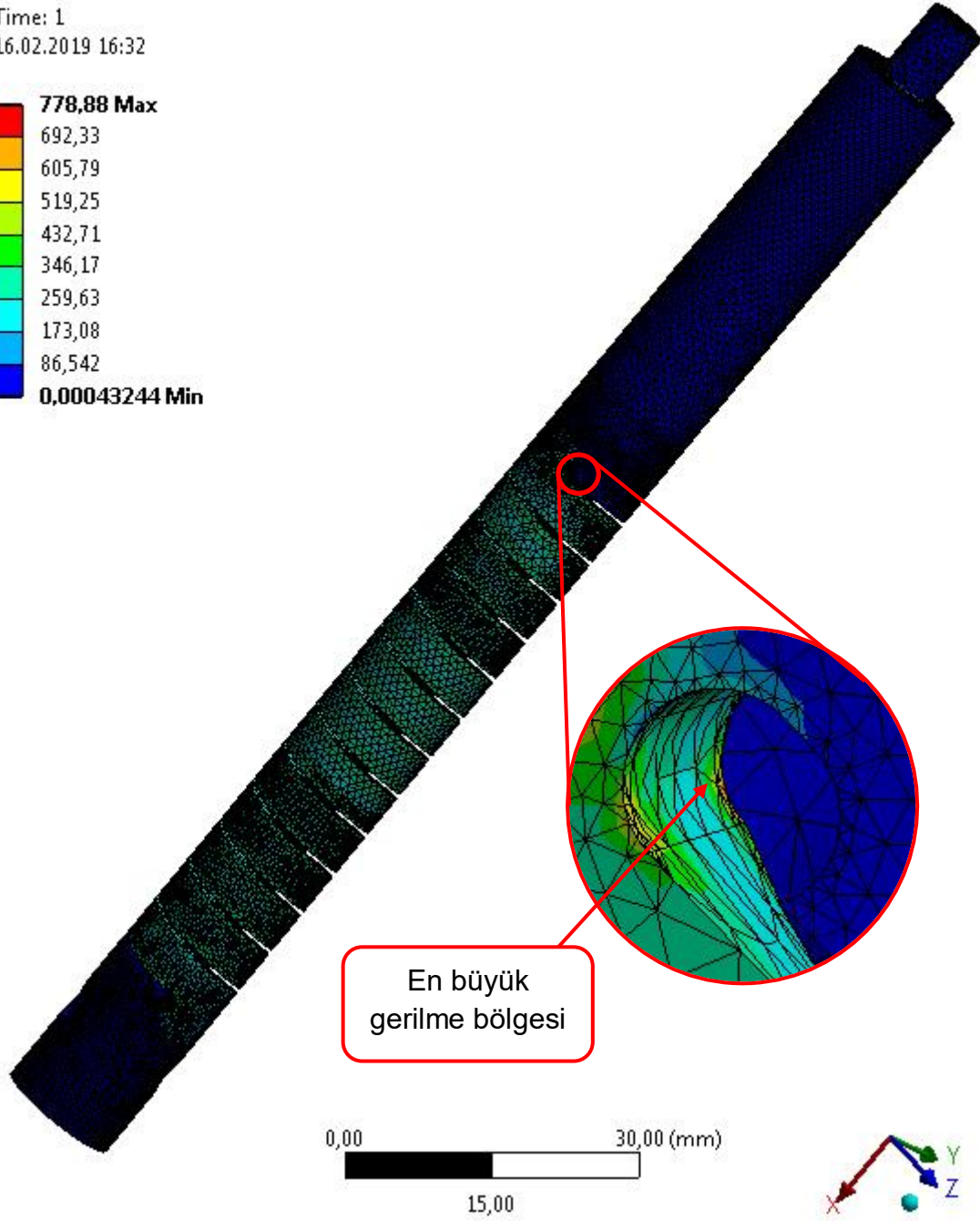
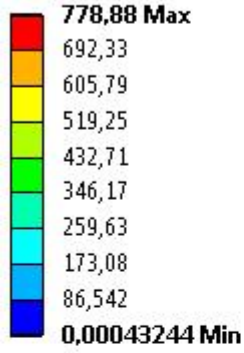
ANSYS
R19.2



(c)

A: Yay-7 ve Yay-8
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
16.02.2019 16:32

ANSYS
R19.2



(d)

Şekil 5.7. İşleme yay Von Mises gerilme dağılımları (MPa): (a) Yay-1 ve Yay-2, (b) Yay-3 ve Yay-4, (c) Yay-5 ve Yay-6, (d) Yay-7 ve Yay-8

Deneysel çalışmalarda kullanılan işleme yaylar için yapılan analiz çalışmaları sonucunda, Von Mises gerilme dağılımları ve moment değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.7'deki gerilmeler incelendiğinde; elde edilen değerlerin malzeme akma değeri olan 2033 MPa'nın altında olduğu ve emniyetli bölgelerde oldukları görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, 15° burulma açısı (θ) altında işleme yay modellerinden elde edilen moment değerleri ve hesaplanan yay sabiti değerleri (k_s) Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen moment ve yay sabiti " k_s " değerleri

$\theta = 15^\circ$ Kapama Yönü			$\theta = 15^\circ$ Açma Yönü	
Yay Model No.	Moment değeri [N.m]	k_s [N.m/°]	Moment değeri [N.m]	k_s [N.m/°]
1,2	4.485	0.2990	5.184	0.3456
3,4	12.343	0.8229	14.795	0.9863
5,6	3.880	0.2587	4.563	0.3042
7,8	5.826	0.3884	7.508	0.5005

5.6. Ağ Yapısının Etkisinin İncelenmesi

Analiz modellerinde oluşturulan çözüm ağı, birçok elemanın birleşimiyle oluşmaktadır. Her bir elemanın büyüklüğü, toplam ağdaki eleman sayısını ve düğüm noktalarını etkilemektedir. Eleman boyutlarının küçük olması, çözüm ağındaki toplam eleman sayısını arttıran bir unsurdur. Bazı analiz modelleri için küçük boyuttaki elemanlarla örülmüş bir çözüm ağından daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Fakat çözüm ağındaki eleman sayısının artması, çözüm süresini uzatan bir faktördür. Analiz modelleri için eleman boyutunun optimum değerinin elde edilmesi gereklidir.

Bu tez kapsamında yapılan parametrik analiz çalışmalarındaki toplam analiz sayısı (720) düşünüldüğünde, eleman boyutundaki en ufak bir farklılık çözüm süresini önemli miktarda etkilemektedir. Bu nedenle analizler başlatılmadan önce uygun eleman boyutunun belirlenmesi gereklidir. Bu kısımda, farklı boyutlardaki

elemanlar ile analiz çalışmaları tekrarlanarak optimum eleman boyutu elde edilmiştir. Farklı eleman boyutları ile tekrarlanan analizlerden elde edilen maksimum Von Mises gerilme değerleri, moment değerleri ve k_s yay sabiti değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir. Çizelgedeki "Eleman boyutu" sütunundaki değerler, eleman ayrıt uzunluğunu ifade etmektedir.

Çizelge 5.4. Farklı eleman boyutları için tekrarlanan sonlu elemanlar analiz sonuçları

$\theta = 15^\circ$ Kapama Yönü

Yay Model Numarası	Eleman boyutu	Moment değeri	Yay sabiti " k_s "	En büyük Eşdeğer gerilme
	[mm]	[N.mm]	[N.m/°]	[MPa]
1,2	0.9	4.4846	0.2990	453.79
	1.0	4.4848	0.2990	411.02
	1.1	4.4850	0.2990	464.39
	1.2	4.4853	0.2990	458.29
3,4	0.9	12.342	0.8228	710.65
	1.0	12.343	0.8229	690.02
	1.1	12.344	0.8229	749.89
	1.2	12.345	0.8230	716.88
5,6	0.9	3.8793	0.2586	391.25
	1.0	3.8801	0.2587	396.95
	1.1	3.8810	0.2587	397.44
	1.2	3.8816	0.2588	397.85
7,8	0.9	5.8286	0.3886	766.49
	1.0	5.8256	0.3884	778.88
	1.1	5.8261	0.3884	771.89
	1.2	5.8280	0.3885	773.89

Değerlendirilen eleman boyutlarına göre sonuçlarda önemli bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Parametrik analiz çalışmaları için eleman boyutu 1 mm olarak belirlenmiştir.

5.7. Özet

Bu bölümde, deneysel çalışmaları yapılan işleme yaylar için deneysel çalışmalarda uygulanan sınır koşulları ve yükler altında analiz modelleri oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yay sabiti değerleri ile aynı yaylar için Bölüm 4'de deneysel yöntemlerle elde edilen yay sabiti değerleri Çizelge 5.5'de karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerin deneysel değerlere yakınlığı, yüzdesel olarak verilmiştir.

Çizelge 5.5. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerin deneysel değerlerle karşılaştırılması

<i>Kapama Yönü</i>				<i>Açma Yönü</i>		
<i>Yay Model No.</i>	<i>Deneysel Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Sayısal Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Deneysel Sonuçlarla Kıyaslama Fark</i>	<i>Deneysel Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Sayısal Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Deneysel Sonuçlarla Kıyaslama Fark</i>
	k_d [N.m/°]	k_s [N.m/°]		[%]	k_d [N.m/°]	
1,2	0.3059	0.2990	2.25	0.3545	0.3456	2.51
3,4	0.8437	0.8229	2.47	1.015	0.9863	2.83
5,6	0.2641	0.2587	2.04	0.3112	0.3042	2.25
7,8	0.3953	0.3884	1.74	0.5105	0.5005	1.96

Çizelge 5.5'deki sonuçlar incelendiğinde, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analiz modellerinden elde edilen yay sabiti sonuçlarının deneysel çalışmalarla elde edilen yay sabiti değerlerine oldukça yaklaştığı görülmüştür. Bu durum, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tezin sonraki aşamalarında 720 adet farklı boyuttaki işleme yay için bu kısımda anlatılan analiz modeline bağlı kalarak parametrik sonlu eleman analizleri

yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlarla veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanına bağlı kalarak yay sabiti tahmini yapabilen yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Veri tabanındaki hatalar, yay sabiti tahminindeki değerleri etkileyeceği için analiz sonuçlarının güvenilirliği oldukça önemlidir.

Parametrik analiz çalışması uzun süreli bir çalışma olacağı için analiz çözümlerine başlanmadan önce, analiz modeline girdi olarak tanımlanan parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki şiddetleri araştırılmalıdır. Bu durum, analiz sonuçlarından elde edilen veri tabanının verimliliği açısından önemlidir.

Bir sonraki bölümde; yapay sinir ağı veri tabanını oluşturan, parametrik analiz sayısını (720 adet) belirlemek ve işleme yay tasarımını oluşturan boyutsal parametrelerin yay sabiti ve gerilmeler üzerindeki etkisini belirlemek için parametre korelasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, işleme yay geometrisini oluşturan parametrik büyüklüklerin yay sabiti ve gerilmeler üzerindeki etkisi araştırılarak en uygun parametrik analiz sayısı belirlenmiştir.

6. PARAMETRE KORELASYON ÇALIŞMASI

Sonlu eleman analizlerinin deneylerle doğrulanmasından sonra her parametrenin tasarım üzerindeki etkisini incelemek ve yapay sinir ağı için gerekli analiz sayısını belirlemek amacıyla parametrik korelasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma ile aynı zamanda yapay sinir ağına parametrelere tanımlanacak değer aralıkları belirlenmiştir. Burulma yüklemeleri altında çalışan işleme yayların tasarımını oluşturan parametrelerin moment ve gerilmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

6.1. Çalışmanın Teorisi

Bu bölümde; girdi parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisi, parametre korelasyon çalışması yapılarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, ANSYS Workbench DesignXplorer [35] isimli araç çubuğunda en iyileme çalışmaları yapılmıştır. Bu araç çubuğunun temel çalışma prensibi, saptama modellemelerinin yapılmasıdır [37]. Girdi verilerinin arttırılması, bu araç çubuğundan elde edilecek sonuçların doğruluğunu arttırmaktadır.

DesignXplorer araç çubuğunda farklı amaçlar için kullanılmak üzere beş seçenek bulunmaktadır. Bu çalışmada, “parametre korelasyon” kısmı ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Parametre korelasyon araç çubuğu kullanılarak, girdi parametrelerinin her bir sonuç üzerindeki etki ağırlıkları bulunmuştur.

Parametre korelasyon çalışmalarında yaygın olarak iki farklı korelasyon tipi kullanılmaktadır. Bunlar, Pearson ve Spearman korelasyonlarıdır. Pearson korelasyonu doğrusal bir korelasyon tipidir. İki sayısal ölçüm arasında ilişki olup olmadığını araştırır [38]. Bu metodun sonucunda, “-1” ile “1” aralığında değişen bir değer elde edilir. Bu değer, girdi parametresi ile çıktı parametresi arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal bir değerdir. Yani, girdi parametresinin çıktı parametresi üzerindeki etkisini ifade eder. Diğer yaygın olarak kullanılan korelasyon tipi ise Spearman rank korelasyonudur. Bu metod, Pearson korelasyonuna göre daha kapsamlıdır. Doğrusal olmayan ilişkiye sahip çalışmalar için tercih edilir. Lineer olmayan durumlarda da geçerli bir yöntemdir. Metod sonucunda Pearson metoduna benzer şekilde “-1” ile “1” aralığında değişen sonuç elde edilir. Sonuç “1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri aynı yönde artar, sonuç “-1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri ters yönde artar. Çalışma

kapsamında yapılan parametrik analizler, yüksek deformasyon içeren analiz (yay burulması) tipleridir. Analiz sonucunda elde edilecek çıktı parametreleri ile girdi parametreleri arasında doğrusal bir ilişki olamayabilir. Bu nedenle korelasyon çalışmaları için Pearson yöntemine göre daha kapsamlı bir metod olan Spearman rank korelasyonu tercih edilmiştir. Pearson ve Spearman rank korelasyon tekniklerinde, değerlerin 0.5 ile 1 arasında olması kıyaslanan veriler arasında pozitif yönde güç bir ilişki olduğunu gösterir. Değerlerin -0.5 ile -1 arasında olması durumunda ise, veriler arasında negatif yönde güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir. -0.5 ile +0.5 aralığında ise girdi parametresi ile çıktı parametresi arasındaki ilişki miktarı zayıflamaktadır. Bu değer, sıfıra yaklaştıkça ilişki miktarı zayıflar [38-40].

Spearman rank korelasyonunu daha iyi anlatabilmek için Çizelge 6.1’de bir örnek verilmiştir. Bu tablodaki Veri-1 ve Veri-2’deki değerler rastgele seçilmiştir. Rank-1 ve Rank-2 değerleri ise; küçükten büyüğe doğru veri değerlerine göre sıralanmıştır. Tablodaki “*d*” değerleri Rank-1 ile Rank-2 arasındaki farkı ifade etmektedir. Ayrıca tablonun son sütununda “*d*” değerinin karesi gösterilmiştir. Spearman rank korelasyonu Denklem (6.1)’de verilmiştir. Bu Denklemde “*n*” örnekleme sayısını temsil etmektedir. (Bu örnek için $n = 3$). “*r*” değeri ise Veri-1 ile Veri-2 arasındaki korelasyon sayısını göstermektedir.

Çizelge 6.1. Spearman rank korelasyonu örneği

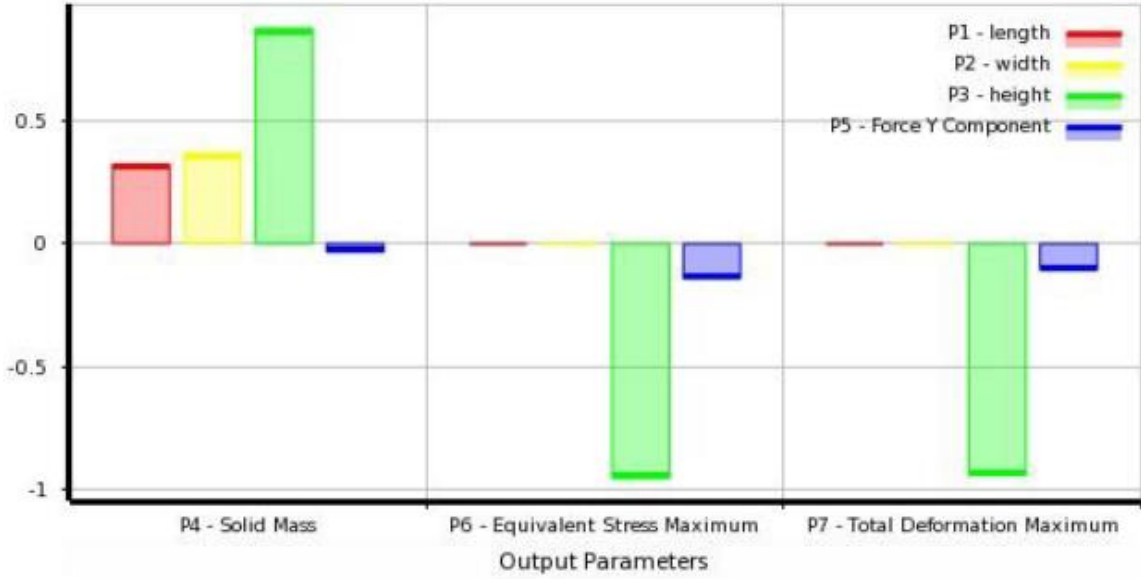
<i>Veri – 1</i>	<i>Rank – 1</i>	<i>Veri – 2</i>	<i>Rank – 2</i>	<i>d</i>	<i>d</i> ²
6	2	5	1	1	1
13	3	9	2	1	1
4	1	11	3	-2	4

$$r = 1 - \left(\frac{6 \cdot \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \right) \quad (6.1)$$

$$r = -0.5 \quad (6.2)$$

Elde edilen “-0.5” değeri, Veri-1 ile Veri-2 arasında ters yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. Eksi ifadesi ilişkinin ters yönde olduğunu ifade eder. Yani , Veri-1 arttıkça Veri-2 azalır. Bu rakam 1 ya da -1 değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki miktarı artar.

Çalışma kapsamında kullanılan ANSYS [35] programında, parametre korelasyon sonuçları sayısal değerlerin olduğu matris ve renk skalası ile gösterilmiş matris şeklinde ifade edilmektedir. Sayısal değerlerin olduğu matriste, her girdi parametresi ile her çıktı parametresi arasında -1 ile 1 arasında değişen değerler bulunur. Yukarıda da anlatıldığı gibi bu değerın "1" değerine yaklaşması, girdi ile çıktı parametresi arasındaki ilişki orantılı bir şekilde arttığını gösterir, "-1" değerine yaklaşması ise girdi ile çıktı parametresi arasındaki ilişkinin test orantılı bir şekilde arttığını gösterir. Diğer gösterim tipi olan matriste ise renk skalası kullanılarak sayısal değerler ifade edilmektedir. Renk skalası kullanılarak, girdi parametresi ile çıktı parametresi arasındaki ilişki hızlı bir şekilde tayin edilebilmektedir. Hassasiyet grafiğinde; her bir girdi parametresinin korelasyon sonuçları, çıktı parametrelerine göre ayrı ayrı gösterilmektedir. Ansys programından alınan örnek bir hassasiyet grafiği Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu grafikte çıktılar ile girdiler arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 6.1. Örnek hassasiyet grafiği [41]

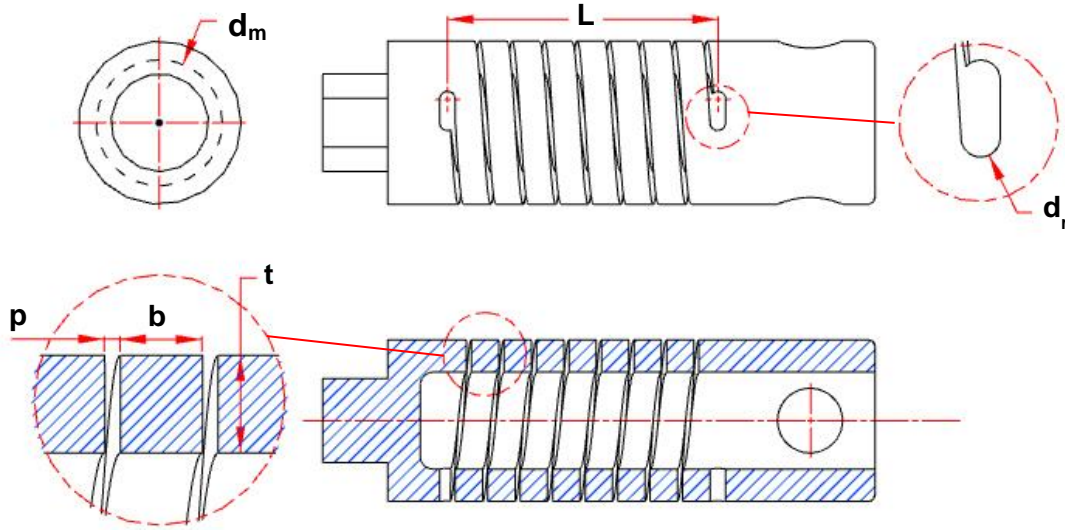
6.2. Çalışma Metodu

6.2.1. Analiz Veri Tabanı'nın Belirlenmesi

İşleme yaylarının yay sabiti ve yay üzerindeki gerilmeleri hesaplayabilmek için yapılan parametrik çalışmada, 720 adet analiz yapılmıştır. Bu analiz verileri çalışmanın veri tabanını oluşturmuştur. Veri tabanındaki analiz sayısı, çözümleme süresi ve kullanılan bilgisayarın çözüm gücü için kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle girdi parametrelerinin her birine ait veri sayısının etkin bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü veri tabanındaki toplam analiz sayısı, her bir girdi parametresinin veri sayısının çarpılmasıyla elde edilmektedir. ($5 \times 4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 = 720$)

Bu çalışmada, parametre korelasyon çalışmaları için ayrı bir analiz veri tabanı oluşturulmuştur. Buradaki asıl amaç, geometrik girdi parametrelerinin sonuç parametrelerine etki hassasiyetini belirleyerek çalışma için gerekli asıl veri tabanı analiz sayısını belirlemektir. Çıktı parametrelerine göre hassasiyeti yüksek olan girdi parametrelerinin değer aralıkları ve değer sayıları belirlenmiştir. Ansys Workbench [35] içindeki "DesignXplorer" araç çubuğunda bulunan "Parametre Korelasyon" kısmı kullanılarak girdi parametrelerinin hassasiyetleri hesaplanmıştır.

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi çalışma kapsamında toplam 7 farklı girdi parametresi bulunmaktadır. Bunların bir tanesi yükleme parametresi olan açılmalı deplasman " α " dır. Diğer 6 parametre ise geometrik girdi parametreleridir. Yükleme parametresinin sonuç parametreleri olan tork ve gerilme değerlerine doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Fakat, geometrik girdi parametrelerinin sonuç parametreleri üzerindeki etkisi bilinmemektedir. Bu nedenle, 6 farklı geometrik girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi bu kısımda araştırılmıştır. Şekil 6.2'de geometrik girdi parametreleri gösterilmiştir.

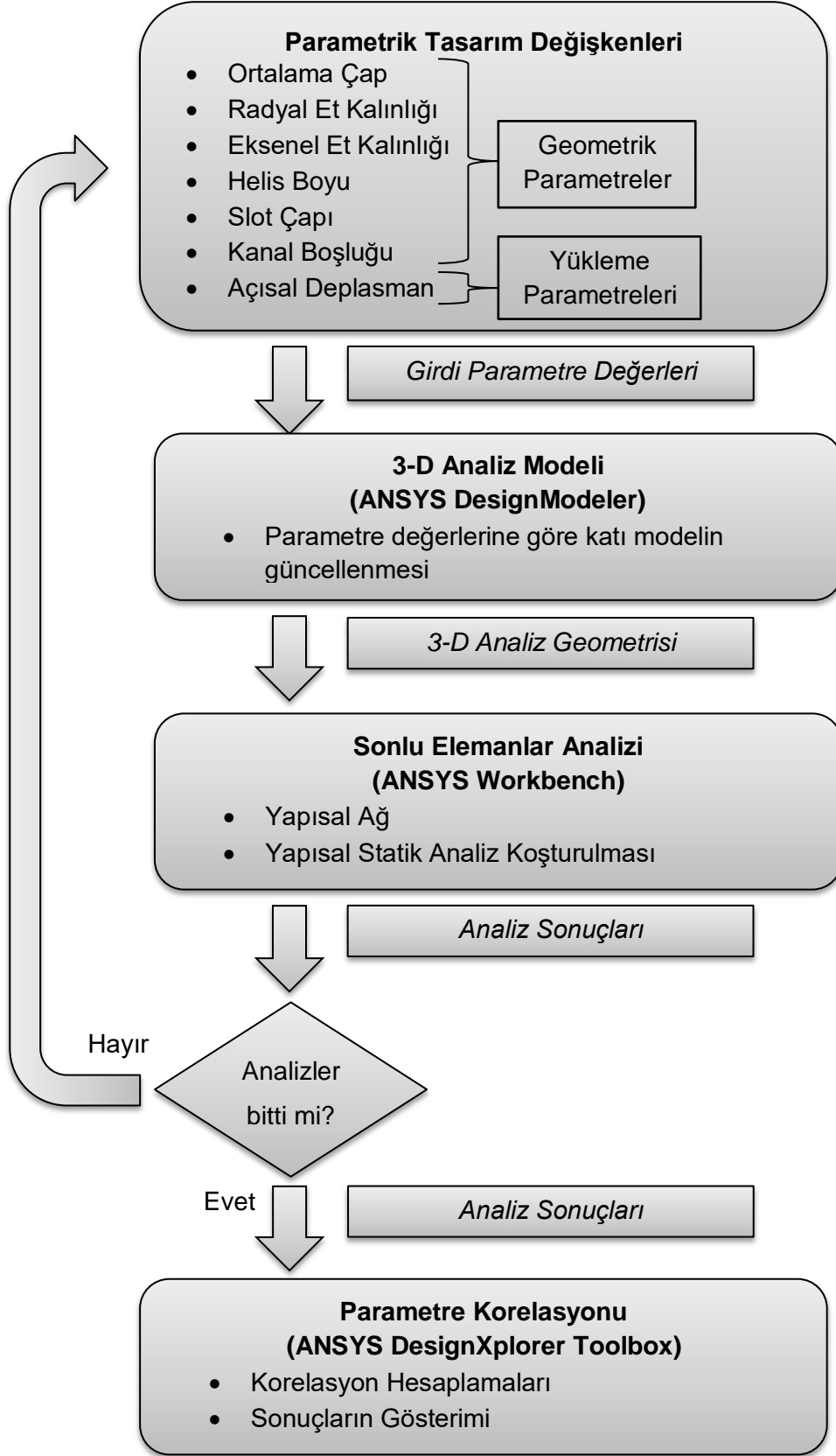


Şekil 6.2. Geometrik girdi parametreleri

Girdi parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisine göre asıl veri tabanındaki değer aralıkları ve değer sayıları belirlenmiştir.

6.2.2. Parametrik Korelasyon Prosedürü

Parametre korelasyon çalışması bazı adımlardan oluşmaktadır. İlk olarak, analiz geometrisindeki girdi parametreleri nominal değerlerinde tanımlanır. Yükleme parametresi de nominal değerinde tanımlanır. Daha sonra, 100 sonlu eleman analizi için ANSYS program algoritmaları, her bir girdi parametresi için daha önceden tanımlanan alt değer ve üst değer aralığında değerler tanımlar [37]. 100 farklı analiz modeli için parametrik girdi değerleri tanımlanarak bir tablo oluşturulur. Bu değerlerin olduğu tablo, üç boyutlu analiz modellerinin oluşturulabilmesi için ANSYS DesignModeler araç çubuğuna aktarılır [35]. Bir sonraki adımda, tablodan seçilen tasarım durumu için daha önceden belirlenen çözüm ağı ayarları ile çözüm ağı oluşturulur ve yapısal statik analiz başlatılır. 100 farklı analiz modeli bitene kadar bu durum devam eder. Elde edilen bütün parametrik çıktı değerleri ile girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sonuçlar, korelasyon matrisi renk skalası, sayısal değerli matris ve hassasiyet grafiği şeklinde verilmiştir. Şekil 6.3'de parametrik korelasyon analizini anlatan bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 6.3. Parametre korelasyon çalışmaları akış şeması

Parametrik analiz çalışması, 1 analiz paketinden oluşmaktadır. Bu analiz paketinde, geometrik girdi parametreleri değiştirilerek 100 adet analiz yapılmıştır. 100 farklı analiz modelinin oluşturulması için geometrik girdi parametreleri belirli bir aralıkta değiştirilmiştir. 100 farklı analiz modelinin oluşturulmasında, Çizelge 6.2'deki değer aralıkları kullanılmıştır. 6 farklı geometrik girdi parametresi bu değer aralıklarında değiştirilerek farklı geometriler elde edilmiştir.

Çizelge 6.2. Geometrik girdi parametrelerinin nominal değerleri, alt sınır ve üst sınır değerleri

Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Nominal Değer	Alt sınır Değeri	Üst Sınır Değeri
t	Radyal et kalınlığı	5	4.5	5.5
b	Eksenel et kalınlığı	5	4.5	5.5
p	Kanal boşluğu	0.5	0.45	0.55
L	Helis boyu	30	27	33
d_m	Ortalama çap	25	22.5	27.5
d_r	Slot çapı	1.8	1.62	1.98

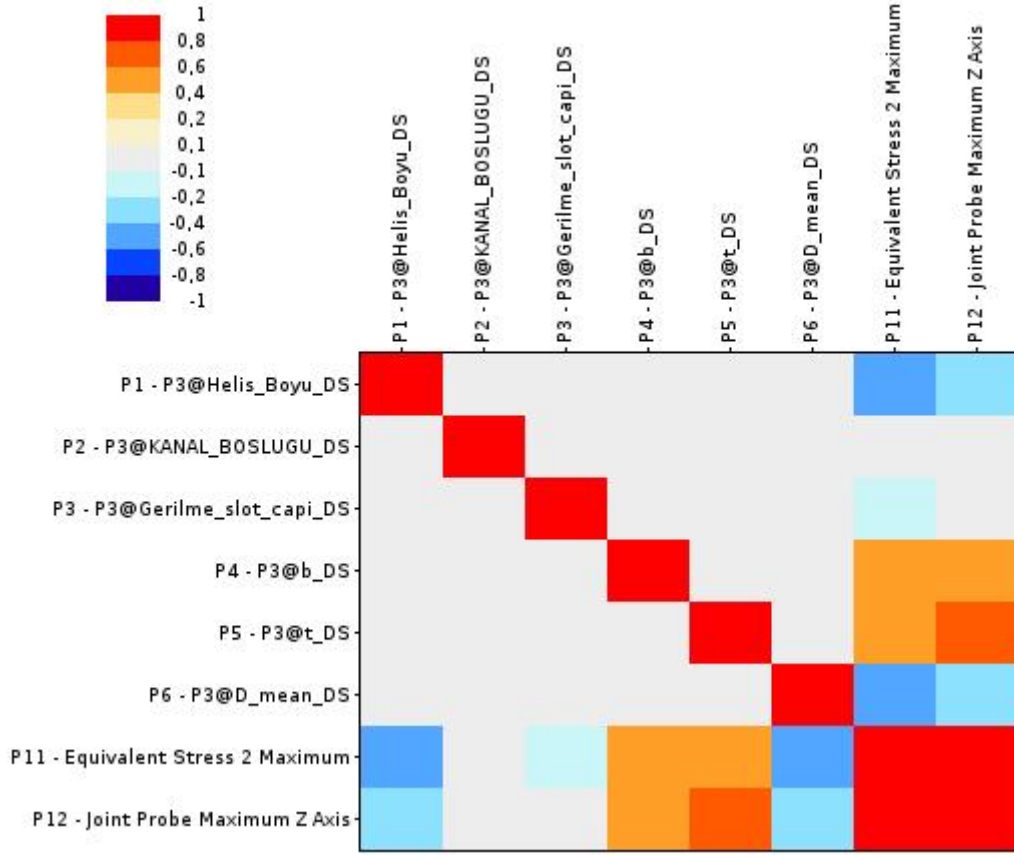
6.3. Parametre Korelasyon Sonuçları

Parametrik korelasyon matrisleri ve grafikleri, 100 farklı geometri için oluşturulan analizlerin tamamlanmasıyla oluşturulmuştur. Şekil 6.4'de verilen renklerle ifade edilmiş matriste, her bir geometrik girdi parametresinin çıktı parametreleri üzerindeki etki şiddetleri açıklanmıştır. Bu görselde, renkler kırmızıya yaklaştıkça korelasyon değeri "1" değerine yaklaşır. Yani matristeki renk kırmızıya yaklaştıkça, bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında doğru yönde korelasyon değeri artar. Matristeki renk tonları, mavi rengine yaklaştıkça korelasyon değeri "-1" değerine yaklaşır. Yani matristeki renk maviye yaklaştıkça, bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında ters yönde korelasyon değeri artar. Matristeki diğer renk tonları ise "-1" ile "1" aralığında değişen korelasyon değerlerini ifade etmektedir.

Herhangi bir girdi parametresinin herhangi bir çıktı parametresi üzerindeki etki şiddeti ve yönü incelenmek istenildiğinde, o girdi ve çıktı parametrelerinin bulunduğu satır ve sütunların kesişimindeki bloğun rengine bakılarak etki şiddeti

ve yönü anlaşılabilir. Çizelge 6.3'de verilen matris ise aynı sonuçların sayısal verilerle ifade edilmiş halidir. Hem renklerle ifade edilmiş matriste hem de sayısal değerlerle ifade edilmiş matriste bulunan parametrelerin sıralaması rastgele yapılmıştır. Bu sıralamaların herhangi bir önemi yoktur. Matrislerdeki satır ve sütunlar, tanımlanan parametrelerden oluşmaktadır. Parametrelerin satır ve sütundaki sıralamaları aynıdır. Herhangi bir parametrenin satır ve sütundaki kesişim bloğu "1" sayısı ile ifade edilmiştir. Bunun anlamı; parametrenin kendisini doğru yönde, en şiddetli bir şekilde etkilemesidir.

Şekil 6.4'de renklerle ifade edilmiş matris incelendiğinde, radyal et kalınlığı (Parametre t) ile ilk çıktı parametresi olan moment değeri arasında aynı yönde en yüksek korelasyonun olduğu görülmektedir. Eksenel et kalınlığı (Parametre b) ile çıktı parametresi moment arasında aynı yönde güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. Kanal boşluğunun (Parametre p) moment çıktı parametresi üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir. Ortalama çapın (Parametre d_m) moment çıktı parametresi üzerinde ters yönde etkili bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Helis boyu (Parametre L) ile moment çıktı parametresi arasında ters yönde etkili bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Gerilme slot çapının (Parametre d_r) moment çıktı parametresi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Girdi parametrelerinin bir diğer çıktı parametresi olan gerilme değeri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Radyal et kalınlığı (Parametre t) ile çıktı parametresi olan gerilme değeri arasında doğru yönde yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Eksenel et kalınlığı (Parametre b) ile çıktı parametresi gerilme değeri arasında doğru yönde güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. Kanal boşluğunun (Parametre p) gerilme değeri çıktı parametresi üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir. Ortalama çap (Parametre d_m) ile çıktı parametresi olan gerilme değeri arasında ters yönde yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Helis boyu (Parametre L) ile gerilme değeri çıktı parametresi arasında ters yönde etkili bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Gerilme slot çapı (Parametre d_r) ile gerilme değeri çıktı parametresi arasında ters yönde düşük bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Çizelge 6.3'de, 0.2 değerinden yüksek değerler ve -0.2 değerinden küçük değerler koyu sayılarla belirtilmiştir. Bu değerlerin dışındaki sayılar, iki parametre arasındaki korelasyonun çok düşük miktarda olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.4. Renklerle ifade edilmiş korelasyon matrisi

Çizelge 6.3. Korelasyon matrisi

Parametreler	(<i>L</i>)	(<i>p</i>)	(<i>d_r</i>)	(<i>b</i>)	(<i>t</i>)	(<i>d_m</i>)	Eşdeğer Gerilme Çıktısı	Moment Çıktısı
(<i>L</i>)	1.000	-0.009	-0.010	0.004	0.008	0.013	-0.477	-0.283
(<i>p</i>)	-0.009	1.000	0.001	0.013	-0.010	0.024	0.071	0.033
(<i>d_r</i>)	-0.010	0.001	1.000	-0.009	-0.007	0.010	-0.138	0.018
(<i>b</i>)	0.004	0.013	-0.009	1.000	0.000	0.010	0.522	0.477
(<i>t</i>)	0.008	-0.010	-0.007	0.000	1.000	-0.010	0.480	0.780
(<i>d_m</i>)	0.013	0.024	0.010	0.010	-0.010	1.000	-0.425	-0.240
Eşdeğer Gerilme Çıktısı	-0.477	0.071	-0.138	0.522	0.480	-0.425	1.000	0.883
Moment Çıktısı	-0.283	0.033	0.018	0.477	0.780	-0.240	0.883	1.000

Elde edilen sonuçların nasıl yorumlanacağını gösterebilmek için örnek olarak parametre *b* ve parametre *t*'yi ele alalım. Bu parametrelerin eşdeğer gerilme çıktısı üzerindeki etki şiddetleri;

$$r_{b1} = 0.522 \quad (6.3)$$

$$r_{t1} = 0.480 \quad (6.4)$$

$$1 > r_{b1} > r_{t1} > 0 \quad (6.5)$$

Eşdeğer gerilme çıktısı üzerinde, parametre *b*'nin etki şiddeti değerinin parametre *t*'nin etki şiddeti değerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre eşdeğer değer gerilme çıktısı üzerinde; parametre *b*, parametre *t*'ye göre daha etkilidir. Her iki parametrenin de pozitif değer olması, eşdeğer gerilme çıktısı üzerindeki etkilerinin doğru yönde olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde moment çıktısı üzerindeki etki şiddetlerini kıyaslayacak olursak;

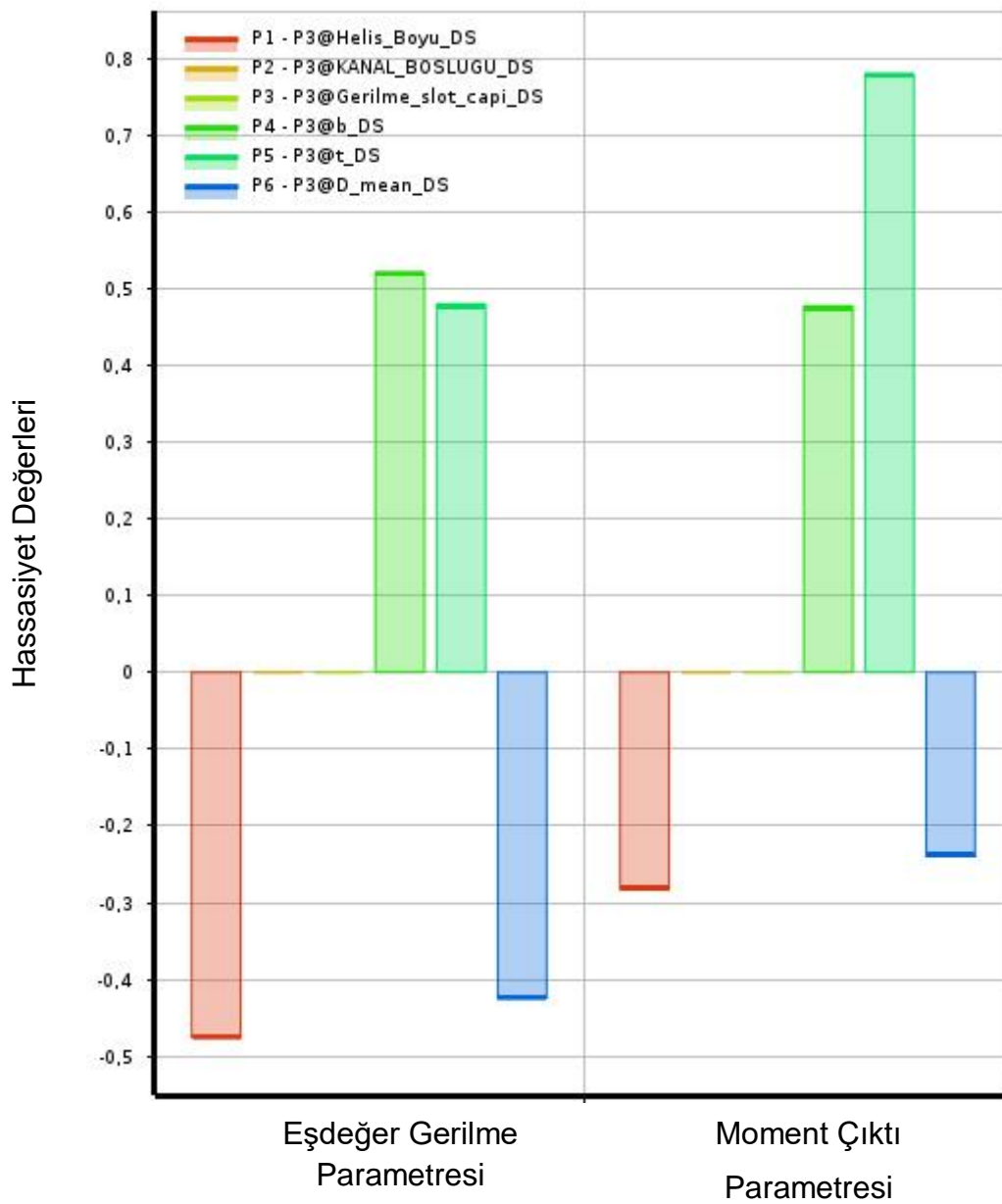
$$r_{b2} = 0.477 \quad (6.6)$$

$$r_{t2} = 0.780 \quad (6.7)$$

$$1 > r_{t2} > r_{b2} > 0 \quad (6.8)$$

olur. Parametre t 'nin moment çıktısı üzerindeki etki şiddeti, parametre b 'ye göre daha yüksektir. Her iki parametrenin etkisi de doğru yöndedir.

Elde edilen korelasyon sonuçları, Şekil 6.5'de bir diğer gösterim şekli olan hassasiyet grafiğinde ayrıca değerlendirilmiştir. Bu grafikte çıktı parametreleri üzerinde baskın olan girdi parametreleri belirtilmiştir.



Şekil 6.5. Hassasiyet grafiği

Parametrik çalışmada, geometrik girdi parametrelerinin moment çıktı parametresi üzerindeki etkileri incelendiğinde; radyal et kalınlığının (Parametre t) en etkili parametre olduğu görülmektedir. İkinci etkili parametre aksel et kalınlığıdır (Parametre b). Üçüncü etkili parametre helis boyudur (Parametre L). Dördüncü etkili parametre ise Ortalama çaptır (Parametre d_m). Kanal boşluğu ve Slot çapı girdi parametrelerinin moment çıktı parametresi üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Geometrik girdi parametrelerinin bir diğer çıktı parametresi olan eşdeğer gerilme üzerindeki etkileri incelendiğinde, en etkili parametrenin aksel et kalınlığı (Parametre b) olduğu görülmektedir. Eşdeğer gerilme üzerindeki ikinci etkili parametre ise radyal et kalınlığıdır (Parametre t). Helis boyu (Parametre L) ve Ortalama çap (Parametre d_m) değeri de eşdeğer gerilme üzerinde etkili parametrelerdir. Kanal boşluğu ve Slot çapı girdi parametrelerinin eşdeğer gerilme parametresi üzerindeki etkileri ise oldukça azdır.

Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Çizelge 6.3'deki sonuçlar incelenerek, girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bütün sonuçlara göre radyal et kalınlığının (Parametre t) sonuçlar üzerindeki en etkili parametre olduğu görülmektedir. Sonuç parametreleri üzerindeki ikinci etkili parametre ise aksel et kalınlığıdır. Üçüncü etkili parametre Helis Boyu (Parametre L), dördüncü etkili parametre ise ortalama çap (Parametre d_m) değeridir. Kanal boşluğu ve Slot çapı girdi parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkileri oldukça azdır.

Parametrik korelasyon çalışması sonucunda girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etki sıralaması; $t > b > L > d_m > d_r > p$ şeklindedir.

100 farklı geometrik ebata sahip işleme yay için yapılan sonlu eleman parametrik analiz çalışması sonucunda korelasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu korelasyon sonuçlarına göre yapay sinir ağı çalışmasındaki bütün girdi parametrelerin değer sayısı ve değer aralıkları belirlenmiştir. Değer aralıklarının seçimleri, test çalışmalarında kullanılan işleme yayların geometrilerini kapsayacak şekilde yapılmıştır. Bütün girdi parametrelerine ait değer sayısı ve değer aralıkları Çizelge 6.4'de verilmiştir. Yapay sinir ağı çalışmasında sonuçlar üzerindeki etkisi en yüksek olan girdi parametresinin tanımlandığı değer aralığı en büyük tutulurken, hassasiyeti düşük olan girdi parametrelerinin değer aralığı ise daha küçük tutulmuştur.

Çizelge 6.4. Asıl parametrik çalışmadaki girdi parametrelerinin sayıları ve değerleri

Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Değer Sayısı	Girdi 1	Girdi 2	Girdi 3	Girdi 4	Girdi 5
t	Radyal et kalınlığı	5	4.5	5.25	6	6.75	7.5
b	Eksenel et kalınlığı	4	3.5	4.5	5.5	6.5	-
p	Kanal boşluğu	2	0.635	0.8	-	-	-
L	Helis boyu	3	35	75	125	-	-
d_m	Ortalama çap	3	7.8	21.8	35.8	-	-
d_r	Slot çapı	2	1	1.5	-	-	-
α	Açısal deplasman	1	5	-	-	-	-

Yapay sinir ağı çalışmasında kullanılacak parametre verilerinin sayısı, Çizelge 6.4'ün oluşturulmasıyla belirlenmiştir. Asıl parametrik analiz çalışmasında, toplamda 720 adet farklı geometrideki işleme yay için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. ($5 \times 4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 \times 1 = 720$) Bu parametrik analiz çalışması sonucunda elde edilen veri tabanı; bir sonraki bölümde, yapay sinir ağı çalışmasının veri tabanının oluşturulmasında kullanılmıştır.

7. YAPAY SİNİR AĞI ÇALIŞMASI

7.1. Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, son zamanlarda bilimsel çalışmalarda sıkça kullanılan yapay sinir ağı teorisi kullanılmıştır.

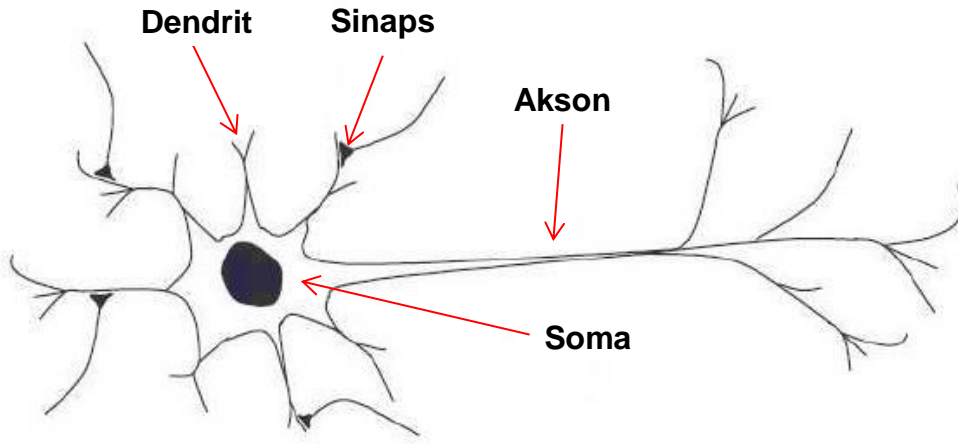
Bu yapay sinir ağı ile tasarımcı; istediği ebatlardaki işleme yay modeli için yay sabiti (k) değerini, analizlere ve deneysel çalışmalara ihtiyaç duymadan çok kısa bir süre elde edebilmektedir. Bu durum; işleme yay tasarımı yapılırken, istelere uygun ebatların belirlenmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

Yapay sinir ağının geliştirilmesinde, Matlab Neural Network Fitting (NNF) aracı kullanılmıştır [42]. Yapay sinir ağı eğitim performans değerleri, elde edilen sonuçlar ve programın nasıl çalıştığı bu kısımda anlatılmıştır.

7.2. Yapay Sinir Ağı Teorisi

Yapay sinir ağı (YSA), temelinde insan beyninin öğrenme prensibinden esinlenilmiş bir sistemdir. İnsan beyni çalışma prensibinin matematiksel olarak modellenmeye çalışılması sonucunda ortaya çıkmıştır. Yapay sinir ağları, tanımlanan örnekleri inceler, bu örnekler hakkında genellemeler yaparak bilinmeyen örnekler hakkında tahminlerde bulunur. Yapı itibari ile biyolojik bir sinir hücresine benzemektedir. Yapay sinir ağları, öğrenmenin yanı sıra ezberleme ve ilişkilendirme yeteneğine de sahiplerdir [43-45].

Biyolojik bir sinir hücresi dendrit, sinaps, akson ve somadan oluşmaktadır. Bu sinir hücresi dışarıdan gelen uyarıları sinapslar ile alır, dendritler ile somaya ileterek burada işlenir. İşlenen uyarılar, akson aracılığı ile diğer sinir hücrelerine iletilmek üzere sinapslara gönderilir [46, 47]. Şekil 7.1'de biyolojik sinir hücresi genel görünümü verilmiştir.

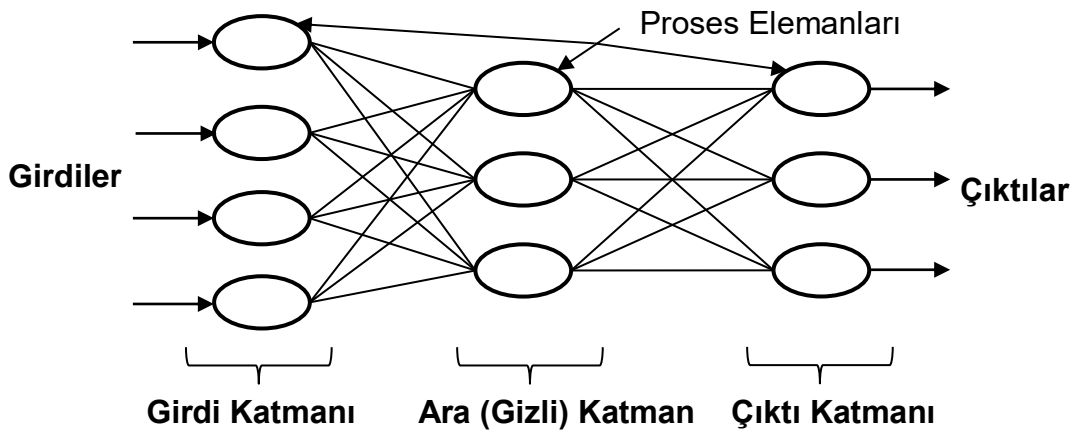


Şekil 7.1. Biyolojik sinir hücresi [46]

Yapay sinir hücreleri genel olarak üç katman içerisinde paralel bir şekilde bir araya gelerek yapay sinir ağlarını oluşturmaktadır. Bu katmanların farklı şekillerde birbirleri ile ilişkili olmaları durumunda farklı ağ mimari yapıları meydana gelir. Yapay sinir ağlarında bulunan katmanlar;

- Girdi katmanı,
- Ara (Gizli) katman,
- Çıktı katmanı

şeklindedir. Girdi katmanında dışarıdan alınan girdi parametreleri işlenerek ara katmana gönderilir. Burada işlenen bilgi çıktı katmanına gönderilir. Çıktı katmanında bulunan proses elemanları ara katmandan gelen bilgileri işleyerek çıktıyı oluştururlar [43]. Şekil 7.2’de bir YSA’ya ait katmanlı yapının genel görünümü verilmiştir.

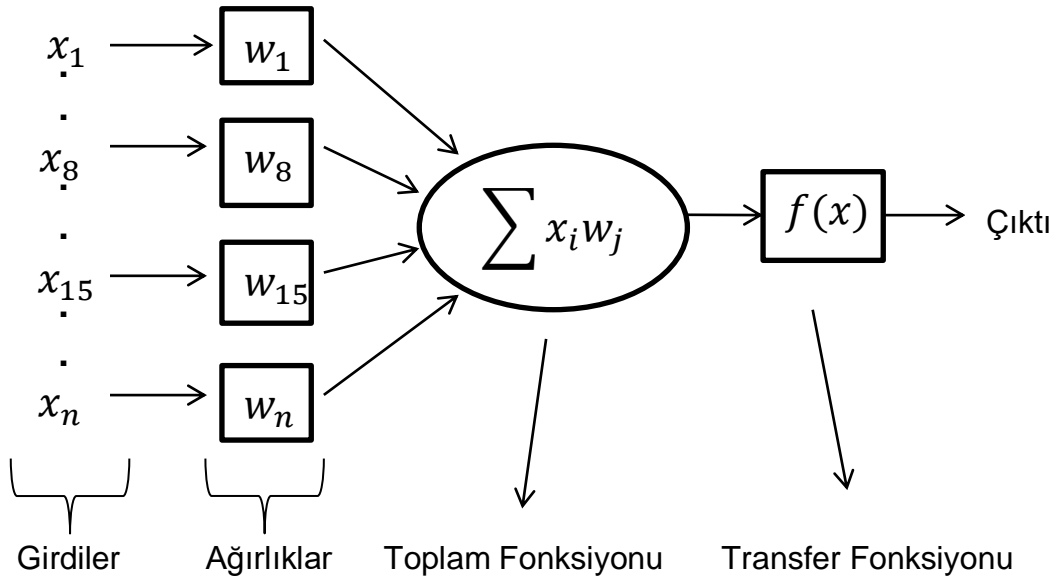


Şekil 7.2. Yapay sinir ağı katmanları

Çalışma kapsamında kullanılan Matlab Neural Network [42] Aracı'nda dört ana sinir ağı aracı bulunmaktadır. İlk araç çubuğu, fonksiyon uydurma araç çubuğudur. Bu araç çubuğunda yapay sinir ağı, girilen veri tabanını kullanarak en uygun fonksiyonu oluşturur. Bir diğer araç çubuğu ise örüntü tanımlama araç çubuğudur. Bu araçta çubuğunda, girdi parametreleri istenilen özelliklere göre kategorize edilir. Üçüncü araç çubuğu, veri kümelendirme araç çubuğudur. Burada veriler benzer özelliklerine göre kümelendirilmektedir. Dördüncü araç çubuğu, zamana bağlı analizdir. Bu araç çubuğunda ise bir sisteme ait geçmişteki verilere bakılarak gelecekteki davranışları tahmin edilir [39]. Bu çalışmada, fonksiyon uydurma araç çubuğu kullanılmıştır.

7.3. Yapay Sinir Hücresi

Yapar sinir hücreleri, nöron olarak da adlandırılmaktadır. Biyolojik sinir hücresine benzer şekildeki elemanlara sahiptir. Bir nöron genel olarak; girdi, ağırlık, toplam foksionu, aktivasyon foksionu ve çıktıdan oluşmaktadır. Şekil 7.3'de bir nöron yapısı görünümü verilmiştir.



Şekil 7.3. Yapay sinir ağı elemanları

Nöron yapıları, doğrusal olmayan parametrelerden oluşmaktadır. Girdi parametreleri (x_i), çıktı parametreleri ise girdi parametrelerinin ağırlıklandırılmış haliyle elde edilen ve doğrusal olmayan halleridir. Girdi parametreleri (x_i), ağırlık parametreleri (w_i) ile çarpılır. Bu çarpımların toplamına 'bias' olarak adlandırılan (w_0) ağırlık sabiti eklenir [48].

$$v = w_0 + \sum_{i=1}^{n-1} w_i x_i \quad (7.1)$$

Elde edilen toplam değeri, aktivasyon fonsiyonundan (f) geçirilerek çıktı değerleri bulunur. Aktivasyon fonsiyonun (f) farklı çeşitleri bulunmaktadır. Denklem (7.2)'de en yaygın tiplerinden olan sigmoid fonsiyonu örneği verilmiştir [48].

$$y = \tanh \left[w_0 + \sum_{i=1}^{n-1} w_i x_i \right] \quad (7.2)$$

Yapay sinir ağı eğitim aşamasında; veri tabanında bulunan veriler, üç kısma bölünmektedir. Bu kısımlar; eğitim seti, değerlendirme seti ve test seti olarak adlandırılır. Matlab programında veri tabanı varsayılan olarak [42];

- %70 Eğitim seti,
- %15 Değerlendirme seti,
- %15 Test seti

şeklindedir. Eğitim setinde bulunan veriler, yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılan verilerdir. Değerlendirme setinde bulunan veriler, yapay sinir ağı eğitim aşamasında eğitim performansının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Burada kullanılan veriler eğitim setine dahil edilmez. Test setindeki veriler ise yapay sinir ağı tamamlandıktan sonra sistemin test edilmesi için kullanılan verileri oluşturmaktadır. YSA'da bulunan elemanların biyolojik sinir hücresindeki karşılıkları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Biyolojik sinir hücresi ile yapay sinir hücresi karşılaştırması [49]

<i>Biyolojik Sinir Hücresi</i>	<i>Yapay Sinir Hücresi</i>
Nöron	İşlem elemanı
Sinaps	Ağırlıklar
Akson	Eleman çıkışı
Hücre Gövdesi	Transfer fonsiyonu
Dendrit	Toplama fonsiyonu

Yapay sinir ağı çalışmasında kullanılacak nöron sayısı, elde edilecek sonuçların doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Nöron sayısının artırılması iyi sonuçlar verebilse de çözüm süresini ve harcanan eforu oldukça arttırmaktadır. Bu nedenle

nöron sayısını belirlerken deneme yanılma metodu ile sonuç performans değerlerine bakılarak uygun sayı belirlenmelidir.

7.3.1. Girdiler

Girdiler, çevreden alınan parametrelerdir. Girdiler genellikle öğrenilmesi istenilen örnekler tarafından belirlenirler. Doğrudan çevreden alınabildikleri gibi bir başka yapay sinir hücresinden de alınabilirler [43].

7.3.2. Ağırlıklar

Ağırlıklar, girdi parametrelerinin etkisini belirleyen katsayılardır [45]. Her bir girdi parametresine ait bir ağırlık katsayısı bulunur. Ağırlık parametreleri pozitif, negatif veya sıfır değerine sahip olabilirler. Ağırlıkların bağlı oldukları girdi parametrelerinin ağıdaki etki şiddetlerine göre değişken veya sabit değerlerde olabilirler.

7.3.3. Toplam Fonksiyonu

Toplam fonksiyonu bir hücredeki net girdi değerini hesaplayan fonksiyondur. Her bir girdi parametresinin o girdi parametresine ait ağırlıkla çarpımlarının toplamı en yaygın olarak kullanılan yöntemdir [43]. Denklem (7.3)'de bir toplam fonksiyonun genel hali verilmiştir.

$$Net = \sum_i^n w_i x_i \quad (7.3)$$

Bu eşitlikte; " x_i " girdi parametrelerini, " w_i " girdi parametrelerine ait ağırlıkları, " n " ise toplam girdi sayısını temsil etmektedir. Yapay sinir ağlarında farklı çeşitlerde toplam fonksiyonu kullanılabilir. Genelde en uygun toplam fonksiyonu çeşidi deneme yoluyla bulunmaktadır [43]. Çizelge 7.2'de toplam fonksiyonu örnekleri verilmiştir.

Çizelge 7.2. Toplam fonksiyonları [43]

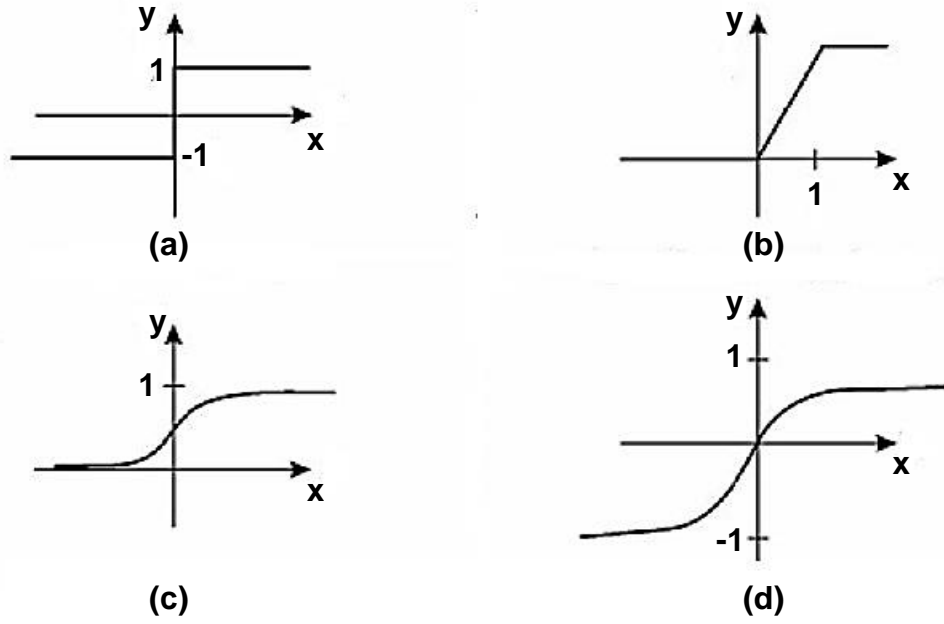
Net Giriş	Açıklama
$\text{Çarpım Net Fonksiyon} = \prod_i w_i x_i$	Her bir girdi değeri ile girdi değerlerine ait ağırlık değerleri çarpılarak elde edilen sonuçlar kendi aralarında çarpılır.
$\text{Maksimum Net Fonksiyon} = \text{Maks}(w_i x_i)$	Her girdi kendine ait ağırlık değeriyle çarpıldıktan sonra elde edilen en büyük değer net fonksiyon olarak kabul edilir.
$\text{Minimum Net Fonksiyon} = \text{Min}(w_i x_i)$	Her girdi kendine ait ağırlık değeriyle çarpıldıktan sonra elde edilen en küçük değer net fonksiyon olarak kabul edilir.
$\text{Çoğunluk Net Fonksiyon} = \sum_i \text{sgn}(w_i x_i)$	Her bir girdi kendine ait ağırlık değeriyle çarpıldıktan sonra elde edilen pozitif ve negatif değerlerin sayısı büyük olan değer net fonksiyon olarak kabul edilir.
$\text{Kümülatif Net Fonksiyon}$ $= \text{Net}(\text{Eski}) + \sum_i^n w_i x_i$	Hücre girdileri ağırlıklı olarak toplanarak önceki girdilere eklenip hücrenin net girdisi bulunur.

7.3.4. Transfer Fonksiyonları

Transfer fonksiyonları, toplam fonksiyonlarından elde edilen net girdileri işlemde geçirerek çıktılarını belirlerler. İşlem sürecinde birtakım fonksiyonlar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmaya en uygun fonksiyon genellikle deneme yöntemiyle belirlenmektedir. En yaygın olarak kullanılan fonksiyon sigmoid fonksiyonudur [43]. Sigmoid fonksiyonun genel Denklemi;

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7.4)$$

şeklinde ifade edilir. Yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonları Şekil 7.4'de verilmiştir.



Şekil 7.4. Transfer fonksiyonları: (a) Adım fonksiyon, (b) Eşik fonksiyon, (c) Sigmoid fonksiyon, (d) Hiperbolik tanjant fonksiyon [50]

7.3.5. Çıktılar

Çıktılar, transfer fonksiyonu işlemi sonucunda elde edilirler. Bir sinir hücresinde elde edilen çıktılar, başka bir sinir hücresinde girdi olarak kullanılabilir veya sinir hücresi kendi çıktısını kendisi için girdi olarak tekrardan kullanabilir. Sinir hücresinde bir işlem elemanından çıkan tek bir çıktı bulunur [43].

7.4. İşleme Yay Çalışması Yapay Sinir Ağı Uygulaması

İstenilen ebatlardaki işleme yayların, yay sabiti (k) değerini analiz ve deneysel çalışmalara gerek duymadan, hızlı bir şekilde belirleyebilmek için yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Yapay sinir ağına girdi olarak işleme yay tasarımında gerekli boyutsal parametreler tanımlanmıştır. Çıktı olarak ise, burulma yay sabiti (k) değeri elde edilmiştir.

Bölüm 6'da, parametre korelasyon çalışması yapılarak her bir parametrenin sonuçlar üzerindeki etki faktörünün belirlenmesi ile beraber yapay sinir ağı için ihtiyaç duyulan analizler ve bu analiz modellerinin oluşturulmasında kullanılacak parametre değerleri belirlenmişti. Gerçekleştirilen bu 720 adet parametrik analiz

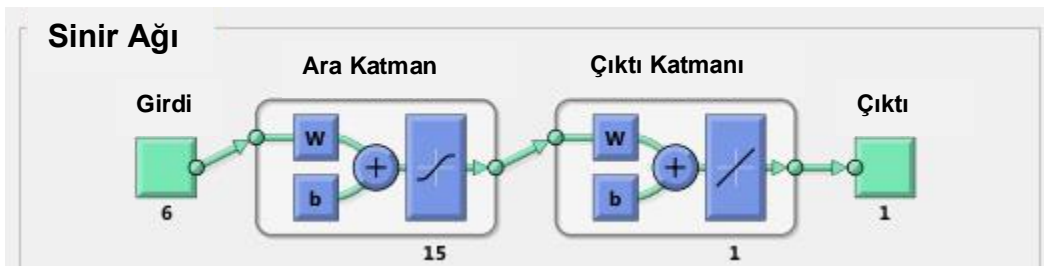
sonucu, yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır. Bu veri tabanındaki girdi ve çıktı parametreleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Veri tabanındaki parametreler

Girdi Parametreleri	Çıktı Parametresi
<ul style="list-style-type: none">• Radyal et kalınlığı “t”,• Eksenel et kalınlığı “b”,• Helis boyu “L”,• Kanal boşluğu “h”,• Ortalama çap “D_m”,• Slot Çapı “d_r”	<ul style="list-style-type: none">• Burulma Yay sabiti “k”

720 adet analiz modeline ait girdi ve çıktı verileri kullanılarak MS Excel uygulamasında bir matris oluşturulmuştur. Oluşturulan matris, “MATLAB Neural Fitting (nftool)” araç çubuğuna aktarılmıştır [42].

Matlab Neural Fitting araç çubuğunda oluşturulan sinir ağında 15 adet nöron kullanılmıştır. Sinir ağı gizli katmanlarda bulunan transfer fonksiyonu çözümlenmeleri için tan sigmoid tipi fonksiyon seçilmiştir. Şekil 7.5’de oluşturulan yapay sinir ağı yapısının görünümü verilmiştir. Burada; girdiler, ara katmanlar ve çıktı görülmektedir. Yapay sinir ağı 6: 15: 1 şeklindeki yapıya sahiptir.



Şekil 7.5. Yapay sinir ağı yapısı

Yapay sinir ağındaki veriler;

- %90 Eğitim seti,
- %5 Değerlendirme seti,
- %5 Test seti,

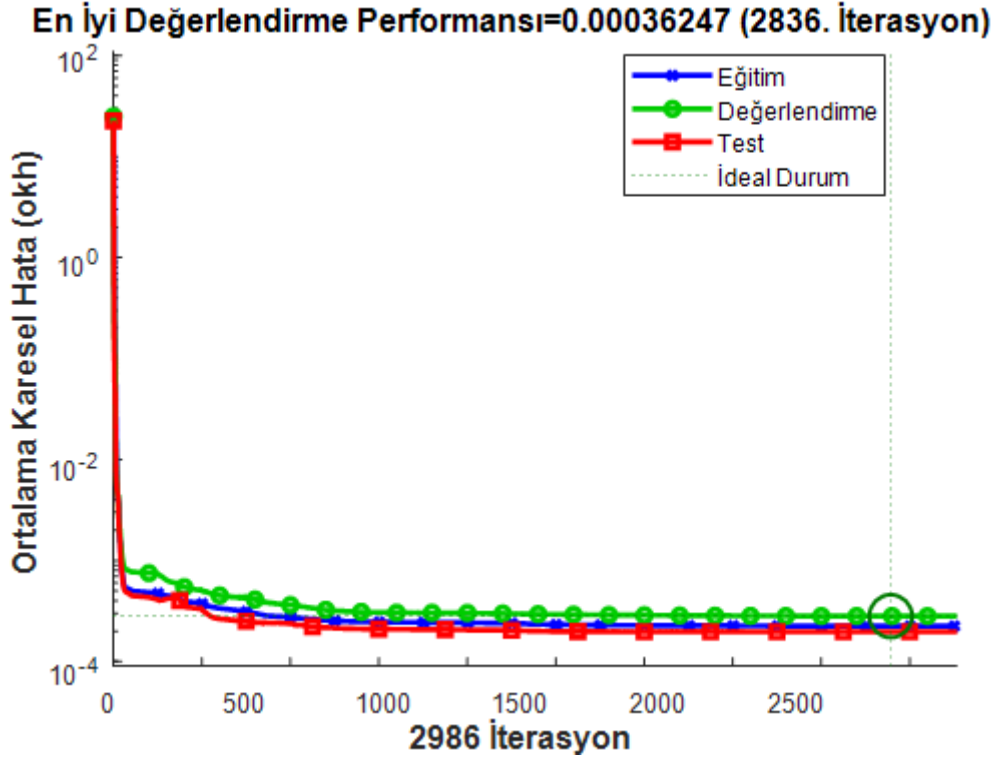
olarak bölünmüştür. Yapay sinir ağı performansının değerlendirilmesinde ortalama karesel hata yöntemi kullanılmıştır. Ortalama karesel hata yöntemiyle hesaplanan performans grafikleri bütün çıktı parametrelerindeki hataları dikkate alarak ortak bir sonuç verir. Ancak, elde edilen çıktı parametrelerinin önem dereceleri farklı ise önemi fazla olan çıktı parametresine göre performans grafiklerinin hesaplanması daha doğru sonuç verecektir.

İterasyon sayısının limitlenmesi ise yapay sinir ağları için bir diğer performans değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemde, yapay sinir ağı çözümü yapıldığı zamanda iterasyon sayısı tanımlanan değeri aşarsa hesaplamalar durdurulur. Eğitim prosesi için iterasyon limiti 4600 olarak ayarlanmıştır. Bir diğer yapay sinir ağı değerlendirme kriteri ise değerlendirme kontrol yöntemidir. Bu yöntemde, tanımlanan sayıdaki iterasyon sayısı limitinde ortalama karesel hata miktarı düşmezse yapay sinir ağı çalışması sonuçlandırılır. Bu çalışma için bu değer 150 olarak ayarlanmıştır.

7.5. Yapay Sinir Ağı Çalışması Sonuçları

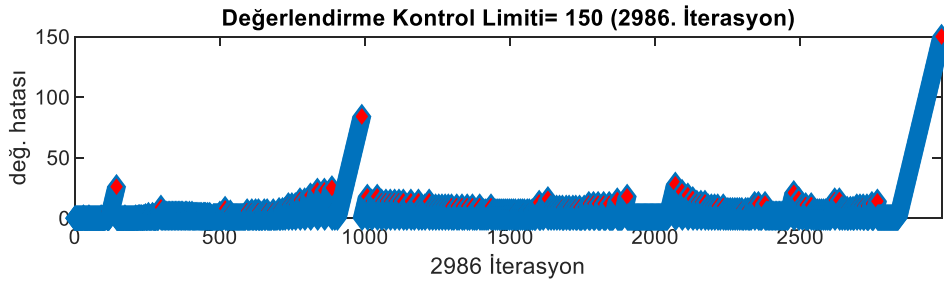
Yapay sinir ağı eğitim çalışmaları sonucunda en iyi eğitim performansı, 3.62×10^{-4} ortalama karesel hata miktarıyla elde edilmiştir. Ortalama karesel hata miktarı, hedef çıktı ile elde edilecek çıktı arasındaki sapma miktarını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlarla, veri tabanındaki sonuçlar arasındaki sapma miktarı olan 3.62×10^{-4} değeri kıyaslandığında oldukça küçük bir değer olduğu görülmektedir. Yapay sinir ağı eğitiminde tanımlanan değerlendirme kontrol sayısındaki iterasyonda, ortalama karesel hata miktarı değeri düşüş göstermediği için eğitim tamamlanmıştır. Eğitim sürecinde toplamda 2986 sayıda iterasyon yapılmıştır.

Şekil 7.6'da, yapay sinir ağı eğitim performansını gösteren bir grafik verilmiştir. Grafiğe göre; eğitim süreci başladıktan sonra, eğitim performansının hızlı bir şekilde iyileştiği görülmektedir. Eğitimin başlangıç bölgelerinde; eğitim, test ve değerlendirme değerlerine ait ortalama karesel hata miktarı çok yüksekken, yaklaşık 150 iterasyondan sonra hata miktarları çok düşmüştür. Eğitim sonucunda; eğitim, test ve değerlendirme durumları için ortalama karesel hata miktarları sırasıyla 4.89×10^{-4} , 1.12×10^{-4} ve 3.62×10^{-4} olarak elde edilmiştir. Eğitimde toplamda 2986 iterasyon sayısına ulaşılmıştır. Fakat en iyi değer 2836. iterasyonda yakalanmıştır.



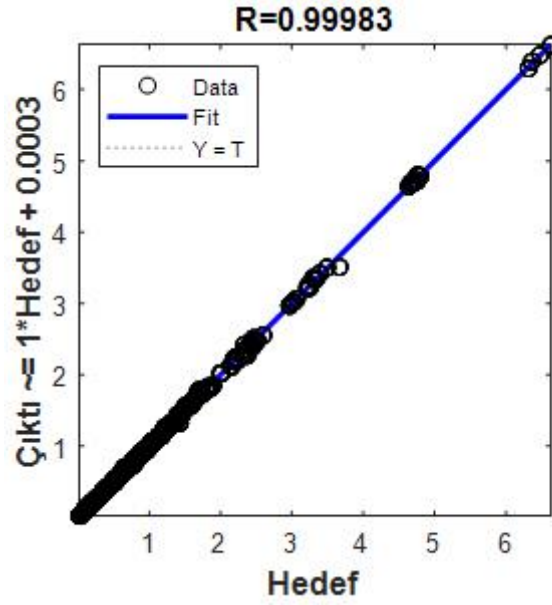
Şekil 7.6. Yapay sinir ağı eğitim performans grafiği

Yapay sinir ağı eğitimindeki değerlendirme hatalarının iterasyon sayısı ile olan ilişkisi Şekil 7.7’de verilmiştir. Bu grafik özet olarak, iterasyonlar arasındaki değişim miktarını ifade etmektedir. İterasyonlar arasındaki değişim azaldıkça değerlendirme hata miktarı artarak tanımlanan limit değerine ulaşır. Limit değerine ulaştığında eğitim tamamlanır. Grafiğe göre, yaklaşık 900 iterasyondan sonra değerlendirme hatası artma eğilimine girmiştir. Fakat, değerlendirme kontrol yöntemi için tanımlanan 150 iterasyon sayısına ulaşılmadan hata miktarları tekrardan düşme eğilimine girmiştir. 2836. iterasyondan sonra tekrardan hata miktarları artış göstermiştir. 2986 iterasyonda, değerlendirme kontrol yöntemi için tanımlanan 150 iterasyon limiti aşılarak eğitim sonuçlandırılmıştır.



Şekil 7.7. Değerlendirme kontrol limitine bağlı YSA sonuçlandırma grafiği

Eğitim sonuçlarına ait doğrusal regresyon grafiği Şekil 7.8'de verilmiştir. Bu grafikte dikey eksen, yapay sinir ağı eğitimi sonucunda elde edilen çıktıyı temsil etmektedir. Yatay eksen ise, parametrik sonlu elemanlar analiz çalışması sonucunda elde edilen çıktıyı göstermektedir. 45° eğimle çizilmiŐ kesikli çizgi ideal regresyon eŐleŐmesini ifade etmektedir. Grafikteki mavi çizgi ise eğitime ait regresyon çizgisini temsil etmektedir. Mavi çizginin kesikli çizgi üzerine oturması, YSA performansının kaliteli olduğunu gösterir. Şekil 7.8'de mavi çizginin kesikli çizgi üzerine oturduğu görülmektedir.



Şekil 7.8. YSA performansına ait regresyon grafiği

Yapay sinir çalışmalarında baŐarılı sonuçların elde edilebilmesi için eğitim performansını gösteren grafiklerin iyi yorumlanmaları ve istenilen sonuçlar elde edilmemiŐse eğitim çalıŐmalarına yeniden baŐlanılması gerekmektedir. Çünkü, yapay sinir ağı çalışmalarında elde edilecek sonuca göre bir fonksiyon türetilir. Fonksiyondaki hatalar, çıktı sonuçlarını doğrudan etkiler. Bu nedenle Şekil 7.8'deki regresyon grafiği, çalışma için oldukça önemlidir. Çalışma sonucunda, yapay sinir ağı girdi parametreleri ile çıktı arasında hızlı sonuç almaya yarayacak bir fonksiyon oluşturmuştur. Bu fonksiyon kullanılarak işleme yaylara ait tepki momentleri hızlıca tayin edilecektir.

Oluşturulan yapay sinir ağı fonksiyonu, Matlab çalışma penceresinde “network1” olarak adlandırılmıştır. Örnek olarak Matlab komut satırına;

```
network1([35;0.8;3.5;4.5;7.8;1.5])
```

yazılmıştır. Buradaki sayılar girdi parametrelerini ($L; h; b; t; D_{mean}; d_r$) oluşturmaktadır. Birimler ise “mm” cinsindedir. Yazılan komut sonucunda Matlab programı;

```
ans =  
    0.4478
```

cevabını vermiştir. Bu değer, işleme yay için yapay sinir ağından elde edilen burulma yay sabiti “ k_n ” değerini ifade etmektedir. Elde edilen sonucun birimi ise “ $N.m/°$ ” cinsindedir. Oluşturulan yapay sinir ağına ait Matlab kodu, EK-1’de verilmiştir.

7.5.1. Yapay Sinir Ağı Performansı ve İşleme Yay Sonuçları

Elde edilen yapay sinir ağı, kapama yönündeki işleme yay burulma sabitini tahmin etmektedir. Sonuçların doğruluğunu test etmek için üç farklı test grubu oluşturulmuştur. Birinci test grubunda, yapay sinir ağı veri tabanında bulunan 5 farklı yay modeline ait girdi ve çıktı değerleri alınmıştır. Girdi değerleri yapay sinir ağı fonksiyonuna yazılarak, yapay sinir ağından çıktı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla parametrik analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Çizelge 7.4’de birinci test grubuna ait girdi ve çıktı parametreleri ile sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 7.4. YSA Veri tabanından seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar

Kapama Yönü

	<i>Helis Boyu</i>	<i>Kanal Boşluğu</i>	<i>Eksenel Et Kalınlığı</i>	<i>Radyal Et Kalınlığı</i>	<i>Ort. Çap</i>	<i>Slot Çapı</i>	<i>Sonlu Elm. Burulma Yay Sabiti</i>	<i>YSA Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Göreceli Hata Miktarı</i>
	L	h	b	t	D_{mean}	d_r	k_s	k_n	$Hata$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N. m/°]	[N. m/°]	[%]
1	35	0.8	3.5	5.25	7.8	1	0.7283	0.7204	1.084
2	35	0.8	4.5	4.5	35.8	1	0.1636	0.1662	1.589
3	75	0.635	3.5	6.75	21.8	1	0.2576	0.2589	0.504
4	125	0.635	5.5	6.75	7.8	1.5	0.9692	0.9559	1.372
5	75	0.8	4.5	7.5	21.8	1.5	0.5843	0.5913	1.198

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, ilk grupta yapay sinir ağı sonuçlarının küçük hata miktarlarıyla analiz sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Bir diğer test grubu olan ikinci test grubunda ise; parametrik analiz girdi veri tabanını oluşturan değerlerin aralarında kalan değerler seçilerek 5 farklı yay modeli oluşturulmuştur. Sonuçlar hem yapay sinir ağıyla hem de sonlu eleman analiz yöntemiyle elde edilerek kıyaslanmıştır. Çizelge 7.5'de seçilen parametre değerleri, elde edilen sonuçlar ve kıyaslamaları verilmiştir.

Çizelge 7.5. YSA veri taban kümesindeki ara değerlerden seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar

Kapama Yönü

	<i>Helis Boyu</i>	<i>Kanal Boşluğu</i>	<i>Eksenel Et Kalınlığı</i>	<i>Radyal Et Kalınlığı</i>	<i>Ort. Çap</i>	<i>Slot Çapı</i>	<i>Sonlu Elm. Burulma Yay Sabiti</i>	<i>YSA Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Göreceli Hata Miktarı</i>
	<i>L</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>D_{mean}</i>	<i>d_r</i>	<i>k_s</i>	<i>k_n</i>	<i>Hata</i>
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N. m/°]	[N. m/°]	[%]
1	37.02	0.662	4.17	5.68	30.79	1.014	0.3351	0.3213	4.118
2	42.52	0.661	4.04	6.24	24.25	1.486	0.4502	0.4314	4.175
3	53.09	0.777	6.36	7.38	27.72	1.404	1.2621	1.2152	3.71
4	63.04	0.640	5.73	6.01	34.48	1.249	0.3668	0.3366	8.23
5	77.20	0.712	3.98	6.96	29.79	1.323	0.2632	0.2849	8.24

İkinci gruba ait sonuçlar incelendiğinde, hata miktarlarının arttığı görülmektedir. Üçüncü test grubunda; Yapay sinir ağı girdi parametrelerini oluşturan veri tabanı kümesi dışında kalan değerler seçilerek 5 farklı işleme yay modeli oluşturulmuştur. Yapay sinir ağından elde edilen sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 7.6'da seçilen parametre değerleri, elde edilen sonuçlar ve kıyaslamaları verilmiştir.

Çizelge 7.6. YSA veri taban kümesinin dışında kalan değerlerden seçilmiş işleme yay parametrelerine göre elde edilen sonuçlar

Kapama Yönü

	<i>Helis Boyu</i>	<i>Kanal Boşluğu</i>	<i>Eksenel Et Kalınlığı</i>	<i>Radyal Et Kalınlığı</i>	<i>Ort. Çap</i>	<i>Slot Çapı</i>	<i>Sonlu Elm. Burulma Yay Sabiti</i>	<i>YSA Burulma Yay Sabiti</i>	<i>Göreceli Hata Miktarı</i>
	L	h	b	t	D_{mean}	d_r	k_s	k_n	$Hata$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N. m/°]	[N. m/°]	[%]
1	32.55	0.504	3.97	4.00	41.43	0.950	0.0896	0.0878	2.008
2	30.48	0.543	4.01	3.72	36.69	0.913	0.0904	0.0812	10.176
3	32.27	0.575	3.66	3.63	38.15	0.997	0.0634	0.0537	15.299
4	33.21	0.525	3.75	4.27	36.34	0.977	0.1078	0.0976	9.462
5	21.437	0.857	3.41	3.22	37.03	1.564	0.0694	0.0612	11.81

Veri tabanı kümesi dışında seçilen değerlerle elde edilen sonuçlardaki hata miktarının arttığı görülmektedir. Veri tabanı dışındaki parametrelerle yapılan hesaplamalar için dikkatli olmak gerekmektedir. Veri tabanı dışındaki değerler için YSA tavsiye edilmemektedir.

Oluşturulan yapay sinir ağına, çalışma kapsamında kullanılan 4 farklı ebattaki işleme yay girdi parametreleri yazılmıştır. İşleme yayların kapama yönündeki burulma yay sabitleri (k_n) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. YSA yöntemiyle elde edilen yay sabiti (k_n) değerleri

Kapama Yönü

<i>Yay Model</i>	k_n
<i>No.</i>	[N. m/°]
1,2	0.2993
3,4	0.8352
5,6	0.2527
7,8	0.3912

Bu sonuçların; deneysel, sayısal ve analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlarla kıyaslaması Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.8. İşleme yay burulma direngenliklerinin karşılaştırılması

Kapama Yönü

Yay Model No.	<i>Deneysel</i>	<i>Sayısal</i>	<i>Analitik</i>	<i>YSA</i>	<i>YSA Sonuçları ile</i>		
	<i>Burulma</i>	<i>Burulma</i>	<i>Burulma</i>	<i>Burulma</i>	<i>Kıyaslama</i>		
	<i>Yay</i>	<i>Yay</i>	<i>Yay</i>	<i>Yay</i>	<i>Sayısal</i>	<i>Deneysel</i>	<i>Analitik</i>
	<i>Sabiti</i>	<i>Sabiti</i>	<i>Sabiti</i>	<i>Sabiti</i>	<i>Sonuçlar</i>	<i>Sonuçlar</i>	<i>Sonuçlar</i>
	k_d	k_s	k_s	k_n	<i>Hata</i>	<i>Hata</i>	<i>Hata</i>
	[N.m/°]	[N.m/°]	[N.m/°]	[N.m/°]	[%]	[%]	[%]
1,2	0.3059	0.2990	0.2836	0.2993	0.1	2.15	5.53
3,4	0.8437	0.8229	1.043	0.8352	1.47	1.00	24.88
5,6	0.2641	0.2587	0.2845	0.2527	2.37	4.31	12.58
7,8	0.3953	0.3884	0.4414	0.3912	0.72	1.03	12.83

7.6. Özet

Yapay sinir ağı çalışmaları sonucunda elde edilen sinir ağına; işleme yay tasarım boyutları olan, " $L; h; b; t; D_{mean}; d_r$ " parametreleri girildiğinde sonuç olarak o ebatlardaki işleme yayın burulma yay sabiti değerini (k) vermektedir.

Sonuçlar kısmında verilen çizelgeler incelendiğinde; yapay sinir ağı veri tabanındaki girdi parametreleri kullanılarak elde edilen yay sabiti değerlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yay sabiti değerlerine ortalama %1'lik bir farkla yaklaştığı görülmüştür. Veri tabanının ara değerlerinden seçilen değerlerle yapılan kıyaslamada ise sonuçların sonlu eleman sonuçlarına en kötü %8'lik bir farkla yaklaştığı görülmüştür. Bu değer, teorik sonuçlara göre oldukça iyi bir değerdir. Veri tabanı dışından seçilen değerlerde ise, sonlu eleman sonuçlarıyla olan farkın iyice arttığı ve %15'lik farkların oluştuğu görülmüştür. Veri tabanı dışında programdan elde edilen hata miktarının arttığı düşünülerek veri tabanı dışında kalan tasarımlarda bu sinir ağının kullanılmaması tavsiye edilmektedir.

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

8.1. Özet

Bu çalışma kapsamında; havacılık sektöründe burulma yüklemeleri altında kullanılan işleme yayların burulma yay sabitlerini (k) belirlemek için deneysel ve çeşitli sayısal çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak, hem geleneksel tipteki yaylar için hem de işleme yaylar için literatür taraması yapılmıştır. İşleme yayları meydana getiren boyutlar anlatılmıştır. Ardından; havacılık sektöründe burulma yüklemeleri altında kullanılan 4 farklı ebattaki işleme yay numunesinin açısal deplasman altındaki moment miktarını hassas bir şekilde ölçmeye yarayan test düzeneği tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Test düzeneği tasarımından sonra, test numunelerinin çeşitli açısal yükleme profilleri altındaki davranışları ve oluşturdukları moment miktarları ölçülmüştür. Deneysel çalışmaların tamamlanmasından sonra; testlerde kullanılan işleme yaylar, bilgisayar ortamında modellenerek sonlu eleman yöntemiyle simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla, deneysel sonuçlar kıyaslanarak analiz sonuçlarının güvenilirliği doğrulanmıştır.

Analiz sonuçlarının doğrulanmasından sonra, işleme yay burulma yay sabitini (k) hızlı bir şekilde elde etmemize yarayan bir arayüz geliştirilmesi için çalışmalara başlanmıştır. Bu arayüzün geliştirilmesinde son dönemlerde bilimsel çalışmalarda sıklıkla tercih edilen yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağının eğitiminde bir veri tabanının kullanılması gereklidir. Bu veri tabanı, farklı ebattaki işleme yayların sonlu eleman yöntemiyle analizi sonucunda elde edilmiştir. Veri tabanının oluşturulmasına başlanmadan önce ilk olarak, işleme yay tasarımını oluşturan, “Helis Boyu (L)”, “Kanal Boşluğu (h)”, “Eksenel Et Kalınlığı (b)”, Radyal Et kalınlığı (t)”, “Ortalama Çap (D_{mean})”, “Slot Çapı (d_r)” gibi boyutsal parametrelerin açısal deplasman altında işleme yay burulma sabiti (k) üzerindeki etki faktörleri araştırıldı. Bu kısımda; boyutsal parametreler, belirlenen bant aralıklarında değiştirilerek 100 farklı analiz modeli oluşturuldu. Parametrik analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlar; rank korelasyonu yöntemiyle değerlendirilerek, boyutsal parametrelerin burulma momenti ve işleme yay Von Mises gerilmeleri üzerindeki etki şiddetleri belirlendi. Etki şiddeti sonuçlarına göre, boyutsal parametrelerin değer sayıları ve büyüklükleri belirlenerek işleme yay veri

tabanını oluşturan 720 farklı yay modeli belirlendi. 720 farklı yay modeli, sonlu eleman yöntemiyle parametrik olarak çözümlenerek, yapay sinir ağının eğitiminde kullanılacak veri tabanı oluşturuldu. Bundan sonraki kısımda ise; yapay sinir ağı teorisi anlatıldı. Daha önceki bölümde oluşturulan veri tabanı kullanılarak yapay sinir ağı eğitimi yapıldı. Eğitim sonucunda elde edilen sinir ağına girilen boyutsal parametrelere bağlı olarak burulma yay sabiti (k) değeri, hızlı bir şekilde bulunabilmektedir.

8.2. Önemli Bulgular ve Öneriler

İşleme yaylar için gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlar ve bulgular elde edilmiştir.

1. Burma test düzeneği ile yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, işleme yayların açılmal yüklemeler altında doğrusala yakın bir burulma direngenliği sergiledikleri görülmüştür. Doğrusal bir burulma direngenliği davranışı, hassasiyeti arttıran önemli bir bulgudur.
2. İşleme yayların açma yönündeki yüklemelerde daha yüksek moment verdikleri belirlenmiştir.
3. Sonlu eleman yöntemiyle elde edilen burulma direngenliklerinin deneysel çalışmalardan elde edilen değerlere yakınsadığı görülmüştür.
4. İşleme yay burulma direngenliğinin belirlenmesinde, sonlu elemanlar yaklaşımının güvenilir bir yöntem olduğu ortaya koyulmuştur.
5. Parametrik korelasyon çalışmaları sonucunda; boyutsal parametrelerin işleme yay burulma direngenliğine ve Von Mises gerilme değerlerine olan etki şiddeti, $t > b > L > d_m > d_r > p$ şeklinde elde edilmiştir. İşleme yay tasarımı yapılırken bu sıralamanın bilinmesi, tasarımcı için kolaylık sağlamaktadır.
6. Sonlu eleman analiz sonuçlarıyla oluşturulmuş yapay sinir ağı çalışmasının deneysel çalışmalara yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
7. Yapay sinir ağının tanımlanan veri tabanı kümesi dışında hatalı sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu nedenle veri tabanı dışındaki değerler için kullanılması önerilmemektedir. Bunun yerine, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analiz modellerinin kullanılması önerilmektedir.

8.3. Potansiyel Çalışmalar

Bu çalışmaların devamı olarak, işleme yayların burulma direngenliği katsayılarının hesaplamalarında kullanılan yapay sinir ağı veri tabanı genişletilebilir. Ayrıca, açılmal yüklemeler altındaki gerilme değerlerini de tahmin edebilen bir sinir ağı oluşturulabilir. Çalışma kapsamında yapılan yapay sinir ağı için kullanıcı arayüzü tasarımı yapılabilir. Bunun yanında işleme yaylarının basma ve çekme yüklemeleri altındaki davranışları incelenebilir. Tasarlanan yeni test düzeneği ile basma ve çekme yüklerinin hesaplanması mümkündür.

Çalışma kapsamında enstitümüzde uygulanan parametrik analiz çalışmaları ve parametre korelasyon çalışmalarının farklı uygulamalarda da kullanılabileceği görülmüştür. Bu yöntemlerin kullanılmasıyla sektörde karşılaşılan problemlere çözümler üretilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] D.B. Marghitu, Mechanical Engineer's Handbook, **2001**.
- [2] D. Silberstein, How to Make Springs, **2003**.
- [3] P.R.N. Childs, Mechanical Design, Second ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, **2004**.
- [4] Budynas-Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth ed., McGraw-Hill, **2006**.
- [5] G. Yazar, Design And Analysis of Helical Coil Spring Forms for Independent Suspensions of Automobiles, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, **2015**.
- [6] A.M. Wahl, Mechanical Springs, Second ed., McGraw-Hill, New York, **1963**.
- [7] E. Zeydan, Analytical Investigation of Parameters Affecting Stiffness of Helical Springs of Arbitrary Shapes Under Compression, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova University, **2006**.
- [8] L. Gary, P. Boehm, Wire Wound vs. Machined Springs A Comparison, Helical Products Company, **2016**.
- [9] H.P. Company, The spring for the 21st century, **2016**.
- [10] G.L.B. PE, Wire Springs vs. Machined Springs A Comparison, ABSSAC Precision Motion, **2012**.
- [11] About the Extraordinary HELI-CAL Machined Spring, Helical Products Company, P.O. Box 1069, Santa Maria, CA 93456-1069.
- [12] J.D.D. Calderon, C. Perez, On The General Characterization of Machined Springs and Their Manufacturing Processes, ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,USA, **2013**.
- [13] Engineering Guide to Spring Design, Associated Spring, Barnes Group Inc.
- [14] Spring Types, <https://m.indiamart.com/suppliers/>, (Erişim Tarihi: **02 Şubat 2019**).
- [15] O. Robert, P.E. Parmley, Illustrated Sourcebook of Mechanical Components, 1. ed., McGraw-Hill Education, **2000**.

- [16] J. Salwinski, K. Michalczyk, Stress Analysis in Helical Springs with Closed End Coils Machined From Cylindrical Sleeves, *Mechanics / AGH University of Science and Technology*, Vol. 25, no. 4 (2006) 169-172
- [17] A.I. Razooqi, H.A. Ameen, K.M. Mashloosh, Static and Dynamic Characteristics of Slotted Cylinder Spring, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 2 (2013).
- [18] V. Brijpuria, K.K. Jain, Analysis of Closed Coil Helical Spring Subjected to Heavy Duty, *Int. J. Eng. Ass.*, Vol. 1 (2013) 50-55.
- [19] S.A. Nama, Modeling and Analysis of a Helical Machined Springs, *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, Vol.15, No 2 (2015).
- [20] M.C. Ashish, D.V. Bhope, Stress and Buckling Analysis of Helical Coil, *Int. J. Innov. Tech. Res.*, Vol 1. (2013) 570-573.
- [21] Z.K. Poul, J.G. Nikam, Fatigue Analysis of Helical Spring Using CATIA V5 and FEA Software, *Int. j. Innov. Tech. Res.*, Vol 2. (2013) 2798-2800.
- [22] V. YILDIRIM, An Efficient Numerical Method for Predicting the Natural Frequencies of Cylindrical Helical Springs, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 41. (1999) 919-939.
- [23] M. Krzysztof, Stress Analysis in Slotted Springs, *Mechanics*, Vol. 25, No. 3 (2006) 131-134.
- [24] I.R. Ahmed, A.A. Hani, M.M. Kadhim, Compression and Impact Characterization of Helical and Slotted Cylinder Springs, *Int. J. Eng. & Tech.*, Vol 3. (2014) 268-278.
- [25] M. Taktak, F. Dammk, S. Abid, M. Haddar, A Finite Element for Dynamic Analysis of a Cylindrical Isotropic Helical Spring, *J. Mech. Mat. Struct.*, Vol 3. (2008) 641-656.
- [26] S.A. Nama, Effect of Pitch Angle on Static Characteristics of a Helical Machined Spring *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, Vol. 15 No. 3 (2015).
- [27] R. Mirzaeifar, R. DesRoches, A. Yavari, A Combined Analytical, Numerical, and Experimental Study Of Shape-Memory-Alloy Helical Springs, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48 (2011) 611-624.
- [28] M.H. Wu, W. Hsu, Investigation of Torsion Springs by Considering the Friction and the End Effect, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 121 (1999).

- [29] Andilog, Manual Torsion tester, <https://www.andilog.com/pdf/spec-sheets/twist-uk.pdf>, (Erişim Tarihi: **08 Nisan 2019**).
- [30] Kollmorgen, AC Synchronous Servo Motor, <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/catalogs/kollmorgen-akm-servomotor-selection-guide/>, (Erişim Tarihi: **02 Ocak 2019**).
- [31] Sumitomo, Fine Cyclo Zero Backlash Precision Gearboxes <https://sumi-entermediadb.appno.net/assets/emshare/views/modules/asset/downloads/originals/2018/11/60/7e050117f//Fine%20Cyclo%20Catalog.pdf>, (Erişim Tarihi: **03 şubat 2019**).
- [32] Honeywell, Flanged Reaction Torque Sensor, www.sensing.honeywell.com/honeywell-test-and-measurement-model-2110-2116-reaction-torque-datasheet-008799-2-en.pdf, (Erişim Tarihi: **03 şubat 2019**).
- [33] Birçelik, Maraging 300 Çeliği, <https://bircelik.com/tr/kategori/maraging-300>, (Erişim Tarihi: **13 şubat 2019**).
- [34] Siemens NX, Versiyon: 10.0.3.5.
- [35] ANSYS Workbench, Versiyon: 19.2.0.
- [36] VascoMax Catalogue, www.dynamicmetals.net/VascoMaxCatalog.pdf, (Erişim Tarihi: **06 Ocak 2019**).
- [37] ANSYS Help, Retrieved from ANSYS Workbench 14.5 Help Directory, Washington, DC, **2014**.
- [38] W. Emerson, R., Causation and Pearson's Correlation Coefficient, Journal of Visual Impairment & Blindness, Vol. 36 No. 3 (**2015**) 242-244.
- [39] A. Yıldırım, Development Of Bolted Flange Design Tool Based On Finite Element Analysis And Artificial Neural Network, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, **2015**.
- [40] G.W. Corder, D.I. Foreman, Nonparametric Statistics: A Step-by-Step Approach, **2014**.
- [41] Ansys Tutorial 2 Parameter Correlation Analysis of a Beam, https://drahmednajib.com/onewebmedia/Optimum-Design-2016/Tut%20v%2015/Tutorial_2_Simple_Beam.pdf, (Erişim Tarihi: **09.04.2019**).

- [42] MATLAB, Version : R2018b (9.5.0.944444), **2018**.
- [43] E. Öztemel, Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul, **2006**.
- [44] C. Gershenson, Artificial Neural Networks for Beginners, (**2003**).
- [45] Ç. Elmas, Yapay Zeka Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, **2007**.
- [46] S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, Third ed.**2008**.
- [47] S. Grossberg, Neural Networks and Natural Intelligence, **1988**.
- [48] G. Dreyfus, Neural Networks Methodology and Applications, **2005**.
- [49] S. Aksungur, Üç Serbestlik Dereceli Bir Robotun, Yapay Sinir Ağları Ve Genetik Algoritma Kullanılarak Engelli Ortamda Çarpışmasız Yörünge Planlaması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, **2009**.
- [50] Ö. Helvacı, Santrifüj Pompalarda Yapay Sinir Ağı Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, **2007**.

EKLER

EK-1: Yapay sinir ağı Matlab Kodu [42]

```
% Oğuz DEMİRTAŞ
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by Neural Fitting app
%
%   dat1 - input data.
%   dat3 - target data.

x = dat1;
t = dat3;

% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help nntrain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt backpropagation.

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 15;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

net.performFcn = 'mse'; % Mean squared error
net.trainParam.max_fail = 150;
net.trainParam.epochs = 4600;

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 90/100;
net.divideParam.valRatio = 5/100;
net.divideParam.testRatio = 5/100;

% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, ploterrhist(e)
%figure, plotregression(t,y)
%figure, plotfit(net,x,t)
```




HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 19/06/2019

Tez Başlığı / Konusu: İŞLEME BURULMA YAYININ KATILIĞINA AİT PARAMETRELERİN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 117 sayfalık kısmına ilişkin, 18/06/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Oğuz DEMİRTAŞ
Öğrenci No: N14123409
Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği ABD
Programı: Makine Mühendisliği
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

19.06.2019

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Barış SABUNCUOĞLU

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oğuz DEMİRTAŞ
Doğum yeri : Altındağ
Doğum tarihi : 1991
Medeni hali : Bekar
Elektronik posta adresi : ouz.demirtas@gmail.com
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği (Onur Öğrencisi)
Yüksek Lisans : -
Doktora : -

İş Tecrübesi

AKANA MÜHENDİSLİK A.Ş., Mekanik Tasarım Mühendisi (2015-2017)
TÜBİTAK SAGE, Mekanik Tasarım Mühendisi (2017-Halen)

Hobiler

Kayak, Doğa yürüyüşü, Sinema

