



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İŞLENMİŞ YAYLARIN KATLANABİLİR
ROKET KANATÇIKLARINDAKİ
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Berk TUNÇ

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Berk TUNÇ tarafından hazırlanan “İşlenmiş Yayların Katlanabilir Roket Kanatçıklarındaki Performansının İncelenmesi” adlı tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ tarafından 241010023 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Berk TUNÇ
Tarih: 01.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

İŞLENMİŞ YAYLARIN KATLANABİLİR ROKET KANATÇIKLARINDAKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Berk TUNÇ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ

2025, 66 sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Murat DİLMEÇ
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ**

Savunma sanayi ve uzay keşifleri, günümüzde teknolojinin zirvesini temsil eden alanlardır. Bu alanlarda kullanılan roketler, uydular ve diğer uzay araçları, karmaşık sistemlerin bir araya gelmesiyle oluşturulurlar. Ancak, bu karmaşıklığın içindeki en önemli unsur, hassas parçaların birbiri ile uyumlu bir şekilde çalışmasıdır. Bu uyumun en çarpıcı örneklerinden biri, katlanır roket kanatları ve katlanır uydu kanatlarıdır. Bu parçaların açıldığı anda tam doğruluk ve hassasiyetle çalışması, uzay keşiflerinin ve savunma stratejilerinin başarısı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, tasarlanan katlanır roket kanatçığı mekanizmasında eyleyici olarak kullanılmak üzere, farklı yay sabitlerine sahip, 10 adet işlenmiş burulma yayı numunesi üretilmiştir. İşlenmiş yayların üretiminde AISI 630 (1.4542) martenzitik paslanmaz çelik tercih edilmiş ve malzemenin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Yayların üretilmesinde talaşlı imalat ve profil lazer kesim yöntemleri kullanılarak yayların elde edilmesine ve performansına üretim yöntemlerinin etkisi de araştırılmıştır. Yayların yay sabitleri analitik, nümerik ve deneysel ölçümlerle belirlenmiştir. Ardından yayların katlanabilir roket kanatçıklarındaki performanslarını ölçmek için bir deney sistemi tasarlanarak imal edilmiştir. Yaylar bu deney sisteminde test edilerek kanatçığın açılma süreleri ölçülerek performansları ortaya konulmuştur. Yaylar talaşlı imalat ile 0,05 mm tolerans ile çok daha hassas ölçülerde elde edilirken, profil lazer kesim yönteminde 0,2 mm'ye varan oranda ölçüsel sapmalar meydana gelmiştir. Ayrıca lazer kesim yönteminde malzemede meydana gelen yumuşamaya bağlı olarak burma testlerinde akma meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte lazer profil kesim yönteminin, talaşlı imalata göre imalat süresinde 3,6 kat ve maliyette 5 kat azalma sağlaması avantajına sahip olduğu görülmüştür. İşlenmiş yay numunelerinde nümerik ve analitik yöntemlerle belirlenen yay sabiti ve tork değerlerinin, deneysel olarak ölçülen değerleri %95'in üzerinde bir oranla doğru belirlenebildiği gösterilmiştir. Tez kapsamında tasarlanıp üretilen açılır kanat mekanizması, işlenmiş yayların performanslarının ölçümünde başarıyla kullanılabilmiştir. Bu kapsamda 135°'de yaklaşık 11 Nm tork veren yayların, ortalama olarak 182,5 milisaniye süreyle hedeflenen 200 milisaniye kanat açma süresini çok yakın değerlerle sağlayabildiği bulunmuştur. Dinamik analiz sonuçlarının, deneysel olarak gerçekleştirilen katlanır kanat testlerinde yüksek hızlı kameralarla ölçülen açılma sürelerine, %95,4 oranında yaklaştığı görülmüştür. Böylece dinamik analizlerin, deneysel sistemler kurmaya bağlı maliyetlerden kaçınmak için başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dinamik analizler, İşlenmiş yay, Katlanır kanat mekanizmaları, Yay sabiti, Sonlu elemanlar analizleri,

ABSTRACT

MS

EXAMINING THE PERFORMANCE OF MACHINED SPRINGS IN FOLDABLE ROCKET WINGS

Berk TUNÇ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ

2025, 66 Pages

Jury

Prof. Dr. Murat DLMEÇ

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETN

Assoc. Prof. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ

The defense industry and space exploration represent the pinnacle of technology today. Rockets, satellites, and other spacecraft used in these fields are formed by bringing together complex systems. However, the most crucial element within this complexity is the precise operation of sensitive components in harmony. One of the most striking examples of this harmony is the foldable rocket fins and foldable satellite panels. The accurate and precise functioning of these parts at the moment they are deployed is of critical importance for the success of space exploration and defense strategies. In this thesis, 10 machined torsion spring samples with different spring constants were produced for use as actuators in the designed foldable rocket fin mechanism. AISI 630 (1.4542) martensitic stainless steel was chosen for the production of the machined springs, and tensile tests of the material were conducted. Machining and profile laser cutting methods were used for the production of the springs, and the effects of these manufacturing methods on the springs' performance were also investigated. The spring constants of the springs were determined through analytical, numerical, and experimental measurements. Subsequently, a test system was designed and manufactured to measure the performance of the springs in foldable rocket fins. The springs were tested in this system, and the fin deployment times were measured to reveal their performance. While the springs produced through machining achieved much more precise dimensions with a tolerance of 0.05 mm, dimensional deviations of up to 0.2 mm occurred in the profile laser cutting method. Additionally, it was observed that softening of the material caused by the laser cutting process led to yielding during torsion tests. However, the laser profile cutting method was found to have an advantage over machining, with a reduction in production time by 3.6 times and cost by 5 times. It was demonstrated that the spring constant and torque values determined through numerical and analytical methods were accurate to over 95% compared to the experimentally measured values. The foldable fin mechanism designed and produced within the scope of the thesis was successfully used to measure the performance of the machined springs. In this context, it was found that the springs providing approximately 11 Nm torque at 135° achieved the target deployment time of 200 milliseconds with an average value of 182.5 milliseconds. The results of the dynamic analysis were found to be 95.4% accurate compared to the deployment times measured in foldable fin tests performed experimentally using high-speed cameras. Thus, it has been shown that dynamic analyses can be successfully used to avoid the costs associated with setting up experimental systems.

Keywords: Machined spring, Foldable fin mechanisms, Spring constant, Finite element analyses, Dynamic analyses

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecimde, değerli bilgi ve tecrübeleriyle desteklerini esirgemeyen kıymetli hocam **Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ'e** en içten duygularıyla teşekkür ederim. Ayrıca, ülkemizin uzay yolculuğundaki öncü firmalarından **Delta V Uzay Teknolojileri A.Ş.**'den manevi ve değerli teknik desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Genel Müdürümüz **Dr. Mehmet KAHRAMAN** ve **TUA yönetim kurulu üyesi Doç. Dr. Mustafa Arif KARABEYOĞLU'na** en içten teşekkürlerimi sunarım.

İşlenmiş yayların torklarının ölçümünde teknik desteklerini sağlayarak katkıda bulunan, yerli marka test cihazları üreticisi “**KAL_MET Kalibrasyon Tic. Ltd. Şti. | Uve Test Cihazları üreticisi**” şirketinin kurucusu Yüksek Makine Mühendisi **Vesile USLUKILIÇ Hanımefendi'ye** ve Makine Mühendisi **Mehmet Ali MERT Bey'e** teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm değerli destekleri için **Kaan Talha ÇALIŞKAN Bey'e** de teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sevgileri ve fedakarlıklarıyla bana güç veren canım **aileme** ithafen...

Berk TUNÇ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. İşlenmiş Yaylar	5
2.2. Geleneksel (Sarım) Yay ve İşlenmiş Yayın Karşılaştırılması	9
2.3. İşlenmiş Yayların Hesabı	11
2.4. Literatürde İşlenmiş Yaylar ve Katlanır Mekanizmalar İle İlgili Yapılan Çalışmalar	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal	22
3.2 Çekme Testleri	22
3.3 İşlenmiş Yay Üretim Süreci.....	24
3.3.1 İşlenmiş yayların talaşlı imalatı	25
3.3.2 İşlenmiş yayların profil lazer kesimi.....	28
3.4 Analitik Hesaplamalar.....	29
3.5. İşlenmiş Yayların Sonlu Eleman Yöntemiyle Burulma Analizleri	29
3.6 İşlenmiş Yayların Tork Ölçümü	33
3.7 Katlanır Kanat Mekanizması Tasarımı ve Kanat Açılma Testleri.....	34

3.8. Katlanır Kanadın MSC ADAMS Programı ile Açılma Sürelerinin Ölçülmesi	42
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Çekme Deneyi Sonuçları	45
4.2. İşlenmiş Yayların SEA ile Tasarımı ve Tork Değerlerinin Bulunması ...	47
4.3. Yay İmalatı Sonuçları	49
4.4. Yayların Tork Değerlerinin Analitik Hesaplanması	51
4.5. Yayların Tork Değerlerinin Deneysel Ölçümü	52
4.6. İşlenmiş Yayların Tork Değerlerinin SEA ile Tahmini	57
4.7. Katlanır Kanadın Adams Programı İle Açılma Sürelerinin Hesaplanması	59
4.8. Katlanır Kanadın Açılma Sürelerinin Yüksek Hızlı Kamera ile Ölçülmesi	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
5.1 Sonuçlar	63
5.2 Öneriler	65
KAYNAKLAR	67
EKLER.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N_a	Aktif sarım sayısı
MPa	Megapaskal
r_{max}	Maksimum kayma gerilmesi (MPa)
N	Newton
Nm	Newton metre
mm	Milimetre
N/m	Newton/metre
r	Kayma gerilmesi (MPa)

Kısaltmalar

OÖD:	Ortalama ölçü değeri
Ms	milisaniye
Fps	saniyedeki kare sayısı
RPM	saniyedeki devir sayısı

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler ve insanın kendini koruma isteği, savunma sanayisi ve birçok diğer alandaki gelişmelere etki etmektedir. Günümüzde birçok askeri operasyon ve savaş, uzaktan yönetilen veya tamamen otonom sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Teknolojik gelişmeler, askeri operasyonlarda ve savaş durumlarında bireysel ve toplu kayıpları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Savunma ve silah sanayi alanlarında hedeflenen pozisyonun istenilen parametrelere uygun olarak yüksek hassasiyetle kontrol edilmesi ve hatanın azaltılması son derece önemlidir.

Hassas parçalardan oluşan sistemlerin savunma sanayisindeki rolü büyük bir öneme sahiptir. Bu sayede başarılı ve hassas askeri operasyonlar gerçekleştirilebilir ve düşmanın savunma sistemleri aşılabılır. Hassas savunma sistemleri aynı zamanda sivilin zarar görmesini en aza indirmeye yardımcı olur, bu da uluslararası toplumun askeri operasyonları daha olumlu bir şekilde değerlendirmesine katkıda bulunur.

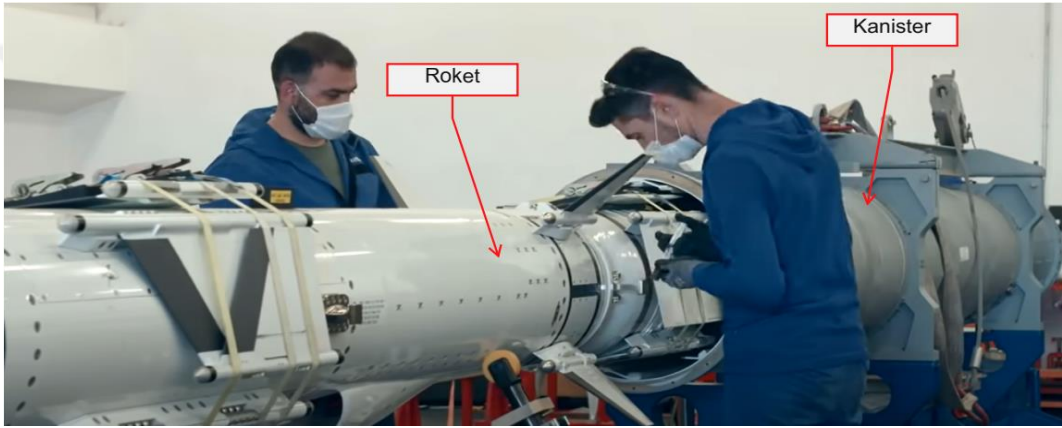
Savunma ve uzay alanındaki kritik teknolojiler, uzaya ulaşma, haberleşme, keşif ve askeri savunma alanlarında kritik bir rol oynar. Savunma ve uzay alanında ise akıllara ilk gelen teknoloji roket teknolojisi olmaktadır. Roket teknolojisi, savunma, saldırı ve uzay görevleri gibi birçok alana hizmet etmektedir.

Çalışma hassasiyeti yüksek roketler aynı zamanda stratejik üstünlüğün elde edilmesine yardımcı olur. Bu roketlerin kullanımı, düşmanın savunma sistemlerini aşma yeteneği sunar ve kritik hedeflere yönlendirmeyi mümkün kılarak askeri operasyonlarda avantaj kazanılmasını sağlar. Bu nedenle roket teknolojisi dünyada savunma ve güvenlik açısından kritik bir rol oynamaya devam edecektir.

Roketlerin tasarımındaki bazı unsurlar, bu amaçlara ulaşmada kritik bir rol oynar. Kanatçıklar, roketlerin aerodinamik performansını artıran ve yönlendirilebilirliğini sağlayan önemli parçalardan biridir. Kanatçıkların rolü, roketin dengeli bir şekilde ilerlemesini ve hedefe daha doğru bir şekilde ulaşmasını sağlamaktır. Bunun için kanatçıkların yüksek bir konumlandırma hassasiyetine sahip olması gerekir.

Kanatçıklar katlanır ve katlanmaz tasarıma sahip olarak üretilmektedir. Katlanır kanatçıkların önemli bir özelliği, katlandığında roketin daha kompakt hale gelmesini sağlamaktır. Roketlerin yüklenmesi (Şekil 1.1) ve fırlatılması (Şekil 1.2) karmaşık ve riskli bir işlem olduğu için kanat mekanizmasının optimum şekilde çalışması

gerekmektedir. Uçuş sırasında roketle stabilite ve yerine göre yönlendirme imkânı sağlayan kanatçıklar katlanabilir olarak tasarlandıklarında fırlatma sonrasında içerisindeki yaylı mekanizma sayesinde açılır. Kanatçığın kanister (Şekil 1.1) olarak isimlendirilen fırlatma sistemi içerisinde kapalı olması ve Şekil 1.3.'te görüldüğü gibi fırlatma sonrasında açılması kanatçığın kanistere çarpma ihtimalini azaltır. Roketler, genellikle büyük ve hantal bir yapıya oldukları için, fırlatma rampalarına ve iniş alanlarına sığmaları zor olabilir. Katlanabilen kanatçıkların bir diğer avantajı, daha az yer kaplamalarını sağlayarak roketlerin taşınması ve depolanmasını kolaylaştırmasıdır. Böylece fırlatma rampaları ve iniş alanları için gereken alana daha fazla esneklik kazandırır.



Şekil 1.1. Bir roketin kanister isimli fırlatma sistemine yüklenmesi



Şekil 1.2. Roketi fırlatılması (kanisterden çıkışı)



Şekil 1.3. Katlanabilir kanatçıkların kanisterden çıkış sonrasında açılması

Roketlerin görevlerini ifa etmesi açısından kanatçıkların doğru bir şekilde tasarlanması ve konumlandırılması gerekir. Katlanır kanat mekanizmalarında yaylar sistemin önemli bir bileşenidir. Birçok çeşidi olan yaylarda işlenmiş yaylar daha az yer kaplayarak yüksek enerji biriktirilmesini, sistemlerin daha hassas çalışmasını ve montajda bileşen sayısının azalmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, katlanır kanat mekanizmalarında işlenmiş yayların kullanılabilirliği konusunda inceleme yapmak için bu tez çalışmasında katlanır kanat mekanizmaları ve işlenmiş yaylar konusunda araştırmalar yapılmıştır.

Günümüzde, makine endüstrisi, savunma ve uzay sanayi sektörlerinde birçok parçada yaylar sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, savunma ve uzay sanayisinde, yayların rijitlik katsayıları, çalışma hassasiyetleri ve kolay montaj edilebilirlikleri büyük bir öneme sahiptir. Özellikle katlanır mekanizmaların doğru bir şekilde, yüksek performansta çalışabilmesi kritik bir faktördür. Katlanır kanat mekanizması, otomatik kilitlenme, belirli bir açı aralığında çalışma ve titreşim gibi olumsuz etkilerden kaçınmak için ön yük uygulanabilir bir tasarım gereksinimine sahiptir. Bu kritik isterler göz önünde bulundurularak tasarlanan mekanizmaya, yüksek hassasiyetli işlenmiş yaylar entegre edilmiştir. Mekanizmanın performansı, SEA yöntemi, dinamik analizler, deneysel testler ve yüksek hızlı kamera teknolojisi kullanılarak değerlendirilmiş; işlenmiş yayların bu tür kritik tasarımlardaki önemi, detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur.

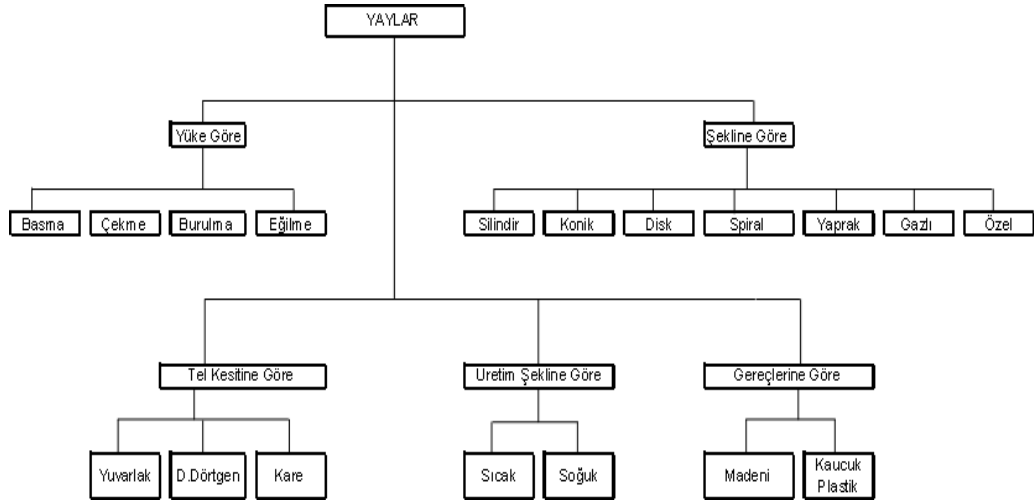
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tüm makine veya konstrüksiyon elemanları, bir tür elastik şekil değiştirme özelliğine sahip olan "yaylanma" özelliğine sahiptir. Yaylanma, bir elemanın zorlandığında şeklinin elastik olarak değişmesidir. Cisimlerde, dış kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen elastik şekil değişimi kuvvet ortadan kalktığında kaybolarak cisim ilk haline geri döner. Herhangi bir eleman, bu özellikleri kullanılarak "Elastik Yay" olarak adlandırılabilir. Elastik yay olarak kullanılan malzeme, amaca uygun olarak şekillendirildiğinde çeşitli şekillerde ve birçok yerde kullanılabilir. Elastik yaylar genellikle geometrik şekillerine göre adlandırıldıkları gibi, zorlanmalarına göre de gruplandırılabilirler (Kutay, 2010).

Yayların zorlanmalarına göre gruplandırılması Şekil 2.1’de görüldüğü gibi şu şekildedir: Eğilme etkisindeki yaylar: yaprak yaylar, kangal yaylar, spiral yay, disk yaylar. Torsiyon (burulma) etkisindeki yaylar: çubuk yaylar, helisel yaylar (basma veya çekme kuvvetini alan yaylar). Çekme veya basmaya zorlanan yaylar: çekme veya basma etkisindeki çubuk yaylar, bilezik yaylar.

Yaylar, bir makinede veya sistemde çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Bunlar arasında kuvvet uygulamak, enerji depolamak, hareketi kontrol etmek/sınırlamak, sönümleme yapmak, frekans değiştirmek, kuvvet ve moment ölçmek gibi birçok iş bulunmaktadır. Yay malzemesi olarak genellikle metal kullanılır, ancak plastik gibi farklı malzemelerden imal edilmiş yaylar da bulunmaktadır.

Metal yayların temel kullanımı, bronz çağına kadar uzanmaktadır. Metal yayların yaygın olarak kullanılmasından önce, bitkisel ve hayvansal esaslardan yapılmış esneklik kabiliyeti olan yaylar, ok yayları ve mancınıklarda kullanılmıştır. Daha hassas yaylar, 1400’lü yılların ortalarında mekanik saatlerin önemli bir parçası haline gelmiştir. Sonraları, yaylar kendi kendine gidebilen basit araçların tasarımında önemli bir rol oynamıştır. Buhar makineleri devrine gelindiğinde, yaylar mekanizmaların vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Yaylar genellikle (Şekil 2.2) yuvarlak ve dörtgen kesitli malzemelerden üretilirler. Kullanım alanları arasında tekstil makineleri, presler, buhar makineleri, silahlar olup otomatik hareketlerin bulunduğu her alanda kullanımı artmıştır. Yeni çeşitleri ve dayanıklı malzemelerle üretilen yaylar, hidrolik, pnömatik ve bilgisayar kontrollü tezgahlarda daha hassas, ekonomik ve uzun ömürlü olarak üretilmektedir.



Şekil 2.1. Yayların sınıflandırılması [Kutay, 2010]



Şekil 2.2. Değişik yay örnekleri [Anonymous a, 2024]

2.1. İşlenmiş Yaylar

Tel sarımlı yaylarda olduğu gibi basma, uzama, burulma, yanıl öteleme ve burkulma gibi her türlü yay çeşidi işlenmiş yaylarda da mevcuttur.

"İşlenmiş" terimi, bu yayların, talaş kaldırma ile üretildiğini ifade etmektedir Şekil 2.3'te görüldüğü üzere tek parça malzemeden CNC işleme tezgahlarında talaş kaldırma teknolojisi ile işlenerek üretilmektedir. Bu yaylar, geleneksel yaylara göre

CNC tezgahların hassas işleme yetenekleri sayesinde daha hassas bir performans, daha üstün özellikler sunar. Talaş kaldırma tekniğiyle üretildiğinden dolayı hassas ölçü ve şekillerde yay kesit alanı elde edilebilmektedir. Diğer parçalarla montaj edilebilmesi için çeşitli özel uç şekilleriyle tasarlanabilmekte ve farklı malzeme seçenekleriyle üretilmektedir. İşlenmiş yayların özellikleri aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.



Şekil 2.3. İşlenmiş yay örnekleri (mwcomponents, 2016)

Üretim Süreci ve İşleme:

İşlenmiş yaylar, genellikle istenilen metal veya alaşım levhalarının, çubuklarının belirli bir form kazanması için özel makinelerde işlenir. Bu işleme süreci, yayda istenilen özellikleri elde etmek, belirli toleranslara uymak ve dayanıklılığını artırmak amacıyla uygulanır. CNC tezgahlarda talaş kaldırma yöntemiyle işlendiği için işlenmiş yaylarda dar toleranslarda ölçüler elde edilebilmektedir. Buda işlenmiş yayların hassas olarak çalışmasına olanak sağlamaktadır. Bu avantaj, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik özellikleri açısından geleneksel yaylara göre öne çıkmaktadır.

Kesit Alanı Çeşitliliği:

İşlenmiş yaylar, çok eksenli talaş kaldırma tezgâhları gibi özel işleme kabiliyetleri sayesinde farklı kesit alanlarına sahip olabilirler. Örneğin, kare, dikdörtgen ve yamuk gibi çok daha farklı özel kesit alanlarına sahip olabilmektedir. Bu farklı kesit

alanları, yayın taşıma kapasitesi, esnekliği ve diğer mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır.

Çeşitli Malzeme Seçenekleri:

İşlenmiş yaylar, talaş kaldırma tekniğiyle üretildiği için isteğe özel olarak farklı malzemelerden üretilir. Bu malzemeler arasında çelik alaşımları, paslanmaz çelik, titanyum gibi seçenekler bulunabilir. Malzeme seçimi, yayın kullanım amacına ve çevresel koşullara bağlı olarak yapılır. İşlenmiş yaylarda yaygın olarak kullanılan malzemeler şunlardır: Korozyona Dayanıklı Orta Dayanımlı Çelikler için 17-4 PH , 15-5 PH , CC455. Demir Dışı Alaşımlar Alüminyum 7075-T6 , Alüminyum 7068-T6511 , Titanyum 38644 Beta C ve Plastikler olarak Derlin 100, Ultem 2300 , Polykarbonat örnek verilebilir.

Yay Ucu ve Form Çeşitliliği:

İşlenmiş yaylar, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi montaj sırasında istenilen uç formlarını elde etmek için özel olarak işlenebilir. Bu avantaj Şekil 2.4 ve 2.5'te görüldüğü üzere, birden fazla bileşenin entegrasyonu gibi çok yönlü tasarımlara olanak tanır ve bu durum, montaj işleminin karmaşıklığını önemli ölçüde azaltır. Bu, yayın belirli bir montaj veya uygulama için optimize edilmesini sağlar. Bu önemli avantajlar sayesinde endüstriyel uygulamalarda farklı tasarım ihtiyaçlarına cevap verilebilir.



Şekil 2.4. İşlenmiş yay örnekleri (Anonymous b, 2023)



Şekil 2.5. İşlenmiş yayın kullanım örnekleri [Anonymous b, 2023]

2.2. Geleneksel (Sarım) Yay ve İşlenmiş Yayın Karşılaştırılması

Geleneksel yaylar tel çekme yöntemiyle elde edilen belirli çaplardaki tellerin yay sarma makinelerinde istenilen ölçülerde şekillendirilmesi ile veya el işçiliği ile üretilir. Geleneksel yaylarda, kesit alanları genellikle daire şeklinde olup, ancak özel üretim teknikleri kullanılarak kare, dikdörtgen veya diğer özel formlara sahip olabilirler. İşlenmiş yaylar ise talaş kaldırma yöntemi sayesinde çok farklı kesit alanlarına sahip olabilmektedir. Bu, metalin özel CNC tezgahlarda talaş kaldırılarak istenen formu almasıyla gerçekleştirilir. İşlenmiş yaylar, talaşlı işlemenin esnekliği sayesinde çeşitli teknik gereksinimlere uyacak şekilde özelleştirilebilir.

Geleneksel yaylar, talaşlı işleme yöntemiyle değil, şekillendirme yöntemiyle üretildiği için yayın istenilen ölçülerde elde edilme toleransı nispeten büyüktür. İşlenmiş yaylar ise çok eksenli CNC tezgahlarda talaş kaldırma yöntemiyle üretildikleri için daha yüksek toleranslara ve istenilen teknik özelliklere sahip olabilmektedir. Bu yönüyle işlenmiş yaylar, genellikle endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir ve istikrarlı performans sağlamak için tercih edilir. Ancak talaş kaldırmanın daha fazla zaman alması ve malzeme israfı işlenmiş yayların maliyetini yükseltmektedir. Bu nedenle daha çok özel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Geleneksel yaylar çok küçükten büyüğe istenilen boyutlarda imal edilebilmektedir. İşlenmiş yayların büyük boyutlarda imalatı rahatlıkla yapılabilirken Şekil 2.6’da görüldüğü gibi küçük boyutlarda da işlenmiş yay imalatı mümkündür.



Şekil 2.6. Geleneksel ve işlenmiş yay boyutsal karşılaştırma örneği (Boehm, 2007)

Hem geleneksel (sarım) yaylarda hem de işlenmiş yaylarda helisel yaylardaki halkalar arasındaki uzaklık, genellikle 'kanal boşluğu' terimiyle ifade edilir (Şekil 2.7)



Şekil 2.7 Yaylarda kanal boşlukları (CALDERON, 2013)

İşlenmiş yaylarda, minimum kanal boşluğu yaklaşık 0.5 mm seviyelerinde, maksimum kanal boşluğu ise 6.35 mm civarındadır (Absaac.,2025). Kanal boşluğu mesafesi işlenmiş yaylarda, tel sarımlı yaylardaki gibi özellikle başlangıç ve bitiş kısımlarında değişmemektedir. Kanal boşluğu mesafesinin düzenli bir şekilde dağılması, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır. Bununla birlikte işlenmiş yaylarında sahip olduğu bazı dezavantajlar vardır. Bunların ilki işlenmiş yayların nispeten yüksek olan maliyetleridir. İkincisi ise işlenmiş ve sarım yaylar arasındaki halka sayıları farklılık gösterir. Sarım yayların halka sayısı genellikle çok fazla olabilirken işlenmiş yaylarda sarım sayısı ve boyutlarda bazı sınırlamalar vardır. Bu sınırlamaların iki temel sebebi bulunmaktadır. İlki işlenmiş yayların boyutları ve halka sayısı imal edildiği firmaların teknolojik kapasitelerine göre değişmektedir. Örnek olarak Absaac Firmasının ürettiği yaylarda halka sayısı işlenmiş yayların üretiminde karşılaşılan esnemeler ve üretim zorlukları sebebiyle 30 ile sınırlıdır ve genellikle 20'yi geçmemektedir. Sarım yaylarda ebatlar geniş bir çeşitlilik gösterirken, işleme yaylarda yay boyutları işleme tezgahlarının kapasitesiyle sınırlıdır. İşlenmiş yaylarda elde edilen en küçük çap 2.54 mm iken, en büyük çap 152 mm'dir. En büyük yay boyu ise 610 mm'dir. Anonymous (2023) İşleme yaylarla tel sarım yayların farkları Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. İşlenmiş yaylardaki geometrik sınırlamaların ikinci temel sebebi işleme yaylarda, burulma yay sabitinin (k_t) hesaplanmasında Denklem (2.1) kullanılmaktadır Burada, E elastisite modülü, " N_a " ise aktif tur sayısını ifade etmektedir. D_m değeri ise iç ve dış çap toplamının ortalamasını ifade etmektedir. b ve t ise dikdörtgen kesitli

işlenmiş yay için kesitin genişliği ve yüksekliğini ifade eder. Günümüze kadar yapılan akademik çalışmalar ve şirketlerin edinmiş olduğu tecrübeler neticesinde sarım sayısının özel tasarımlar hariç 20 üzerine çıkarılmasından ziyade formüldeki yay halkasının en ve boy kesit değerini değiştirmek çok daha doğru olmaktadır. Çünkü sarım sayısı arttıkça buna bağlı olarak yay uzunluğu kanal boşluğu gibi değerlerde değişmektedir. Bu da burkulma, düşük kanal boşlukları sebebiyle daha yüksek işleme ücretleri hatta özel üretim teknikleri bile gerektirebilmektedir.

$$k_t = Ebt^3 / (2160D_mNa) \quad (2.1)$$

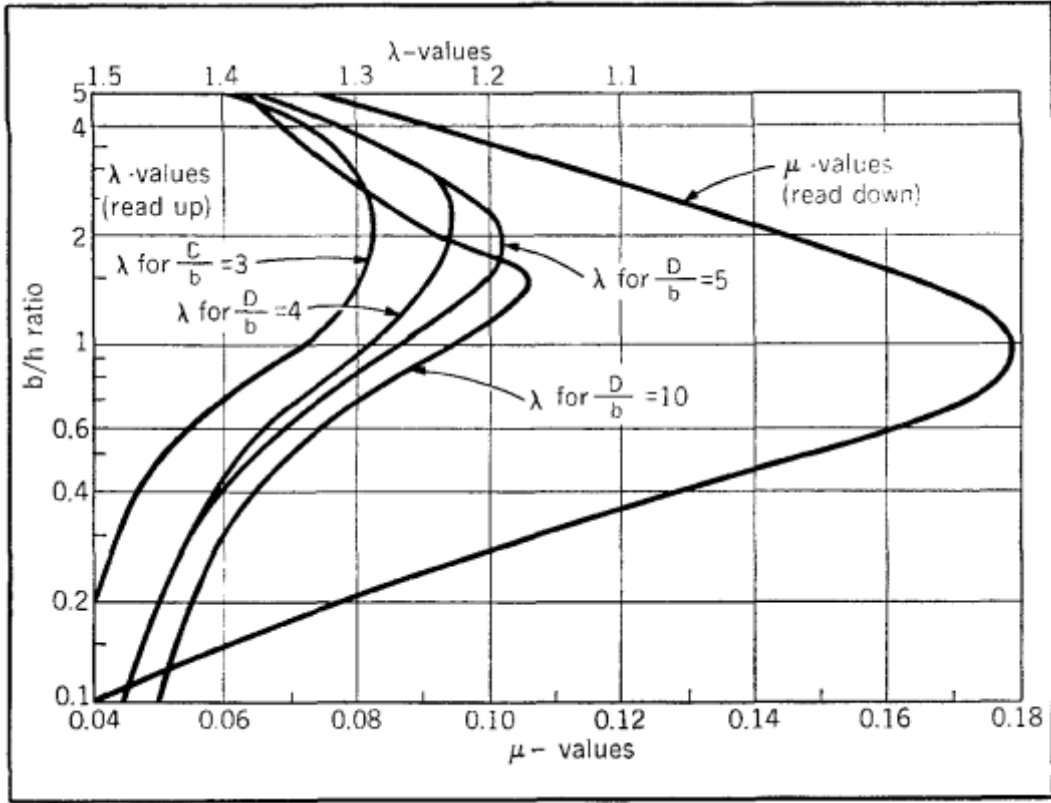
Çizelge 2.1. Yay özellikleri karşılaştırma Anonymous (2023)

Yay Özellikleri		Sarım Yaylar	İşleme Yaylar
Kesit Tipi	Yuvarlak	Evet	Hayır
	Kare	Evet	Evet
	Dikdörtgen (Açısal burulmuş)	Evet	Evet
	Dikdörtgen (Yüksek Oranda Açısal burulmuş)	Hayır	Evet
	Dikdörtgen	Evet	Evet
	Dikdörtgen, (En-Boy oranı fazla)	Evet	Evet
Kanal Boşluğu	Sıfır Boşluk	Evet	Evet (özel üretim yöntemleri)
	Referans 1inch'2.54 mm boşluk	Evet	Evet
	Referans 6.35 mm'den fazla boşluk	Evet	Nadir
Halka Sayısı	1	Evet	Evet
	20	Evet	Evet
	50	Evet	Mümkün
Kuvvet Hassasiyeti	%10	Evet	Evet
	%1	Mümkün	Evet
	%0,1	Hayır	Mümkün

2.3. İşlenmiş Yayların Hesabı

Robert O. Parmley'in kaleme aldığı Mechanical Components kitabında işlenmiş yaylarla ilgili aşağıdaki formüllere yer verilmektedir:

Denklem 2.2'de verilen ifadeye göre, işlenmiş yayın eksenel yaylanma katsayısı K_x , formülünde yer alan μ (katılık faktörü), b (kesitin eksenel uzunluğu) ve h (kesitin radyal uzunluğu) değerlerinin bilinmesiyle hesaplanmaktadır. Aynı zamanda formülde yer alan G değeri malzemenin kayma modülünü (psi cinsinden), N_a yayın aktif sarım sayısını ve D değeri ise ortalama çapı ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Çeşitli tel kesit oranları için katılık faktörü

$$K_x = \frac{W}{\Delta x} = \frac{\mu G b^2 h^2}{D^2 (Na - 1)} \quad (2.2)$$

Denklem 2.3 de S_a kayma gerilmesinin hesaplanması için ise λ (Şekil 2.8 'de görülen katılık faktörü) ve W (eksenel yük miktarı) değerleri kullanılmaktadır.

$$S_a = \frac{\lambda W (D + b)(b + h)}{b^2 h^2} \quad (2.3)$$

Burulma yaylanma katsayısının hesaplanması için ise Denklem 2.4 verilmiştir. bu formülde M :moment değerini E : Young modülünü ifade etmektedir.

$$K_x = \frac{M}{\Delta \theta} = \frac{E h b^3}{2400 D N a} \quad (2.4)$$

Fiber gerilmesinin bulunması için ise Denklem 2.5 kullanılmaktadır.

$$S_f = \frac{6M}{h b^2} \quad (2.5)$$

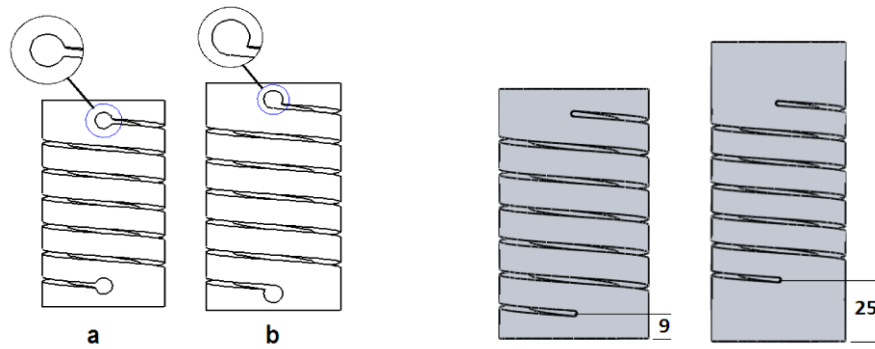
2.4. Literatürde İşlenmiş Yaylar ve Katlanır Mekanizmalar İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Siczek ve ark. (2000) çalışmalarında, işlenmiş supap yayları ile geleneksel yaylar arasındaki dinamik parametrelerin karşılaştırmasını yapmışlardır. İşlenmiş supap yayları ile geleneksel yaylar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modellerin dinamik parametreleri incelenmiştir. Bu kapsamda, yayların sertlik değerleri, yer değiştirme ve titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, işlenmiş supap yaylarının, geleneksel yaylara kıyasla daha düşük titreşim genliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, supap yaylarının sertlik değerleri çıkış supapları için 1.520.000 N/mm, giriş supapları için ise 150.000 N/mm olarak belirlenmiştir. İşlenmiş yayların, yüksek frekanslı küçük titreşimlerde daha üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir. İşlenmiş supap yaylarının dinamik performans açısından geleneksel yaylara göre önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, motor verimliliğini artırmak ve titreşimleri azaltmak amacıyla supap mekanizmasının tasarımında dikkate alınması gerektiği belirtmişlerdir.

Nama. (2015) çalışmasında, helisel işlenmiş yayların statik ve modal analizini incelemektedir. Araştırmanın amacı, adım açısının (pitch angle) yayların maksimum kesme gerilmesi, defleksiyonu ve doğal frekansı üzerindeki etkilerini belirlemektir. Çalışmada, farklı adım açılarına sahip helisel yaylar kullanılarak, bu yayların performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, SolidWorks yazılımı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, farklı adım açılarına sahip altı adet helisel yay modeli oluşturulmuştur. Bu modellerin analizi sonucunda, adım açısının artmasıyla birlikte maksimum kesme gerilmesinin azaldığı, yay defleksiyonunun ise arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, adım açısının artması, yay uzunluğunu artırarak yay kütlesini yükseltmekte ve bu durum temel doğal frekansın düşmesine neden olmaktadır. Çalışma, işlenmiş helisel yayların geleneksel helisel yaylara göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ek olarak, farklı yay başlangıç sayılarının etkisi de incelenmiş ve işlenmiş helisel yayların performansının bu şekilde daha da iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Adım açısının helisel yayların statik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Artan adım açısı, yayların defleksiyonunu artırırken, maksimum kesme

gerilmesi ve temel doğal frekansı azaltmaktadır. İşlenmiş helisel yaylar, geleneksel helisel yaylara göre daha iyi performans sergilemekte ve bu nedenle mühendislik uygulamalarında tercih edilebileceğini ortaya koymuştur. Demirtaş (2019) tarafından yapılan çalışmada, açısal deplasman altındaki işlenmiş burulma yaylarının momentlerini ölçmek amacıyla test düzenekleri tasarlanmış ve numuneler test edilmiştir. Kullanılan işleme yaylar, hazır şekilde yurt dışından temin edilmiş olup, bu yaylar üzerinde deneysel ölçümler ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde, yayların boyutsal parametrelerinin moment ve gerilme üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, bu parametreler arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır. Analizler sonucunda, işleme yay sabitlerinin deneysel sonuçlarla yüksek doğrulukta uyum sağladığı görülmüştür. 720 farklı işlenmiş yay modeli üzerinde yapılan parametrik analizlerden elde edilen veriler kullanılarak bir yapay sinir ağı geliştirilmiş, bu ağ ile işleme yay sabitlerinin tahmini gerçekleştirilmiştir.

Nama (2015), tarafından yapılan çalışmada SolidWorks yazılımının yardımıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak helisel işlenmiş bir yayın doğrusal statik ve modal analizini inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, Şekil 2.9'da görülen gerilme rahatlatma deliği olarak kullanılan yuva delikleri a şeklinde yuva deliği merkezi olarak konumlanmış b şeklinde ise yuva deliği teğet olmak üzere 2 farklı tip yay yuvası modellenmiştir. Çizelge 2.2'de görülen çap ölçülerinde ve Çizelge 2.3'te görülen uzunluklarda tasarım yapılmıştır. Her bir geometri için yaylar alt tarafından sabit tutularak üst ucuna 100 N basma kuvveti uygulanmıştır. Sonuçta oluşan maksimum kayma gerilmesi, sıkışma miktarı ve doğal frekans değerleri nümerik ve analitik olarak Çizelge 2.3'teki gibi elde edilmiştir. Böylece işlenmiş yaylarda gerilme rahatlatma deliklerinin oluşan maksimum gerilmeye etkisi araştırılmıştır.



Şekil 2.9. Nama (2015) tarafından yapılan çalışmada işlenmiş yay geometrisinin yay performansına etkisini incelemek için değiştirilen parametreler

Çizelge 2.2. Nama (2015) Çalışmasında işlenmiş yay delik çapının maksimum kayma gerilmesi, sıkışma miktarı ve doğal frekansa etkisi

Delik çapı (mm)	τ_{maks} (N/mm ²)		δ_{maks} (mm)		F (Hz)	
	Merkez	Teğet	Merkez	Teğet	Merkez	Teğet
2	14.953	14.953	0,2085	0,2085	458.71	458.71
3	14.845	14.475	0,2093	0.2090	457.65	458.19
4	13.741	12.717	0.2102	0,2093	456.27	457.73
5	13.636	12.814	0,2112	0,2097	454,59	457.24
6	12.828	12.811	0,2125	0.2101	452.52	456,79
7	12.858	12.847	0,2138	0.2104	450.00	456.44

Çizelge 2.3. Nama (2015) Çalışmasında işlenmiş yay geometrisinin maksimum kayma gerilmesi, sıkışma miktarı ve doğal frekansa etkisi

Uzunluk (mm)	τ maksimum(N/mm ²)	δ maksimum(mm)	F (Hz)
9	14.953	0,2085	458.71
13	16.717	0,2072	458.47
17	16.100	0,2068	458.42
21	17.623	0,2065	458.35
25	16.196	0,2063	458.32
29	16.256	0,2063	458.29

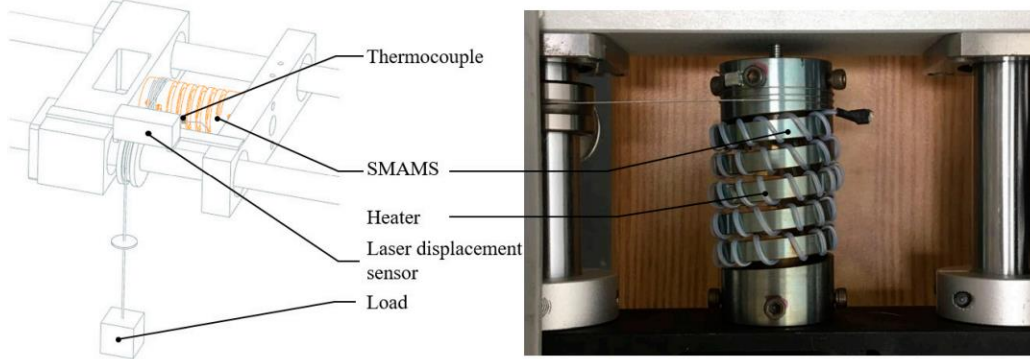
Chen ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada Çizelge 2.4'te sıcaklıkla şekil değiştiren şekil hafızalı alaşımların özellikleri verilmiştir. Bu malzemeden Çizelge 2.5'te belirtildiği üzere 4 farklı tipte SMA (şekil hafızalı alaşımlı işlenmiş yay) üretilmiştir. Bu yaylar Şekil 2.10'da görüldüğü üzere deney düzeneğinde test edilmiştir. S2 tipindeki ölçülerdeki yaya Şekil 2.10'da görüldüğü gibi deney düzeneğinde farklı yükler bağlanmış dolayısıyla farklı torklar elde edilmiş ve malzemenin sıcaklığı değiştirilerek Şekil 2.11'de görüldüğü üzere malzemedeki dönme açıları bulunmuştur. 30 mm dış çap 26.6 mm iç çap bir yay farklı tork değerlerine tabi tutulurken sıcaklıkları değiştirilmiş ve genel itibariyle hep 70 derece dolaylarında bir değişim gözlemlenmiştir. Dolayısıyla şekil hafızalı alaşım farklı tork değerlerine maruz kalsada eski haline dönmede hep yaklaşık sonuçlar vermiştir. Fakat, Şekil 2.11'de görüldüğü gibi yaylar sürekli ısıt soğut döngüsüne tabi tutulduklarında yayların dönme açıları zamanla değişmekte ve bir noktadan sonra stabil değerlere ulaşmaktadır. Bu durumun deney sonuçları Şekil 2.12'de verilmiştir. Yay plastik deformasyon limitlerine ulaştığı için bu durumun gözlemlendiği belirtilmiştir.

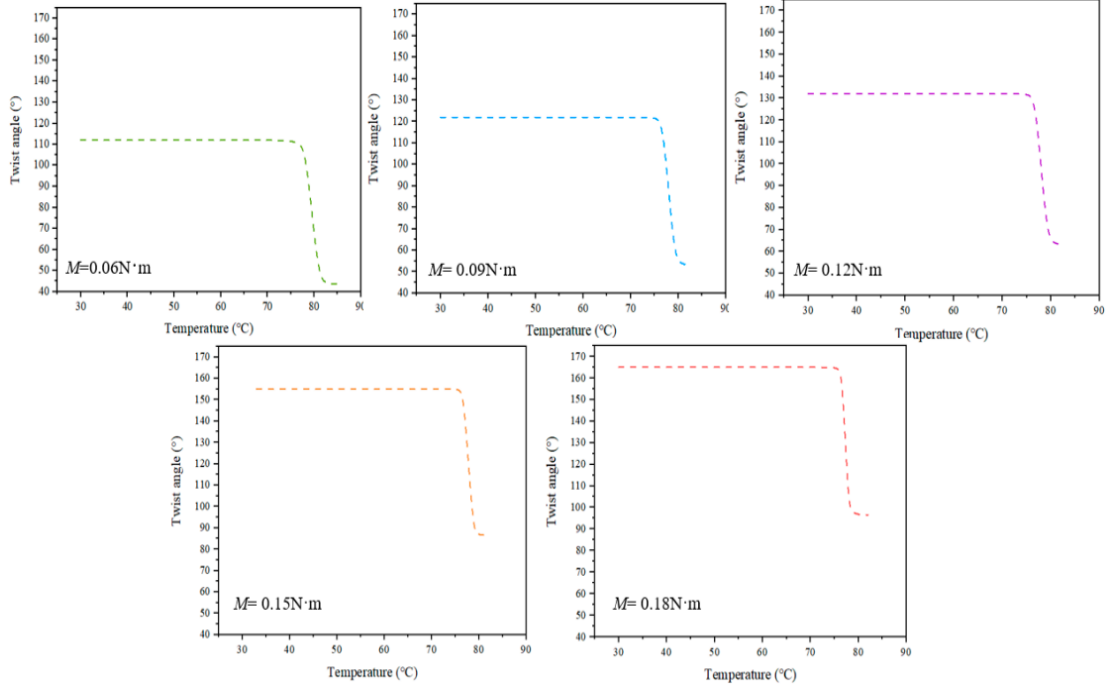
Çizelge 2.4. Chen ve ark. (2022) Çalışmalarındaki SMA Malzeme Özellik Tablosu

Özellik	Sembol	Değer
Young modülü (östenitfazı)	D_a	67 GPa
Young modülü (martensitfazı)	D_m	26.3 GPa
Maksimum artık gerinim	ε_L	0.038
Termal genleşme katsayısı	Θ	0.55 MPa/°C
Östenit fazı bitiş sıcaklığı	A_f	82 °C
Östenit fazı başlangıç sıcaklığı	A_s	77 °C
Martensit fazı bitiş sıcaklığı	M_f	40 °C
Martensit fazı başlangıç sıcaklığı	M_s	58 °C
Östenit için stres etki katsayısı	CA	13.8 MPa/°C

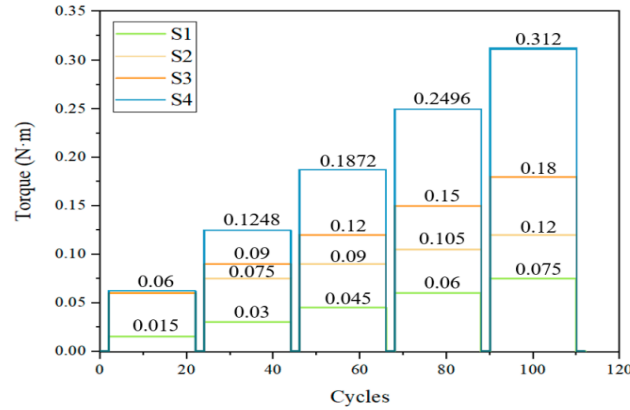
Çizelge 2.5. Chen ve ark. (2022) Çalışmalarındaki yay geometrik parametreleri

Parametre	Sembol	S1	S2	S3	S4
Dış çap	D_o	30 mm	30 mm	30 mm	31.2 mm
İç çap	D_i	26.6 mm	26.6 mm	26.6 mm	25.8 mm
Yay kesit kalınlığı	b	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm	2.6 mm
Yay kesit yüksekliği	h	2.4 mm	3.2 mm	4.8 mm	3.2 mm
Aktif helis sayısı	n	5	5	5	5
Adım	p	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm
Toplam uzunluk	l	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm
Yay indeksi	-	17.68	17.68	17.68	10.96

**Şekil 2.10.** Chen ve ark. (2022) Çalışmalarındaki Deney Çalışma Görşeli



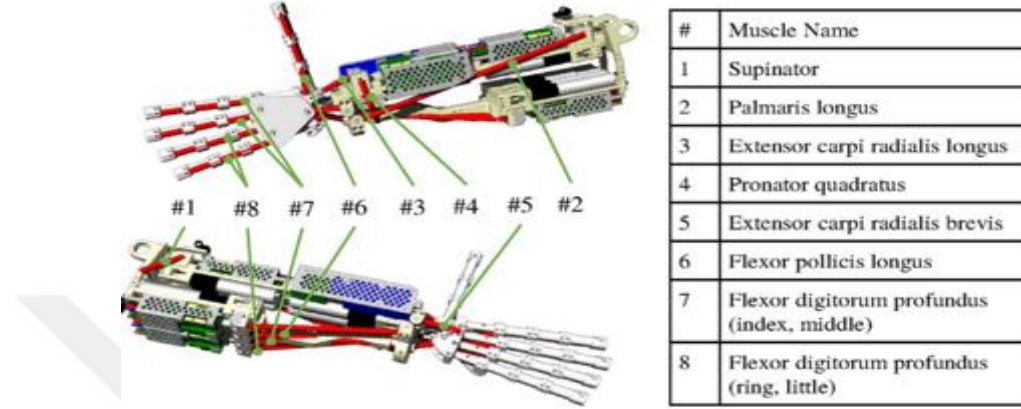
Şekil 2.11. Chen ve ark. (2022) Çalışmalarındaki Farklı Tork Durumlarında Sıcaklığa Bağlı Açısal Değişimler



Şekil 2.12 Chen ve ark. (2022) çalışmasında farklı sayıdaki döngü durumlarındaki tork değişimleri

Kawaharazuka ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada işlenmiş yay, esnek bir parmak eklemine tasarımında geleneksel bobin yaylara göre sahip oldukları avantajlar nedeniyle kullanılmıştır. Tasarım Şekil 2.13'te verilmiştir. Burada kırımızı ile gösterilen parçalar işlenmiş yay olup kasın benzetimi olarak tasarlanmıştır. Şekilde 1'den 8'e kadar olan kısımlar bir insan kolunun biyolojik bölümlerini göstermektedir. Çalışmada ilk olarak işlenmiş yaylar istenilen geometrilere üretilerek montaj yetenekleri artırılmıştır. İkinci olarak, entegre edilebilen eklerle tasarlanarak yapısal dayanıklılık korunmuştur. Üçüncü olarak, işlenmiş yayın kesit alanı dikdörtgen olduğu için, sınırlı bir alanda parmağın daha büyük bir kesit alanına sahip olması mümkün

olmuştur. Büyük kesit alanı ise büyük kuvvetler aktarabilmiştir Dördüncü olarak, CNC makinelerde işleme yetenekleri sayesinde dikdörtgen kesit oranı ayarlanabilmiş ve bükme ve tork rijitliği bağımsız olarak ayarlanıp istenilen değerlerde işlenmiş yay üretilmiştir. Çizelge 2.6’da tasarımda kullanılan her bir yayın, yay katsayıları verilmiştir.

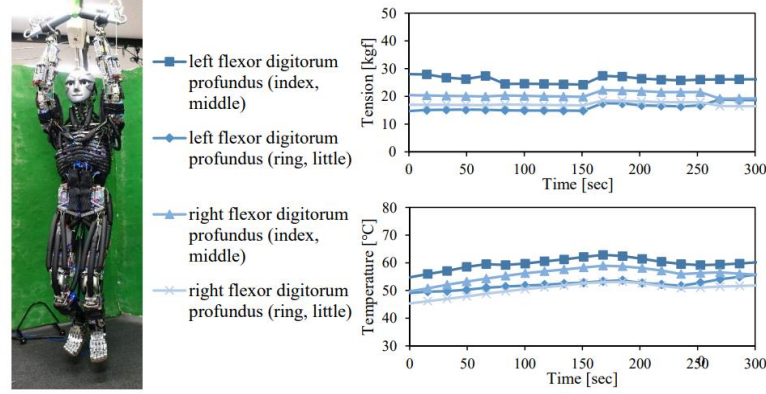


Şekil 2.13. Kawaharazuka ve ark. (2020) Çalışmalarındaki Tasarlanan Mekanizmanın bölge isimleri

Çizelge 2.6. Kawaharazuka ve ark. (2020) Çalışmalarındaki İşlenmiş yayların her bir bağlantıdaki yay sabitleri [$^{\circ}$ /Nm].

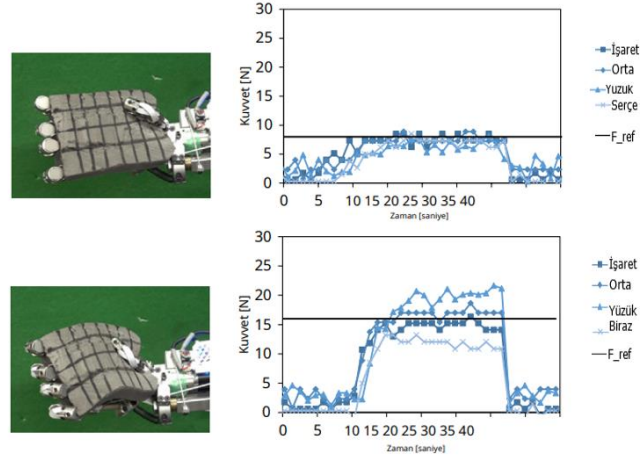
	CM eklemi	MP eklemi	IP eklemi
Baş parmak	664	443	443
	MP eklemi	PIP eklemi	DIP eklemi
İşaret	863	664	443
Orta	903	707	443
Yüzük	863	664	443
Serçe	707	664	443

Şekil 2.14 ve 2.15’te yapılan tasarımın deneysel sonuçları verilmiştir. Yapılan ön kol ve el tasarımıyla kitap açma, sarkıtma ve badminton sallama gibi çeşitli deneyler yapılmış, bunların etkinliğini doğrulanmış ve işlenmiş yayların suni uzuvlarda kullanılabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Kawaharazuka ve ark. (2020) Çalışmalarındaki flexor kas deney sonuçları

"Kuvvet sensörü referans değeri" terimi, kuvvet sensörlerinin doğruluğunu, hassasiyetini ve kalibrasyonunu belirlemek için kullanılan bir kavramdır. Bir kuvvet sensörünün referans değeri, genellikle üretici tarafından belirlenen ve sensörün ideal çalışma koşullarında üreteceği veya algılayacağı kuvvetin önceden bilinen bir değeridir. Bu değer, sensörün belirli bir kuvvet değeri altında veya üstünde doğru bir şekilde çalışması gereken değeri temsil eder. Şekil 2.15'te ref değeri parmak uçlarına takılan sensörlerin referans değerlerini diğer değerler ise bu referans değerinin altında ve üstünde kalma durumlarını göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışmada işlenmiş yaylar kullanılarak esnek ve sağlam bir biyonik el elde edilmiştir. Bu eklemleri kullanarak çekiçle vurulduğunda kırılmayan, çeşitli nesneleri kavrayabilen bir el yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, bu tasarım yöntemlerini entegre ederek, insan oranından, ağırlığından, kas dizilişinden ve kemik yapısından sapmadan, taklitçi bir insan ön kolu ve eli oluşturulması başarılmıştır. Böylece bu çalışmayla insan benzeri bir ön kol ve el tasarımının geliştirilmesi için yeni bir yaklaşım sunulmuştur.



Şekil 2.15. Kawaharazuka ve ark. (2020) Çalışmalarındaki parmak eklemlerindeki alınan deneysel sonuçlar

Calderon ve Perez (2013) çalışmalarında işlenmiş yaylarda kullanılan malzemelerin sertlik aralıkları, fiyat aralıkları, uzama aralıkları, eğilme mukavemeti aralıklarını grafikler halinde vermişler ve bu sayede işleme öncesinde gereken takımın işleme parametrelerinin seçilmesi kolaylaştırılmıştır. Aynı zamanda işlemeden önce aşağıdaki sıralamayla hareket edilmesi tavsiye edilmiştir.

1. Yayın yüklerini ve yer değiştirmelerini belirleyin.
2. Özelliklere ve maliyetlere göre malzeme seçin.
3. Ağırlığın azaltılmasına, hassasiyete ve diğer yay özelliklerine göre işlenmiş yay uygulamasının uygun olup olmadığını belirleyin.
4. Yayın boyutuna göre işlenebilir olup olmadığını doğrulayın.
5. Yayın yük tepkisinin stabilitesine odaklanarak yaydaki başlangıç sayısını belirleyin
6. Yayın CAD modellemesini geliştirin.
7. Önceden tanımlanan yüklerle ve yer değiştirmelere dayalı bir CAE analizi gerçekleştirin. Gerekirse modal analize veya termal davranışa odaklanan CAE gerçekleştirin.
8. CAE sonuçlarına ve işlenebilirlik kriterlerine dayalı olarak tasarımın iyileştirilmesi ve/veya optimizasyonu.
9. Prototipleme yoluyla tasarım testi ve doğrulama

Katlanır kanat mekanizması ile ilgili yapılan çalışmalar arasında Xiaopeng ve Haixin (2017) çalışması bulunmaktadır ve bu çalışmada kendiliğinden genişleyen / katlanan kanat fikri ortaya konulmuş ve bu fikre dayalı olarak son derece büyük bir kanat oranına sahip uçakların ön tasarımı yapılmıştır. Uçuş sırasında genişleme ve katlanma işlemi, dümen yüzeylerinin hareketi, dağıtılmış itki sisteminin ayarlanması ve aktif uçuş kontrol teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Ön tasarım ve performans analizi

sonucunda katlanır kanatlar sayesinde bu tür uçakların havaalanı pisti uyumluluğunun, kalkış ve iniş performansının ve yüksek seyir kaldırma / direnç oranının önemli ölçüde artırılabilceği gösterilmiştir. Çalışmada katlanan kanatın performans ölçümleri yapılmış ve katlanır kanatlı yeni tasarımın aynı yakıtla uçabileceği menzilin 36 saatten 50,7 saate çıktığı belirtilmiştir. Sonuç olarak kanat açıklığının artması ağırlığı artırmakla birlikte menzilde de önemli oranda artış sağlamıştır.

Lu ve ark. (2022) çalışmalarında, katlanabilir kanatlara sahip bir insansız hava aracının (İHA) tasarımı ve uygulamasını ele almışlardır. Katlanabilir kanatlar, elastik kuvvet ile açılarak kilitlenebilen bir mekanizma şeklinde tasarlanmıştır. İHA'nın gövdesi ve kanatları 3D baskı yöntemiyle üretilmiştir. Tasarımda kullanmak üzere farklı mod frekanslarını belirlemek için çalışmada katlanabilir mekanizmaya kurulan bir deney düzeneği ile modal analiz yapılmıştır. Modal analizler model ile nümerik olarak yapılmıştır. Sonuçta nümerik ve deneysel olarak belirlenen farklı modlardaki frekansların birbirine çok yakın elde edildiği belirtilmiştir.

Watson ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmadaki nihai amaç küçük ölçekli bir roketle fırlatılacak, kolay üretilen, sabit kanatlı bir İHA tasarımı geliştirmektir. Çalışmada kanatlarını 4 inçlik bir faydalı yük tüpü içerisinde katlayıp açabilen bir prototip geliştirmişler ve başarılı olmuşlardır. Tipik bir 4 inçlik roketten başarılı fırlatmayı sağlamak için sistem, katlandığında 95 milimetreden daha geniş olmamalıdır. Bu sebeple katlanır kanat tasarımına ihtiyaç duyulmuş ve yaylı kilitlenebilen ve yine yaylanma ile açılabilen bir kanat tasarımı yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

İşlenmiş yaylarda yaygın olarak kullanılan malzemeler, korozyon direnci ve dayanım özellikleri göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Korozyona dayanıklı, orta dayanımlı çelikler arasında 17-4 PH, 15-5 PH ve Custom 455 martenzitik paslanmaz çelik türleri öne çıkmaktadır. Demir dışı alaşımlar kategorisinde ise Alüminyum 7075-T6, Alüminyum 7068-T6511 ve Titanyum 38644 Beta C yaygın olarak tercih edilmektedir. Plastik malzemelerden ise Delrin 100, Ultem 2300 ve Polikarbonat sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, katlanır roket kanatçığında işlenmiş yay malzemesi olarak ticari ismi 17-4 PH, standartlarda AISI 630 (1.4542) olarak geçen paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Martenzitik bir paslanmaz çelik türü olan AISI 630 malzeme üstün mekanik özellikleri ve korozyon direnciyle öne çıkmakta olup H925 temperli satın alınmıştır. Bu temper durumu malzemenin çözeltiye alındıktan sonra 496°C’de yaşlandırılmış halini belirtir. Malzemenin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

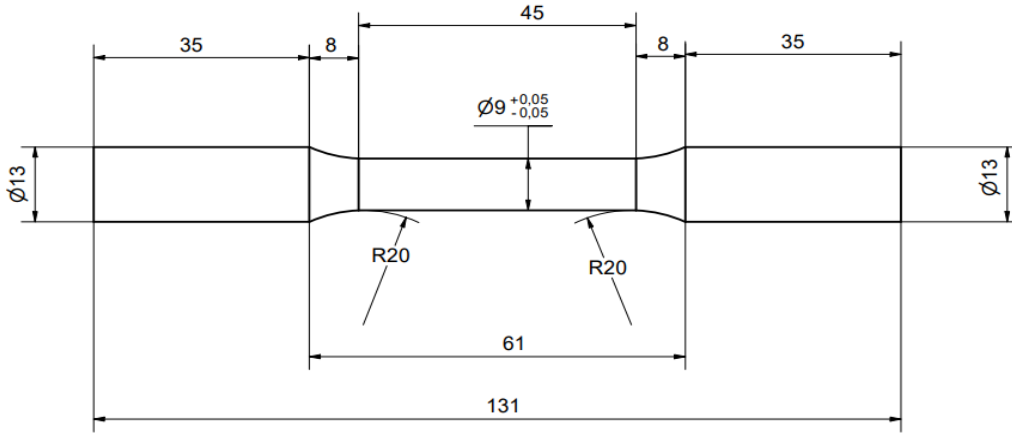
Çizelge 3.1. 17-4 PH Çeliği Kompozisyonu

Karbon C	Mangan Mn	Silisyum Si	Fosfor P	Kükürt S	Krom Cr	Bakır Cu	Niyobyum Nb	Tantal Ta	Nikel Ni
Maks. %0.07	%1	Maks. %1	Maks. %0.04	Maks. %0.03	%15- 17.5	%3-5	Maks. %0.45	Maks. 0.45	%3-5

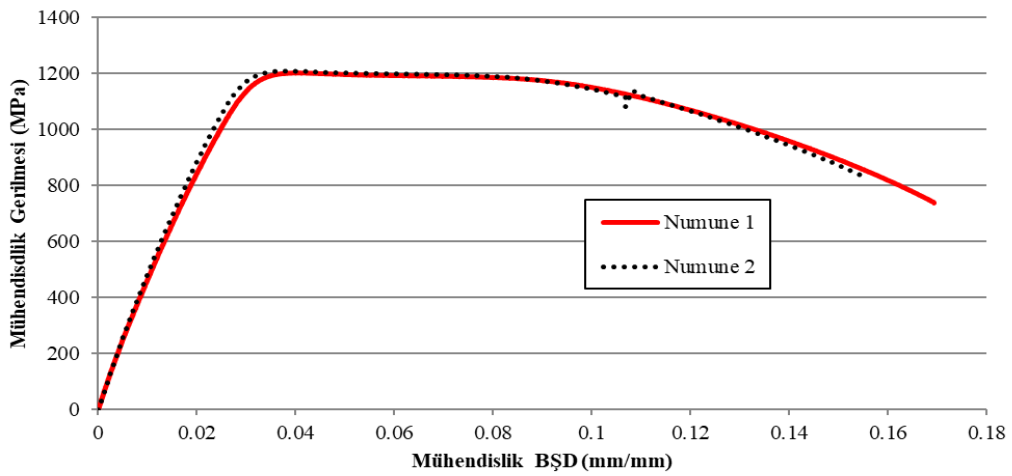
3.2 Çekme Testleri

Malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM E8 standardına göre çekme deneyi yapılmıştır. Numune ölçüleri ve geometrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Ölçü çapı 9 mm olan numuneler CNC tezgâhta işletilerek üretilmiştir. Çekme deneyleri öncelikle Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde Instron marka çekme deney cihazında 5 mm/dk hızında iki tekrarlı olarak yapılmıştır. Ancak mühendislik gerilme ve Birim Değiştirme (BŞD) grafiği oluşturulduğunda malzemenin elastik uzama miktarının Şekil 3.2’de görüldüğü gibi oldukça fazla olduğu görülmüş ve elastiklik modülü yaklaşık 40 GPa olarak hesaplanmıştır. Çekme deney cihazında video ve mekanik ekstansometrelerin sağlıklı çalışmaması nedeniyle çenelerin hareket miktarı BŞD’lerin hesabında kullanılmıştır.

Ölçümde hata olma ve deney sırasında bağlantı elemanlarında meydana gelen esnemelerin uzamaya dahil olması ihtimalleriyle uzama miktarlarının hatalı olduğu düşünülerek hazırlanan üçüncü tekrar numune Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN çekme deney cihazında video extensometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucuna göre elastiklik modülü değerinin uygun çıktığı görülmüştür. KTÜN ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitelerinde yapılan çekme deney sonuçlarında gerilme değerlerinin aynı olduğu farklılığın sadece uzama değerlerinde meydana geldiği bulunmuştur. Bu nedenle KTÜN’de yapılan deney tekrarlarında BŞD değerleri Niğde’den elde edilen sonuçla aynı elastiklik modülüne sahip olacak şekilde düzeltilerek kullanılmıştır. Elde edilen verilerden malzemenin mekanik özellikleri hesaplanmış ve malzeme kataloglarına belirtilen standart değerlerle yakın olduğu görülmüştür. İlgili sonuçlar 4. Bölüm ’de verilmiştir.



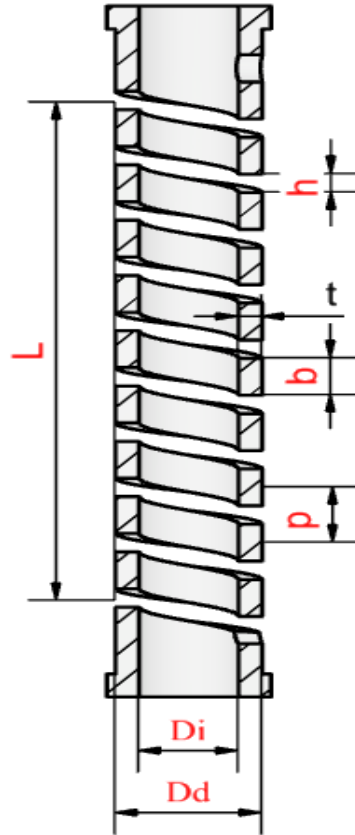
Şekil 3.1. Çekme testi numunesi boyutları



Şekil 3.2. KTÜN’de gerçekleştirilen aısı 630 paslanmaz çeliğin çekme deneyi sonuçları

3.3 İşlenmiş Yay Üretim Süreci

İşlenmiş bir yayda yay kesiti talaş kaldırma yöntemi ile edilir. Bu açıdan işlenmiş yayların imalatı hassas ve zor bir üretim sürecidir. İşlenmiş yayların uygulayacağı tork veya eksenel kuvvet malzemesinin yanı sıra yayın geometrik parametrelerine bağlıdır. Şekil 3.3'te işlenmiş yay tasarım parametreleri verilmiştir. Burada t ölçüsü işlenmiş yay kesitinin radyal uzunluğunu temsil eden et kalınlığını ifade ederken, b ölçüsü eksenel kesit uzunluğunu belirtmektedir. P ifadesi adımı, D_d dış çapı, D_i ise iç çapı temsil etmektedir. h , helis boşluğunu, L ise helis uzunluğunu ifade eder. Tezde yay kesitinin b ve t ölçüleri değiştirilerek yay kesitinin yayın verebildiği tork değerlerine etkisi deneysel olarak ölçülmüştür. Tork değerleri analitik ve nümerik olarak da elde edilmiş ve deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra işlenmiş yaylar tez kapsamında tasarlanıp imal edilen roketlerin katlanır kanat mekanizmasına bağlanarak, yayların roket kanatçığını açma performansı, kanat açılma hızı üzerinden ölçülmüştür. Yine kanat açılma simülasyonu yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. İşlenmiş yay tasarım parametreleri

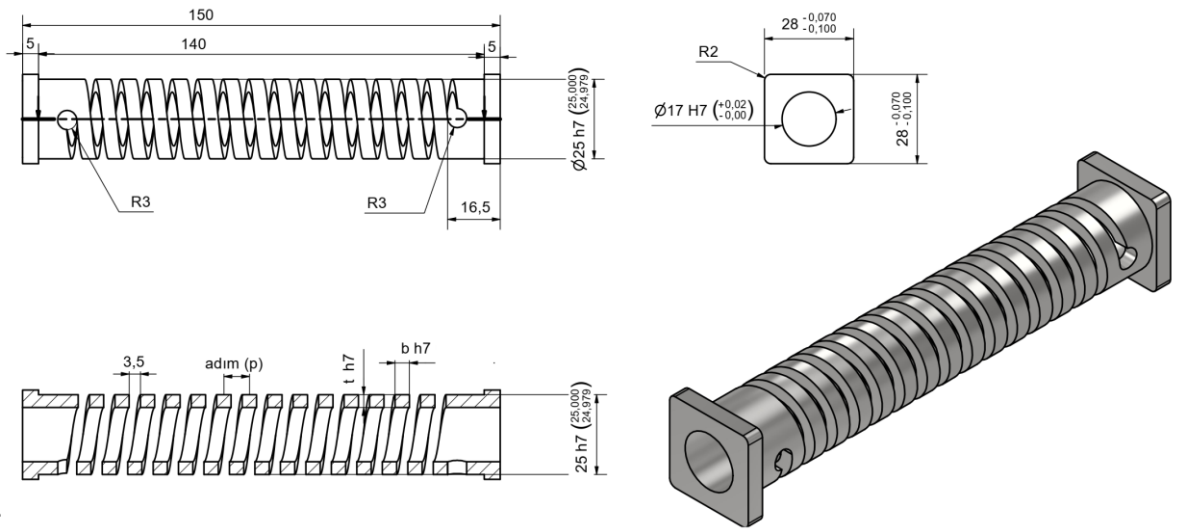
Üretimin maliyetli ve uzun sürmesi sebebiyle işlenmiş yaylar iki farklı imalat tekniği ile elde edilmiştir. Bunlardan ilki talaşlı imalat ikincisi ise lazer profil kesim yöntemidir.

3.3.1 İşlenmiş yayların talaşlı imalatı

İşlenmiş yay üretim süreci, belirli bir işleme sırasına göre titizlikle yürütülmelidir. Tez kapsamında dört farklı kesitte tasarlanan yayın imalat teknik resmi Şekil 3.4'te tasarım ölçüleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Yayların sarım sayısı sabit 14 alınmış olup adımı 8 mm ve 5.5 mm olmuştur. Kesit uzunluğu 5 mm olan yayların toplam boyu 150 mm, 2,5 mm olanların ise 110 mm olmuştur. Dış çap sabit 25 mm olarak alınmıştır. Yayların uç kısımları kullanım yerinde montaj kolaylığı açısından 28x28 mm kare kesitli olarak tasarlanmıştır. Yayların talaşlı imalatı hizmet alımı ile yaptırılmış ancak işleme aşamasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle imal edilen ölçülerde tasarlanana göre değişkenlikler meydana gelmiştir. 4. Bölümde imal edilen yayların ölçüsel değişkenlikleri sonuç olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. Üretim öncesi tasarlanan yay ölçüleri

	Yay kesit uzunluğu (b)	Yay kesit kalınlığı (t)
Tasarım 1	5 mm	4 mm
Tasarım 2	5 mm	2,5 mm
Tasarım 3	2,5 mm	4 mm
Tasarım 4	2,5 mm	2,5 mm



Şekil 3.4. Tasarlanan işlenmiş yayın imalat teknik resmi

Yayların imalatında ilk aşamada, milin dış ve iç çapları torna yapılarak helislerin açılmasına uygun hale getirilmiştir. Bu tornalama işleminin boyut hassasiyeti, yay rijitliğinin doğru olarak hesaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. İç ve dış çap tornalamanın ardından, freze tezgahında helislerin açılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak helislerin doğru hassasiyette ve minimum esneme ile işlenebilmesi için, torna parçasının iç çapına sıkı geçme olarak kestamit montaj edilmiştir. İşlem sırasında oluşabilecek esnemelerden ve gerilme kaynaklı hatalardan kaçınmak adına, işleme parametrelerinin doğru seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Aşağıda, tornalama ve freze tezgahlarına ait işleme süreçleri ve parametreleri verilmiştir.

Dış çap tornalama

Öncelikle 30 mm çapındaki dolu mile 141 m/dk (1500 dev/dk), 0,2 mm/dev ilerleme oranı ve 1,5 mm talaş derinliğinde dış çap tornalama işlemi yapılmıştır.

Matkap ile delik delme

Delik açma işlemi, 17 mm çapında helisel matkap kullanılarak 300 devir ve 0,3 mm/dev ilerleme oranıyla, gagalama yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntemde, gagalama derinliği 2 mm alınmıştır.

Delik tornalama

Delik tornalama işlemi delik kalemi ile ince işleme şartlarında yapılmıştır. Buna göre kesme koşulları 800 devir/dk kesme ve 0,12 mm/dev ilerleme oranında, 0,5 mm talaş derinliği ile gerçekleştirilmiştir.

Böylece delik işlemi son haliyle tamamlanmış istenilen toleranslar ve yüzey kalitesi sağlanmıştır. Tornalama işleminin toplam süresi: 1,5 saat olarak tamamlanmıştır. Şekil 3.5'te işlenmiş yayın iç ve dış çap tornalanmış halinin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 3.5. Tornalanmış işlenmiş yay örneği

Frezeleme ile yay helislerinin açılması

Tornalama işleminin ardından, parça 4 eksenli freze tezgahında helisel yüzeylerin işlenmiştir. Şekil 3.6'da içerisine kestamit malzeme sıkı geçirilmiş iş parçasının divizöre bağlanmış hali görülmektedir. Şekil 3.7'te helis açma işlemine ait görsel verilmiştir. İşlenmiş yay, 1,5 saatlik tornalama ve 4 saatlik helis açma işlemi olmak üzere toplam 5,5 saatlik bir sürede işlenmiştir. Aşağıda, helis açma işlemine ait işleme parametrelerinin detayları yer almaktadır.

Helisel kanal, 3 mm çaplı bir freze ile 5500 devir, 0,1 mm paso miktarı ve %45 ilerleme oranında işlenmiştir.



Şekil 3.6. Helislerin açılma işlemi

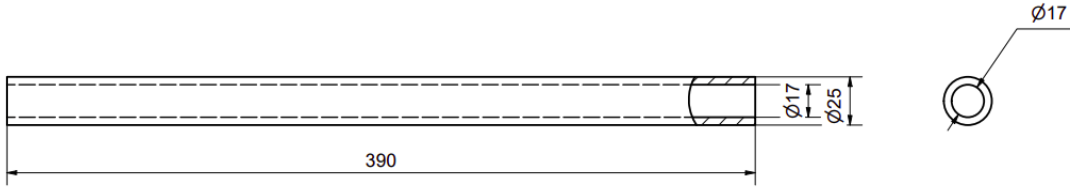


Şekil 3.7. Helislerin açılma işlemi

3.3.2 İşlenmiş yayların profil lazer kesimi

İmalat süresini ve maliyetini azaltmak amacıyla tezde profil lazer kesim imalat yönteminin de işlenmiş yay performansına etkisi araştırılmıştır. Profil lazer kesim yöntemiyle yayların imalatında öncelikle dolu mil malzemedan Şekil 3.8’de imalat teknik resmi görülen boru malzeme üretilmiştir. Helisleri ise lazer kesim teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Lazer kesim tezgahının parçaya yanaşabilmesi için boru boyu 390 mm alınmıştır. Lazer kesim yöntemiyle üretilen yaylar için 4,5 x 4 mm kesit ölçüsü değeri belirlenmiştir. Bu kesit değeri kıyaslama yapabilmek için talaşlı imalat ile elde edilen kesitlerin ortalama ölçüsü olarak alınmıştır. Ancak lazer kesim teknolojisinden kaynaklanan termal gerilmeler ve metalin ergimesinden kaynaklanan cüruf birikimleri nedeniyle dış ve iç çaplar ile kesit ölçülerinde farklı değerler elde edilmiştir. Elde edilen ölçüler 4. Bölümde paylaşılmıştır. Helis kanallar profil lazer ile kesildikten sonra yayların uç kısımlarındaki kare kesitler lazer kaynağı ile eklenerek hedeflenen geometri elde edilmiştir. Profil lazer kesim yöntemiyle imalatta uzun ve dolu milden boru elde etmek için delme yöntemi zorlayıcı olmuştur. AISI 630 paslanmaz çelik malzemedan istenilen ölçülerde boru bulunamadığı için işleme yöntemiyle parça imal edilmiştir.

Lazer kesim süresi birkaç dakika ancak almaktadır. Fakat torna tezgahında delik delme işlemi dahil edildiğinde imalat süresi 1,5 saati bulmuştur.



Şekil 3.8. Profil lazer kesim yönteminde kullanılmak üzere üretilen boru

3.4 Analitik Hesaplamalar

Katlanır kanat mekanizmasındaki kullanım performansı araştırılan işlenmiş yay, belirli açılarda burulduğunda tork uygulayacak şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla tasarlanan yay bir burulma yayıdır. İşlenmiş burulma yayının yay sabiti, k_t yay torkuna karşı açısal deformasyonunu belirleyen temel parametrelerden biridir ve Denklem (3.1) (Robert O. Parmley P.E., 2000) yardımıyla hesaplanmıştır. Burada E elastiklik modülü, b yay kesit uzunluğu, t yay kesit kalınlığı, D_m ortalama çap ve N_a sarım sayısıdır. Bu parametre, yayların yük altında gösterdiği esneklik miktarını ve dolayısıyla yayın belirli açılarda burulduğunda oluşturacağı torku belirlemek amacıyla kritik bir öneme sahiptir. Tezde imalatı yapılmış olan yayların imal edilmiş kesit ölçüleri kullanılarak her bir yayın yay sabiti hesaplanmış ve belirli açılarda burulduğunda oluşturacağı tork belirlenerek deneylerde ölçülen tork değeri ile karşılaştırılmıştır. Böylece yay imalatının ve tasarımın doğruluğu ve performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca yayın, belirlenen tasarım parametrelerine ve yükleme durumlarına uygun çalışıp çalışmadığını belirlenmiş ve hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farklılıkların nedenleri üretim toleransları, malzeme özellikleri veya deneysel ölçüm hataları açısından analiz edilmiştir.

$$k_t = Ebt^3/2400D_mN_a \quad (3.1)$$

3.5. İşlenmiş Yayların Sonlu Eleman Yöntemiyle Burulma Analizleri

Mühendislik uygulamalarında, malzeme ve tasarım süreçlerinin başarısı, yalnızca yenilikçi bir tasarım ile sınırlı kalmayıp aynı zamanda bu tasarımın üretim öncesinde detaylı bir şekilde analiz edilmesiyle de doğrudan ilişkilidir. Sonlu Eleman Analizleri (SEA), tasarımın doğruluğunu, dayanıklılığını ve güvenilirliğini üretim

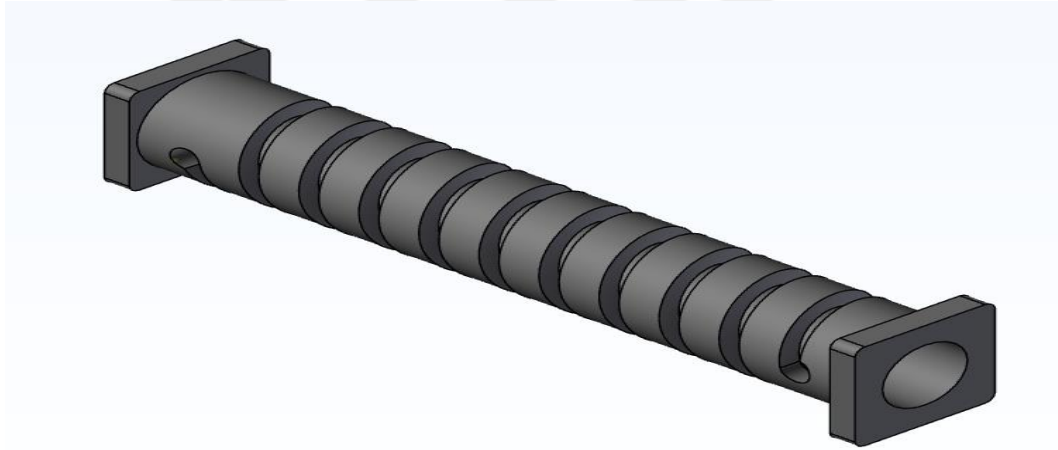
aşamasına geçmeden önce değerlendirme imkânı sunarak, potansiyel hataları ve eksiklikleri önceden öngörmeyi sağlar. Bu analizler sayesinde, prototip oluşturmada önce yapısal dayanım, termal performans, rijitlik ve titreşim gibi kritik özellikler değerlendirilir, böylece üretim maliyetleri ve süreleri optimize edilir. Özellikle karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren tasarımlarda, sayısal analizler üretim aşamasında karşılaşılabilecek olası problemlerin önlenmesine katkıda bulunarak, üretim sürecinin güvenliğini ve verimliliğini artırır. Dolayısıyla, tasarımdan hemen sonra gerçekleştirilen sayısal analizler hem ürünün kalite kontrolünü sağlamak hem de nihai ürünün performansını garanti altına almak açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Tasarlanan yayların belirli açılarda döndürüldüğünde meydana gelen gerilme ve tork değerleri SEA ile belirlenerek yay tasarımının doğruluğu ve güvenilirliği belirlenmiştir. Ayrıca yay üzerinde en yüksek gerilmenin olduğu bölgeler tespit edilerek, tasarımda olası kırılma veya deformasyon riskleri belirlenmiştir. SEA ile tahmin edilen tork değerleri analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak SEA doğrulaması yapılmıştır. Böylece ileride yapılacak yay tasarımlarında SEA'lar aracılığıyla ağırlık, maliyet veya malzeme seçimi açısından yayların optimize edilmesine böylece deneme ve yanılma olmadan hızlı ve uygun maliyetle tasarlanmasına katkı sağlanmıştır.

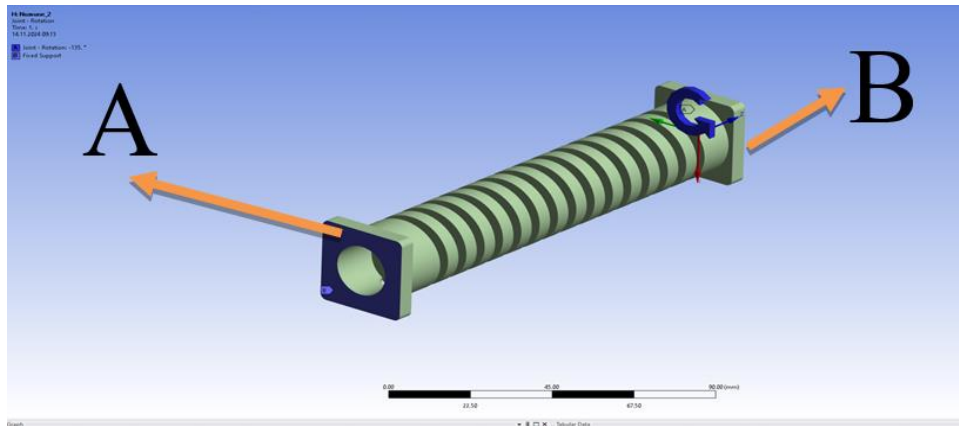
İşlenmiş yayların, yükleme koşulları altında malzemenin akma mukavemetini aşarak plastik deformasyona uğramadan istenilen performansı sağlayabilmesi için, Şekil 3.3'te gösterilen yay tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada tasarlanan işlenmiş yayın katlanır kanat mekanizmasına bağlanırken titreşim etkilerini bastıracak şekilde 45° ön yükleme açısıyla bağlanması ve kanatın dik konumdayken 90° döndürülerek yatay konuma getirildiği düşünülerek toplam çalışma açısının 135° olması düşünülmüştür. Uygun maliyeti ve 1000 MPa üzerinde akma mukavemetiyle savunma ve havacılık sanayinde tercih edilen AISI 630 martenzitik paslanmaz çelik malzemenin de SEA'da tanımlanmasıyla, bu iki temel parametre esas alınarak, Çizelge 3.2'de görülen işlenmiş yay tasarım parametreleri olarak, eksenel kesit uzunluğu (b) için 4 mm ve yay kesit kalınlığı (t) için 5 mm başlangıç değerleriyle simülasyonlara başlanılmıştır. Farklı kesitlerde modellenen yaylara 135° dönme sınır şartı verilerek meydana gelen gerilmeler ve tork değerleri hesaplanmıştır. Malzemeyi akma açısından çok zorlamayacak ve hedeflenen tork değerlerini sağlayacak kesit ölçüleri böylece belirlenmiştir. Yay imalatından sonra

deneylerden ölçülen tork değerleri ile SEA sonuçlarının doğrulanması için imal edilmiş durumdaki kesit ölçüleri ile yaylar tekrar modellenmiş ve ikinci bir SEA çalışması daha yapılmıştır. Bu SEA'lardan elde edilen tork değerleri deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Yayların katı modelleri Autodesk Inventor 2024 yazılımında Şekil 3.9'teki gibi oluşturulmuştur. Bu tasarımların ardından, sonlu elemanlar modellemesi ANSYS yazılımında yapılmıştır. Sınır şart olarak şekil 3.10'da görüldüğü gibi A kısmı sabitlenmiş kare unsurun tabanından ankastre olarak sabitlenmiş ve B ucu için yayların merkez ekseninden geçen Z ekseninde serbest bırakılmış (Şekil 3.11), X ve Y eksenlerinde ise sabitlenmiştir. Malzemenin sonlu elemanlarına ayrılmasında Şekil 3.12'de görüldüğü gibi tetrahedral elemanlar kullanılmıştır ve 150 mm boyundaki yayda 104.000 civarında eleman kullanılmıştır. Malzeme olarak malzeme kütüphanesinden 17-4 PH çeliği seçilmiş ardından modelin B ucuna 135 derece dönme hareketi verilerek statik analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. İşleme yay katı model görünümü

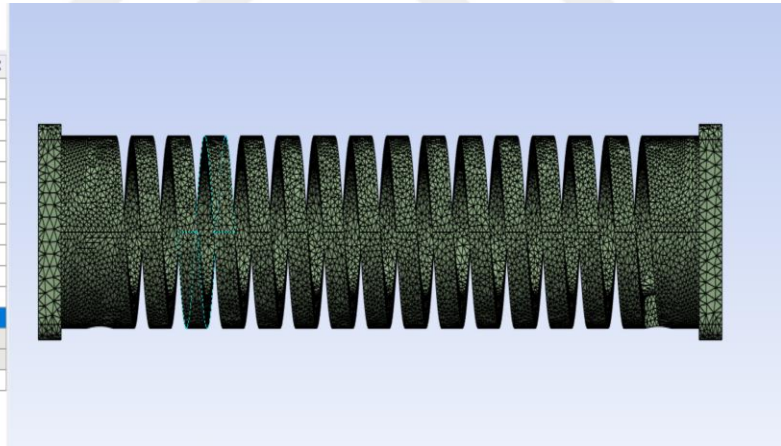


Şekil 3.10. İşlenmiş yay ansys sınır koşulları

Definition	
Connection Type	Body-Ground
Type	General
Primitive Type	None
Translation X	Fixed
Translation Y	Fixed
Translation Z	Free
Rotations	Free Z
Element APDL Name	
Suppressed	No
Reference	
Coordinate System	Reference Coordinate System
Behavior	Rigid
Formulation	MPC
Relaxation Method	No
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Face
Body	Geom-6\Solid2
Initial Position	Unchanged
Behavior	Rigid
Formulation	MPC
Relaxation Method	No
Pinball Region	All

Şekil 3.11. İşleme Yay Rotasyonel Sınır Koşulları

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Quadratic
Element Size	0.8 mm
Sizing	
Quality	
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	191948
Elements	104784
Show Detailed St...	No



Şekil 3.12. Numune meshleme sınır koşulları

3.6 İşlenmiş Yayların Tork Ölçümü

Yayların imalatından sonra on adet işlenmiş yay numunesi, Şekil 3.13'te genel görünümü verilen yerli üretim UVE marka tork ölçer cihazında, "DYJN-101 (300 Nm)" kodlu tork sensörü kullanılarak test edilmiştir. İlgili tork sensörünün teknik özellikleri, Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Test düzeneği genel görünümü

Çizelge 3.3. Tork sensörü özellikleri

Parametre	Birim	Teknik Özellikler	Parametre	Birim	Teknik Özellikler
Hassasiyet	mV/V	1.0~2.0	Sıcaklık hassasiyet katsayısı	$\leq \%F \cdot S / 10^{\circ}C$	± 0.05
Nonlineerlik	$\leq \%F \cdot S$	± 0.3	Çalışma sıcaklığı aralığı	$^{\circ}C$	$-20^{\circ}C \sim +80^{\circ}C$
Gecikme	$\leq \%F \cdot S$	± 0.1	Giriş direnci	Ω	350/700 Ω
Tekrarlanabilirlik	$\leq \%F \cdot S$	± 0.1	Çıkış direnci	Ω	350/700 Ω
Sürünme	$\leq \%F \cdot S / 30min$	± 0.1	Güvenli aşırı yük	$\leq \%F \cdot S$	120% F·S
Sıfır çıktı	$\leq \%F \cdot S$	± 2	Yalıtım direnci	M Ω	$\geq 5000M\Omega(100VDC)$
Sıfır sıcaklık katsayısı	$\leq \%F \cdot S / 10^{\circ}C$	± 0.05	Uyarı voltajı	V	5V-15V

10 adet yay numunesi, tork ölçüm cihazına Şekil 3.14'teki gibi bağlanmıştır. Yayın bir ucu tork sensörü tarafına hazırlanan özel aparat ile bağlanmış, diğer ucundan ise 10 °/s bir hızda döndürülerek 0°-135° aralığında artan açısal tork değerleri ölçülmüştür. Sonra 135°'den yeniden 0°'ye indirilmesiyle döngü tamamlanmıştır. Her döngü için cihaz tarafından belirli açısal pozisyonlarda (derece cinsinden) tork değerleri (Nmm cinsinden) kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler, yayların performans ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek için grafikler halinde analiz edilmiştir. Böylece işlenmiş yaylarının farklı döngülerde gösterdiği tork-açı davranışının incelenmesi ve test sonuçlarının ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olmuştur.

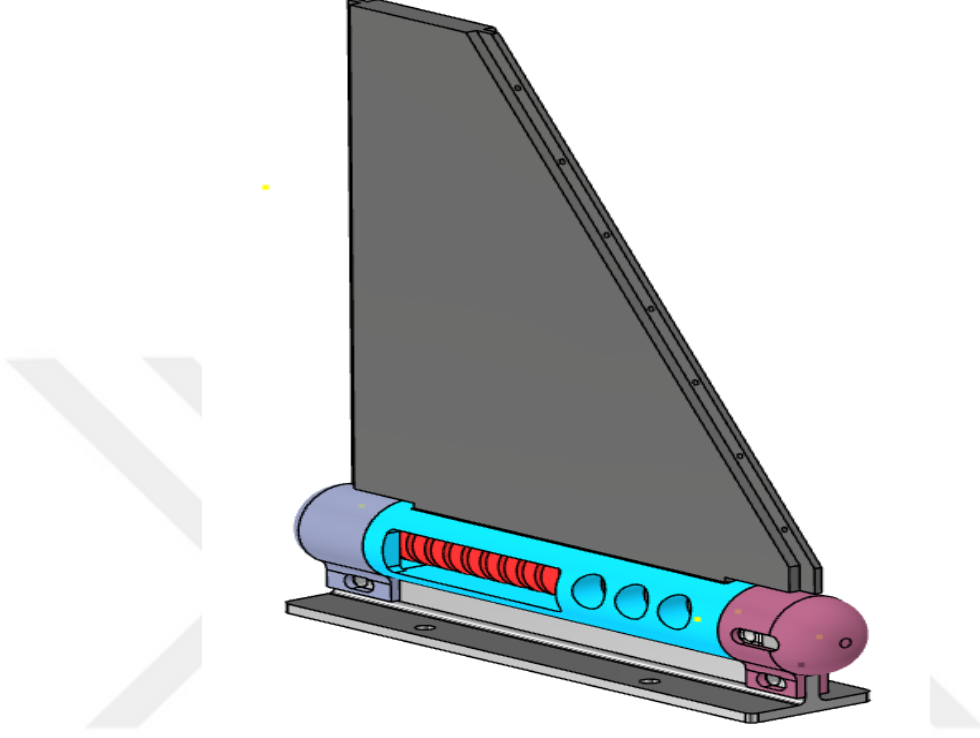


Şekil 3.14. İşlenmiş yayların testlerinin yapılması

3.7 Katlanır Kanat Mekanizması Tasarımı ve Kanat Açılma Testleri

Bu tezde araştırılan işlenmiş yayların öncelikli kullanım hedefi roketlerde kullanılan katlanır kanat mekanizmalarıdır. Bu nedenle üretilen yayların katlanır kanatlardaki çalışma performansının test edilebilmesi için katlanır kanat mekanizması

Şekil 3.15'teki gibi tasarlanmıştır. Katlanır kanat şeklindeki konumunda tam açılmış halde gösterilmiştir. Kurulum için kanat saatin tersi yönünde döndürülmektedir. Katlanır kanat mekanizmasının doğru şekilde çalışabilmesi için istenilen ana isterler şu şekilde belirlenmiştir:



Şekil 3.15. Tasarımı yapılan katlanır kanat mekanizması

1.İster: Kompozit kanat, 0 derece dik konuma geldikten sonra, bu konumun ilerisine geçmemeli ve 0 derece, maksimum açılma sınırı olmalıdır.

2. İster: Kompozit kanat, 0 derece dik konumuna geldikten sonra otomatik olarak kilitlenebilmelidir.

3. İster: Kompozit kanat, 0 derece dik konumda iken, titreşimden kaynaklanabilecek olumsuz etkilerden kaçınmak için mekanizmaya entegre edilen işlenmiş yay, sürekli olarak kompozit kanadın 0 derece dik konumda kalmasını zorlayacak şekilde ön yük uygulamalıdır. Bu amaçla mekanizma ilk kurulurken yay 45° yüklenmiş olarak montaj edilmektedir.

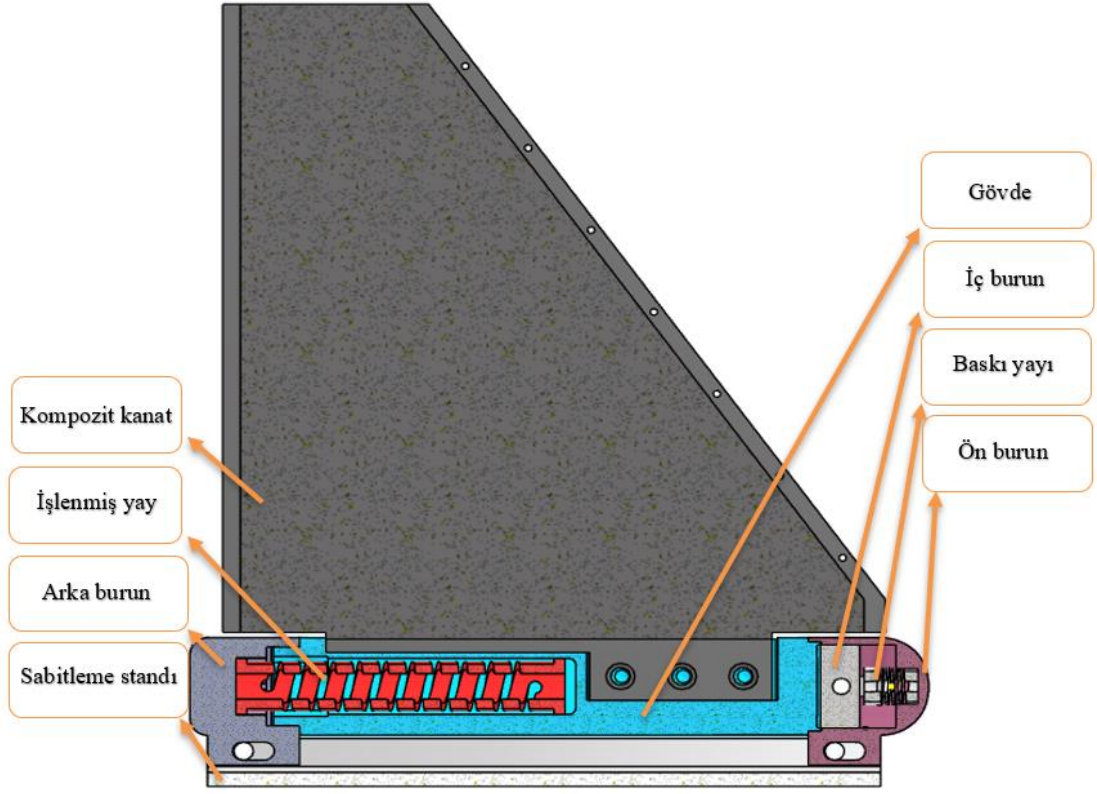
4. İster: Mekanizmada yaşanabilecek teknik aksaklıklardan kaçınmak için işlenmiş yay dışında herhangi bir aktüatör kullanılmamalıdır.

Bu isterler göz önünde bulundurularak, Autodesk Inventor 2024 programı üzerinden tasarlanan katlanır kanat mekanizması, Şekil 3.16'da görüldüğü üzere 7 ana bileşen ve 1 sabitleme bileşeninden oluşmaktadır. Sistem çalışırken kanat gövde ile birlikte dönmektedir. Arka burun dönme miktarını sınırlandırırken ön burun dik konumda kilitlenmesini sağlamaktadır. İşlenmiş yayın bir ucu sabit duran arka buruna kare kesiti ile montaj edilmekte, diğer ucu da gövde içerisindeki kanala takılmaktadır. Mekanizmanın tasarımı tamamlandıktan sonra Şekil 3.17'de görüldüğü gibi parçaları CNC tezgahlarda istenilen toleranslarda üretilmiştir.

1. İster için, Şekil 3.18'te görülen arka burun parçasının içerisine yarım segman kanalı açılmıştır. Şekil 3.19'da görülen gövde parçası üzerindeki kama, yarım segman kanalı içerisinde kompozit kanadın en fazla dik konuma gelmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

2.İster için, Şekil 3.21'te görülen iç burun parçası, Şekil 3.20'te görülen ön burun parçası içinde eksen doğrultusunda lineer hareketle kayar. Bir baskı yayı, iç burun parçasını sürekli olarak gövdeye doğru iter. Kompozit kanat ve dolayısıyla gövde 0 derece dik konumuna geldiğinde, iç burunda bulunan 2 adet kama çıkıntısı, Şekil 6.6'da görülen gövde parçasındaki kama kanalına, baskı yayının oluşturduğu kuvvet etkisiyle girer ve mekanizma, kompozit kanadın 0 derecede kilitlenmesini sağlar.

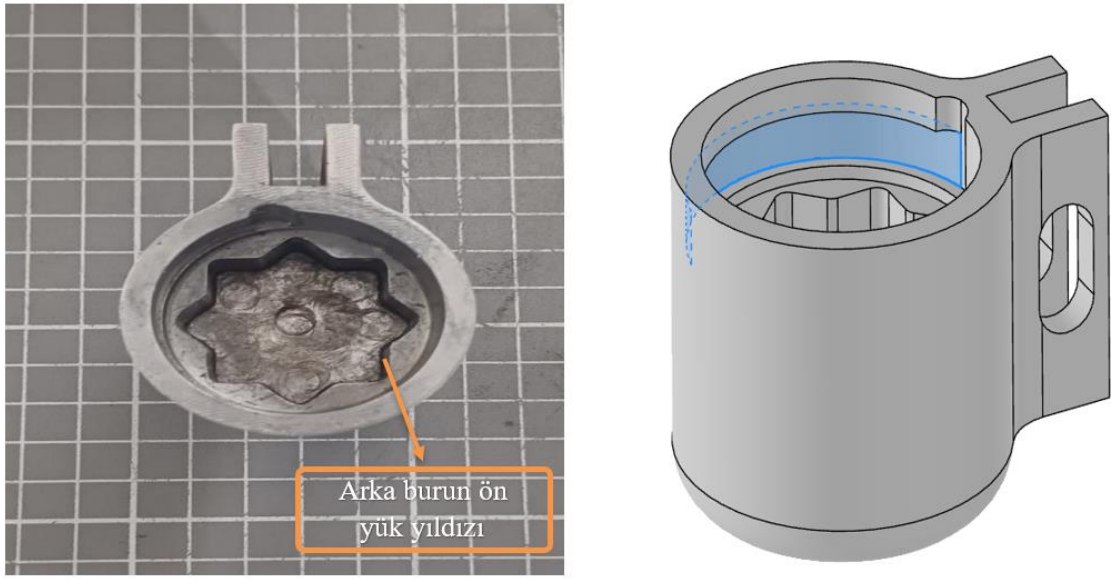
3.İster için, Şekil 3.18'te görülen arka burun parçasına, ön yük yıldızı adı verilen, işlenmiş yayların 45 derecelik açıyla oturabilmesi için birden fazla kanal oluşturulmuştur. Sistem montaj edilirken önce ön burun sabitleme standına bağlanmakta, gövde ön buruna montaj edildikten sonra işlenmiş yay gövde içerisine yerleştirilmekte, sonrasında arka burun ön yük açısı oluşturacak konumda yaya takılmakta ve döndürülerek sabitleme standına bağlanmaktadır. Böylece mekanizma kurulum işlemi gerçekleşmektedir. Bu sayede, kompozit kanat 0 derece dik konumuna açıldığında, ön yük açısında kurulmuş olan işlenmiş yay sayesinde sürekli olarak 0 derece dik konumda kalabilmekte ve titreşim yapması engellenmektedir. Böylece tüm parçaların montajı Şekil 3.23'te görüldüğü gibi yapılarak sistem kanat açılma deneyleri için hazır hale getirilmiştir.



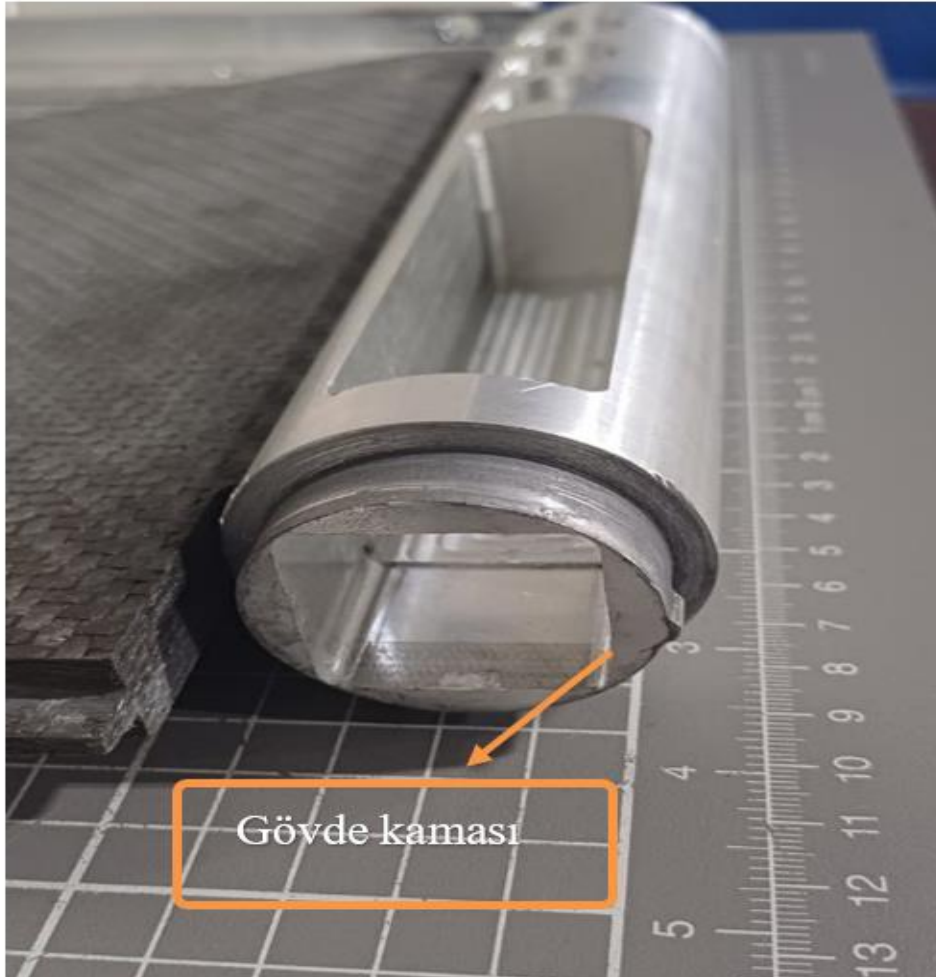
Şekil 3.16 Katlanır kanat mekanizması katı modeli



Şekil 3.17. Katlanır kanat mekanizması üretilmiş hali



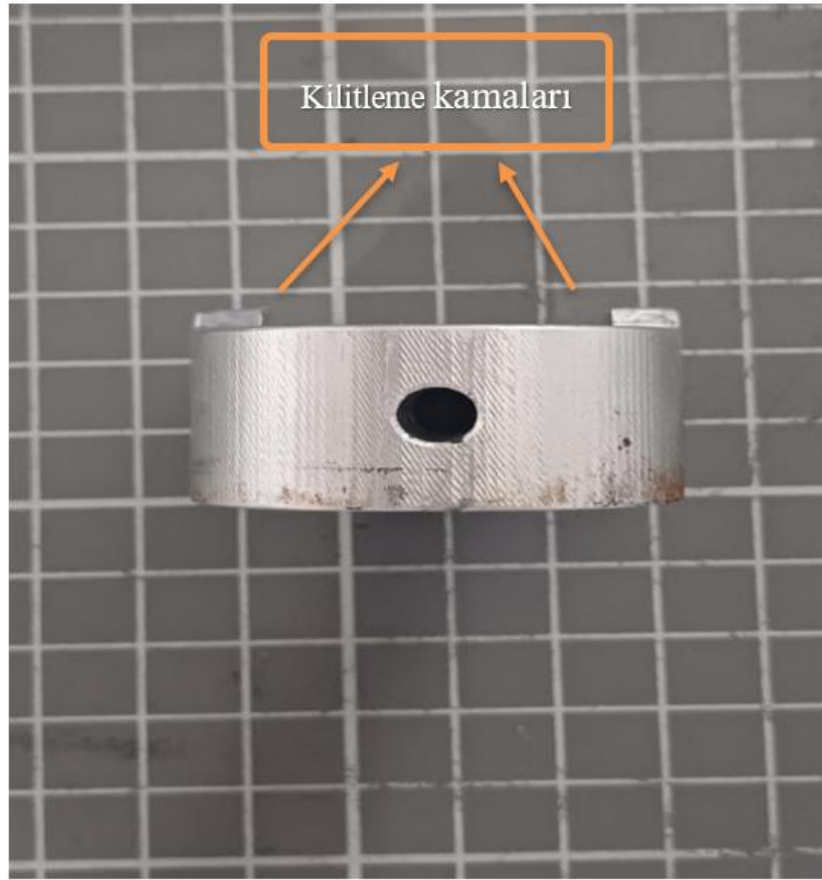
Şekil 3.18. Arka burun



Şekil 3.19. Gövde



Şekil 3.20. Ön burun



Şekil 3.21.İç burun



Şekil 3.22. Gövde



Şekil 3.23. Katlanır kanat mekanizması montajlanmış versiyonu

Katlanır kanat mekanizmasının ölçüleri ve ağırlıkları çalışma performansı açısından önemlidir. Katlanır kanat mekanizmasında, gövde 710 gram, kompozit kanat ise 1190 gram ağırlığa sahip olup toplam döner aksam ağırlığı 1.9 kg'dır. Çizelge 3.4'te, mekanizmalara ait en, boy ve uzunluk ölçüleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.4. Katlanır kanat ağırlıkları ve ölçüleri

Parça isimleri	Yaklaşık prizmatik boyutlar (mm)	Malzeme	Ağırlık (gram)
Arka burun	64x50x50	S235 kalite çelik	543
İşlenmiş yay	28x28x150	AISI 630 paslanmaz çelik	254
Gövde	50x50x250	7075-T6 kalite alüminyum	710
İç burun	44x44x22	7075-T6 kalite alüminyum	215
Baskı yayı	20x20x25	Yay çeliği	21
Ön burun	80x80x55	S235 kalite çelik	263
Kompozit kanat	302x348x16	Kompozit	1190
Sabitlenme standı	70x24x307	7075-T6 kalite alüminyum	1381

Deneyler yapılırken kanat 90° yatay konumuna getirildikten sonra serbest bırakılmıştır. Yayın çalışma performansını değerlendirmek için kanatın dik konuma ulaşma süresi ölçülmüştür. Montajı tamamlanan katlanır kanat mekanizması, Şekil 3.24'te görüldüğü gibi bir mengene aracılığıyla sabitlenmiştir. Açılar doğruluğunu garanti altına almak amacıyla mekanizma elektronik açı ölçer kullanılarak tam dik açığa ayarlanmış ve mengene o konumda sıkılmıştır. Bu işlemin ardından, mekanizmanın alt kısmına yükseklik mastarı yerleştirilerek kanadın tam 90 derece açıyla kapanması sağlanmıştır. İşlenmiş yay, 45 derece ön yükleme açısıyla birlikte mekanizma içerisindeki toplamda 135 derece burulmuş konumda durmaktadır. Şekil 3.24'te gösterilen serbest bırakma kablosu sistemi, kanadı 90 derece açıda rijit bir şekilde tutmakta olup, kablonun kesilmesiyle mekanizma serbest bırakılarak 0 derece dik konumuna ulaşmaktadır.



Şekil 3.24 Katlanır kanat test standı

Katlanır kanat açılma deneylerinde dört farklı rijitlik katsayısına sahip olacak şekilde üretilen işlenmiş yay kullanılmıştır. Katlanır kanat mekanizması yukarıda anlatıldığı gibi deney standına bağlandıktan sonra, her işlenmiş yay için kanadın 90 derece ile 0 derece arasındaki dönüş hızları ölçülmüştür. Bu ölçümler için, Şekil 3.25'te görülen Chronos marka ve CH14-1.0-32C model, 1280x1024 çözünürlükte 1057 FPS'ye kadar veya azaltılmış çözünürlüklerde 38.500 FPS'ye kadar çok yüksek kare hızlarında video kaydına izin veren yüksek hızlı bir kamera kullanılmıştır. Deney çekimleri 1057 FPS'de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen videolar, video oynatma uygulaması üzerinden incelenerek, 90 derece ile 0 derece arasındaki dönüş süreleri milisaniye (ms) cinsinden ölçülmüştür.

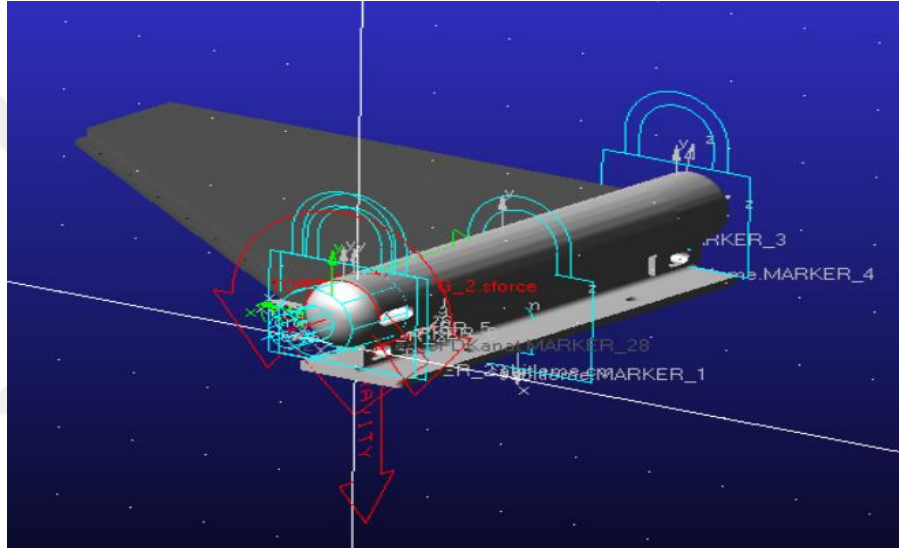


Şekil 3.25 CH14-1.0-32C Yüksek hızlı kamera

3.8. Katlanır Kanadın MSC ADAMS Programı ile Açılma Sürelerinin Ölçülmesi

Mekanik sistemlerin üretilmeden ve deneysel testlere tabi tutulmadan önce sayısal yöntemlerle gerçekleştirilen kinetik ve dinamik analizler, mekanizmaların kabul edilen isterler aralığında çalışıp çalışmadığının kontrolü açısından büyük öneme sahiptir. Dinamik analizler yayın kuvvet özellikleri dikkate alınarak mekanizmanın zamanla değişen hareket ve kuvvet davranışlarını incelemek, sistemi üzerindeki momentler, yay kuvvetleri ve sürtünme etkileri ile simüle etmek için yapılmıştır. Bu açıdan dinamik analizler, zaman ve maliyet kazancı sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tezde, farklı tork değerlerine sahip işlenmiş yayların etkisi ile açılan

katlanır kanatın açılma simülasyonu MSC ADAMS programı aracılığıyla yapılmıştır. Sonuçta, dört farklı tork değerine sahip işlenmiş yayın, kanadın 90 dereceden 0 dereceye gelme sürelerine etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Autodesk Inventor programında katı modellemesi yapılan katlanır kanat mekanizmasının geometrik modeli MSC ADAMS programına aktarıldıktan sonra Şekil 3.26'da görüldüğü gibi sabitleme plakası, arka burun ve ön burun için sabit olarak, gövdeye ise merkezinden geçen eksenini etrafında dönme serbestisi verilerek tüm sınır şartlar tanımlanmıştır. Ayrıca yerçekimi tanımı da yapılmıştır. Şekil 3.27, 3.28 ve 3.29'da sırasıyla mafsallar arası sürtünme, çözüm aralıkları ve yaylara ait rijitlik sayısı ve ön yük değerlerinin tanımlanmasına dair örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Adams sınır şartları genel görünümü

Contact Name	CONTACT_2
Contact Type	Solid to Solid
I Solid(s)	SOLID1
J Solid(s)	SOLID4
☐ Force Display Red	
Normal Force	Restitution
Penalty	1E+5
Restitution Coefficient	1
☐ Augmented Lagrangian	
Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.2
Dynamic Coefficient	0.16
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0

Şekil 3.27 Statik ve dinamik sürtünme tanımı

Normal Force	Restitution
Penalty	1E+5
Restitution Coefficient	1

Şekil 3.28. Çözüm aralıkları tanımı

Name	TORSION_SPRING_2
Action Body	ortaB
Reaction Body	ground
Stiffness and Damping:	
Stiffness Coefficient	1.0955E+04(newton-mm/deg))
No Damping	
Angle and Preload:	
Preload	0.0
Angle at Preload	135.0

Şekil 3.29. Yayın rijitlik katsayısı tanımı

Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.2
Dynamic Coefficient	0.16
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0

Şekil 3.30. Ön yük tanımı

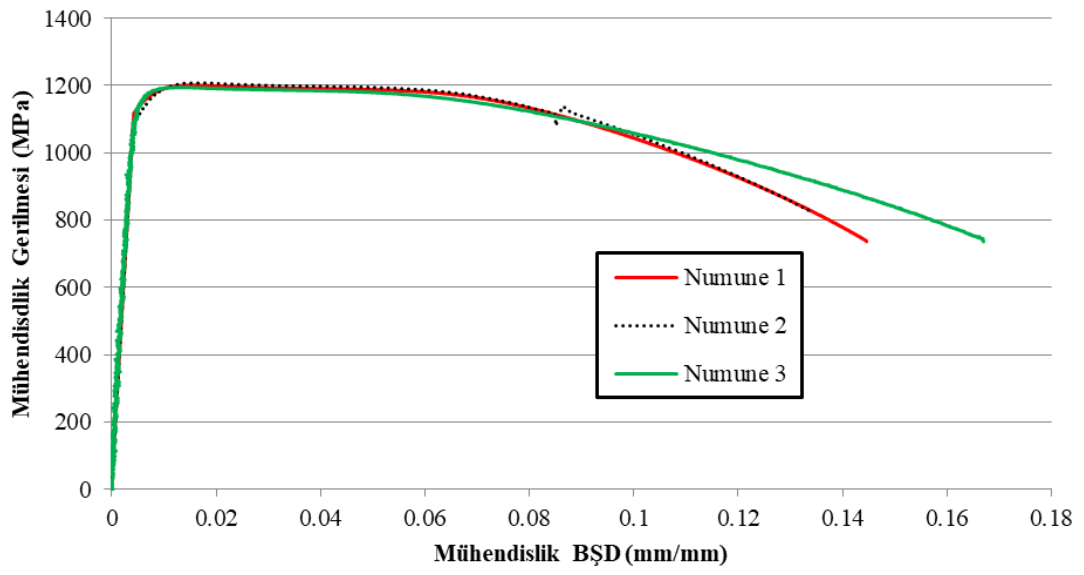
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Çekme Deneyi Sonuçları

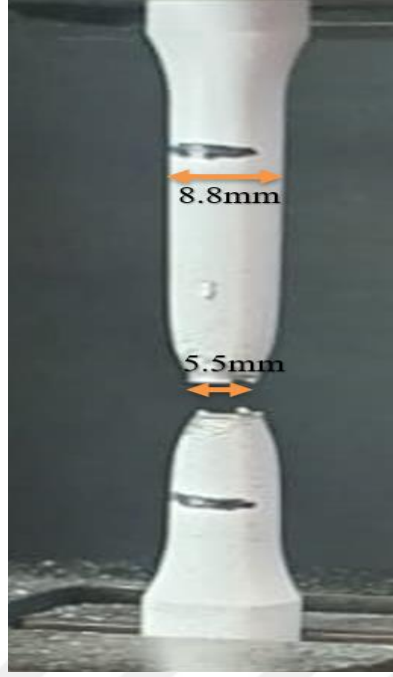
İşlenmiş yay imalatında kullanılan AISI 630 paslanmaz çelik malzemeye uygulanan üç tekrarlı çekme testine (Şekil 4.1) ait mühendislik gerilmesi ve mühendislik Birim Şekil Değişimi (BŞD) sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. KTÜN’de yapılan ve elastiklik modülü düşük çıkan Numune 1 ve 2 isimli deneylerin sonuçları, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde yapılan Numune 3 isimli deney sonucuna eşit olacak şekilde düzeltilerek çizilmiştir. Her ne kadar iki farklı üniversitedeki çekme deney cihazından elde edilen sonuçlarda elastiklik modülleri birbirinden farklı olsa da malzemenin mekanik özellikleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Sadece yüzde uzama değeri Numune 3’te diğerlerine göre %3 kadar daha fazla çıkmıştır. Malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 4.1’de görülmektedir. Malzemenin akma ve çekme mukavemetleri tüm tekrarlarda birbirine oldukça yakın olup akma mukavemeti 1098 ± 2 MPa, çekme mukavemeti ise 1201 ± 9 MPa olarak elde edilmiştir. Çekme mukavemetine yaklaşık olarak %5 uzama değerinde ulaşılmıştır. Malzemenin toplam yüzde uzama değeri ise ortalama olarak %14,8’dir. Buradan malzemenin az miktarda homojen olarak uzadıktan sonra boyunlaşmanın başladığı ve malzemenin çoğunlukla boyun bölgesinde homojen olmayan şekilde şekil değiştirdiği anlaşılmıştır. Bu durum Şekil 4,3’te görüldüğü gibi numune üzerinde de gözlemlenmiştir. Malzemenin ölçüm bölgesinin çapı boyun dışında 9 mm’den 8.80 mm’ye azalırken boyun bölgesinde hasar çapı 5.50 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1. Çekme testinden genel görünüm



Şekil 4.2. AISI 630 malzemeye ait çekme deneyi sonuçları



Şekil 4.3. Çekme numunesi boyun dışı ve hasar tespit çapı ölçüleri

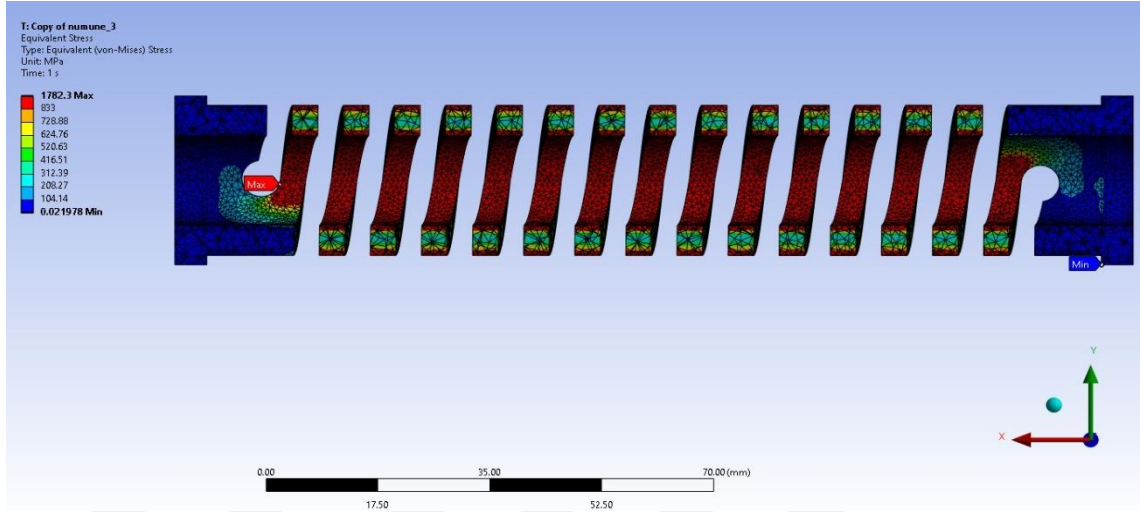
Çizelge 4.1. Çekme testi numunesi mekanik özellikleri

Özellik	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama	Standart Sapma
Akma Dayanımı (MPa)	1098	1100	1099	1099	0,816
Çekme Dayanımı (MPa)	1209	1201	1195	1201,67	5,73
Yüzde Uzama (%)	%14,4	%13,3	%16,7	%14,8	1,42

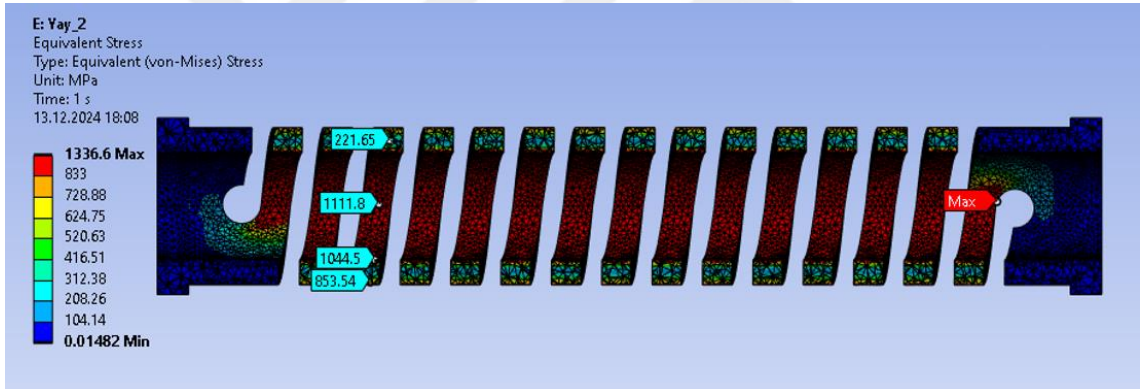
4.2. İşlenmiş Yayların SEA ile Tasarımı ve Tork Değerlerinin Bulunması

ANSYS programından işlenmiş yaya 135° rotasyon uygulandıktan sonra eksenel kesit uzunluğu $b=4$ mm ve kesit kalınlığı $t=5$ mm olan yay için elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 1700 MPa akma mukavemetini aşan von Mises gerilmeleri tespit edilmiştir. Ardından, Şekil 4.5'teki örneğinde görüldüğü gibi deneme-yanılma yöntemiyle işlenmiş yayın 1100 MPa akma değerinin aşılmasına

Neden olmayacak farklı kesit ölçüleri tespit edilmiştir. Böylece birbirinden farklı 4 farklı yay için tasarım parametreleri seçilmiş ve nihai tasarım ölçüleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 4.4. bxt=4x5 mm olan kesitli yayda 135° burulma sonucunda meydana gelen gerilmeler.



Şekil 4.5. Yay numunesi 2’de bxt=4,65x3,97 mm olan kesitli yayda 135° burulma sonucunda meydana gelen gerilmeler.

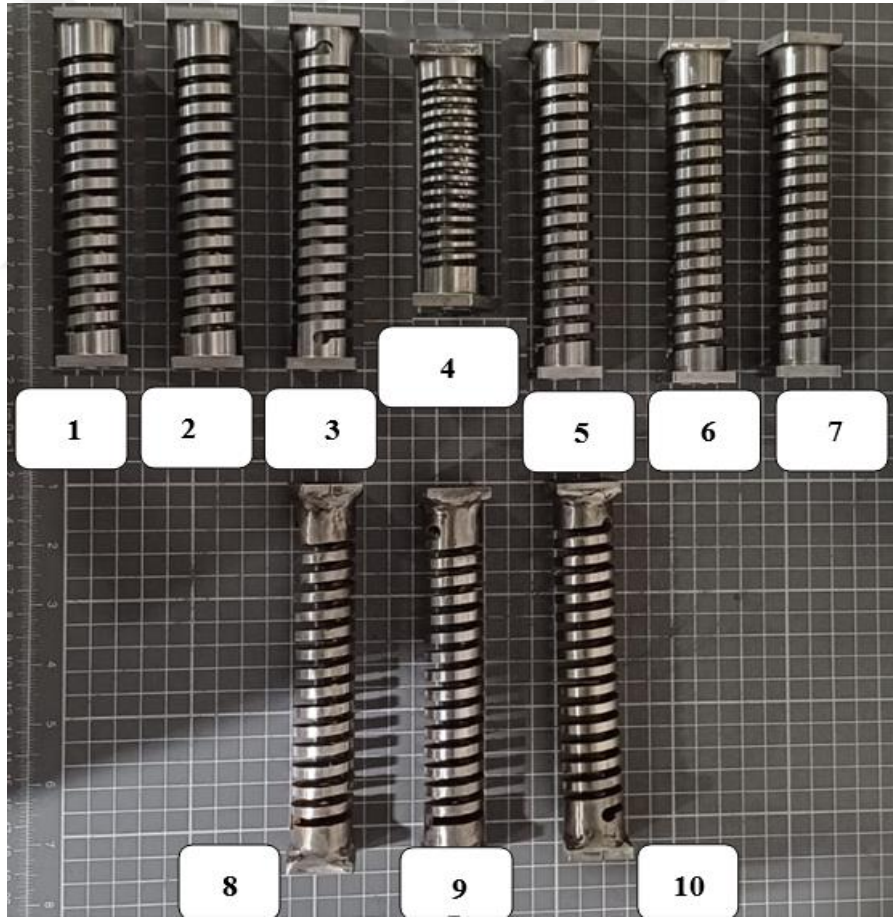
4.3. Yay İmalatı Sonuçları

SEA'lar yardımıyla Çizelge 3.2'de verilen ölçülerde tasarlanan işlenmiş yaylar Şekil 4.6'te gösterildiği gibi imal edilmiştir. Yayların ölçüleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 4.7'de sunulmuştur. 1'den 7'ye kadar numaralandırılmış numuneler CNC tezgahında üretilirken, Şekil 4.7'te gösterilen 8, 9 ve 10 numaralı numuneler profil lazer kesim teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. CNC tezgâhta üretilcek işlenmiş yay numunelerinin üretimi için iki farklı üreticiyle iş birliği yapılmıştır. Bu kapsamda, 1, 2, 3 ve 4 numaralı numunelerin üretimi birinci üretici tarafından gerçekleştirilmiş olup, 5, 6 ve 7 numaralı numunelerin üretimi ise ikinci üretici tarafından üstlenilmiştir. Bu numunelerden ilk dördünün üretim sürecinde, imalatçı kaynaklı hatalar, helislerin neden olduğu esnemeler, malzemenin yüksek akma mukavemetine sahip olmasının getirdiği işleme zorlukları ve takım esnemeleri gibi üretimden kaynaklanan zorluklar sebebiyle tasarlanan ölçülerden %18'e varan oranda sapmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle 5x4 mm kesiti ile tasarlanan yaylarda kesit ölçüsü 1. ve 2. numunede ortalama olarak 4,53 x 3,94 mm olarak, 5x2,5 mm olarak tasarlanan yay 3. numunede 4,65x2,48 mm olarak, 2,5x2,5 mm olarak tasarlanan yay ise 4. numune olarak 2,05 x 2,75 mm olarak üretilmiştir. İlk üreticinin ürettiği yaylarda ölçülerde sapma ve değişkenlik fazla olduğu için ikinci üreticiye ilk üreticinin ürettiği yaylarla da karşılaştırabilmek amacıyla aksel kesit uzunluk değeri $b=4,5$ mm ve kesit kalınlığı değeri $t=4$ mm olacak şekilde üç adet daha yay ürettirilmiştir. Bu yaylar Şekil 4.6 ve Çizelge 4.2'de 5, 6 ve 7 numara ile gösterilmiştir. Bu yaylar için üretimden elde edilen değerler $b \times t$ için ortalama olarak 4,51x4,02 mm olarak ölçülmüştür. Ölçülerin anma boyutundan farkı üç parça için ortalama olarak %0,6'ya denk gelecek şekilde 0,028 mm olmuştur. İkinci üreticide yay üretilirken içerisinde sıkı şekilde kestamit malzeme montaj edildikten sonra helisel kanalların işlenmesi hedeflenen boyutların en fazla 0,05 mm tolerans ile elde edilmesini sağlamıştır. Böylece işlenmiş yayların yüksek bir tekrarlanabilirlikte üretilbildiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. İşlenmiş yay test numuneleri ölçüleri

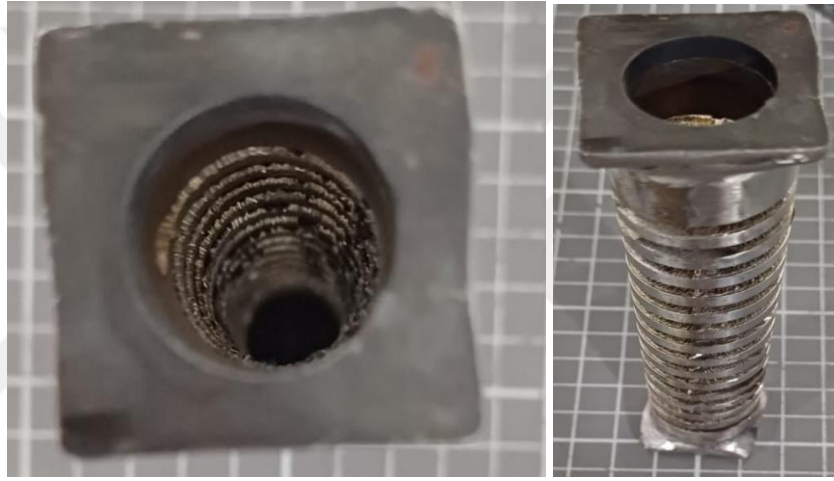
Deney Numunesi	B-(Eksenel Kesit Uzunluğu) (mm)	T-(Kesit Kalınlığı) (mm)	N_a -Sarım Sayısı	Dış Çap(mm)	İç Çap(mm)	D_m -Ortalama Çap(mm)
1	4,42	3,905	14	24,96	17,15	21,055
2	4,65	3,97	14	24,96	17,02	20,99
3	4,65	2,48	14	24,96	20	22,48
4	2,05	2,75	14	25	19,5	22,25
5	4,47	4,025	14	25	16,95	20,975
6	4,55	4,017	14	25	16,96	20,983
7	4,53	4,02	14	25	16,96	20,98
8	4,3 - OÖD*	3,975	14	24,9	16,95	20,925
9	4,3 - OÖD	3,96	14	24,9	16,98	20,94
10	4,3 - OÖD	3,965	14	24,9	16,97	20,935

OÖD: Ortalama ölçü değeri



Şekil 4.6. İşleme yay test numuneleri

Daha hızlı ve uygun maliyetli bir imalat yöntemi olarak profil lazer kesim (PLK) yönteminin yay performansına etkisini araştırmak amacıyla yine 4,5 x 4 mm kesitinde 3 adet daha deney numunesi profil lazer kesim yöntemiyle üretilmiştir. Bu yayların ölçüm sonuçları Çizelge 4.2’de 8, 9 ve 10 numara ile paylaşılmıştır. Lazer kesimde kesit kenarlarında Şekil 4.7’te görüldüğü gibi cüruf olduğu için kesitlerin kumpas ile ölçümünde özellikle eksenel kesit uzunluğunda belirsizlik fazla olmuştur. Eksenel kesit uzunluğu değeri için $b=4,3$ mm ve kesit kalınlığı değeri için $t=3,96$ mm olduğu belirlenmiştir. Böylece lazer kesimde eksenel kesit uzunluğu 0,2 mm hata ile elde edilirken, kesit kalınlığı 0,04 mm farkla imal edilebilmiştir.



Şekil 4.7. PLK teknolojisi kullanılarak üretilmiş yay numunelerinde meydana gelen cüruf

4.4. Yayların Tork Değerlerinin Analitik Hesaplanması

Çizelge 4.2’de listelenen 10 adet işlenmiş yay numunesinin yay sabitleri ve 135° burulması durumunda sağlayacağı tork değerleri, Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. İşlenmiş yayların yay sabiti değerleri ve 135 ° burulmaları durumundaki tork değerlerinin analitik hesap sonuçları

Deney numunesi	Kesit ölçüsü bxt (mm)	Yay Sabiti (N · m/°)	Tork değeri (N · m)
1	4,42 × 3,905	0,0781	10,55
2	4,65 × 3,97	0,0866	11,70
3	4,65 × 2,48	0,0197	2,66
4	2,05 × 2,75	0,0120	1,62
5	4,47 × 4,025	0,0869	11,73
6	4,55 × 4,017	0,0878	11,86
7	4,53 × 4,02	0,0877	11,84
8	4,3 × 3,975	0,0807	10,89
9	4,3 × 3,96	0,0797	10,76
10	4,3 × 3,965	0,0800	10,80

4.5. Yayların Tork Değerlerinin Deneysel Ölçümü

Üretimi tamamlanan her bir işlenmiş yay numunesinde ilk imalatçının ürettiği ilk 4 yay iki çevrim, ikinci imalatçının ürettiği 5, 6 ve 7. numuneler ile lazer kesimle üretilen 8, 9 ve 10. Numuneler beş çevrim olacak şekilde deneylere tabi tutulmuştur. 135° açıda deneysel olarak ölçülen maksimum tork değerleri Çizelge 4.4'te verilmiş olup çizelgede analitik olarak hesaplanan tork değerleri ile kıyaslanarak aradaki fark hesaplanmıştır. Buna göre 10 adet yaydan torku en az olan 4. yay hariç diğerleri için analitik olarak hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen tork değerleri birbirine oldukça yakındır. 4. yayda tork değerinin az olması nedeniyle deneysel belirsizliğin katkısıyla deney ve analitik sonuçları arasındaki fark oranca büyük çıkmıştır. Bu sonucun göz ardı edilmesiyle analitik ve deneysel arasındaki fark ortalama olarak %3,2 olmuştur.

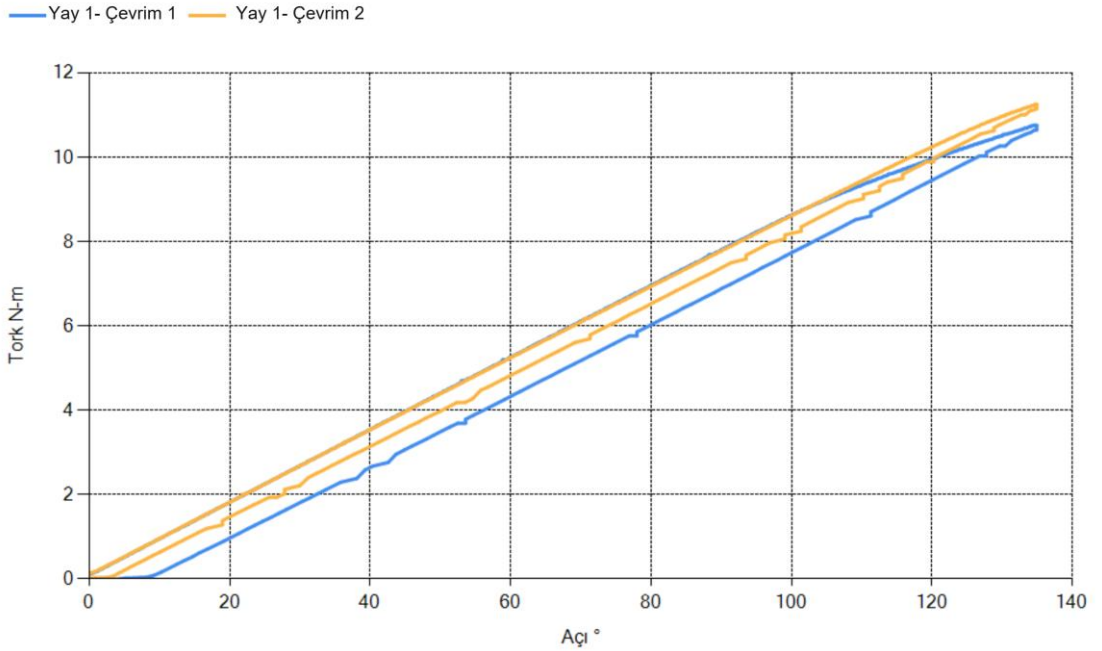
İlk imalatçının ürettiği iki çevrimli olarak ölçülen 1. yaya ait sonuçlar Şekil 4.8, ikinci imalatçının ürettiği beş çevrimli olarak ölçülen 5. yaya ait sonuçlar Şekil 4.9 ve lazer kesimle üretilen 8. yaya ait sonuçlar Şekil 4.10'de verilmiştir. Her bir çevrimde ölçülen maksimum tork değerleri de 1., 5. ve 8. yaylar için sırasıyla Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Diğer yayların ölçüm sonuçları ve maksimum tork değerleri Ek'te paylaşılmıştır. Şekil 4.8'da ilk üreticinin üretmiş olduğu 1. Yayın tork ölçüm sonucuna göre ilk çevrimde tork ve açı arasında oranın 110° civarından sonra lineerlikten saptığı görülmektedir. Bu durumda yay malzemesinin 110°'den sonra

aktığı sonucuna ulaşılmıştır. İlk çevrimde yük boşaltılırken yapılan ölçümde tork sıfıra indiğinde yayın 10° kadar şekil değiştirmiş olduğu yani ilk konumuna yükün boşaltılmasıyla geri dönemediği görülmektedir. Yay 0° konumuna test cihazında getirildikten sonra ikinci çevrimde yüklenmiş ve bu yüklemede lineerlik 135° 'ye kadar devam etmiştir. Bu davranışın sebebi ilk çevrimde malzeme aktıktan sonra deformasyon sertleşmesi ile malzemenin akma mukavemetinin yükselmesi, bunun sonucunda da ikinci çevrimde akma meydana gelmeden son açısı değerine kadar malzemenin esneyebilmesidir. 2. Çevrimde yük boşaltıldığında yay üzerinde kalıcı şekil değişiminin azaldığı ancak halen olduğu görülmektedir. Şekil 4.9'de verilen 5. yayla ilgili sonuca göre yay 135° konuma kadar her bir çevrim için akmadan yüklenebilmiş ve yükleme eğrileri tam olarak üst üste çıkmıştır. Yük boşaltıldığında yay 0° ilk konumuna dönebilmiştir. Böylece yay kararlı bir şekilde çalışabilmiştir. 135° konumunda ölçülen maksimum tork değeri ortalama olarak $11,94 \pm 0,13$ Nm hesaplanmıştır. $0,13$ Nm standart sapma değeri %95 güvenirlilikle verilmiş olup akma meydana gelmeyen bir numunenin tekrarlı ölçümündeki değerleri vermesi açısından tork ölçme cihazının tekrarlanabilirliğinin göstergesidir. Buna göre deneylerin tekrarlanabilirliği $(0,13/11,94) \cdot 100 = \%1$ değerinde bulunmuştur. Benzer özellikteki 6. ve 7. yaylar da benzer bir davranış sergilemiştir (Ek Şekil 1.6 ve Şekil 1.7). 2. Üretici tarafından imal edilen yaylarda ortalama tork **$12,12 \pm 0,4$ Nm** hesaplanmış olup yayların standart bir şekilde yüksek tekrarlanabilirlikle üretilbildiği ve aynı karakteristiği sağladığı gösterilmiştir. Şekil 4.11'de lazer profil kesim ile üretilen 8. yayla ilgili sonucuna göre yayla malzemesinde ilk çevrimde 105° konuma gelindiğinde akma meydana gelmiştir. Malzeme 135° konuma kadar yüklenirken deformasyon sertleşmesi ile birlikte tork değerinin arttığı, sonraki çevrimlerde ise artan mukavemetle birlikte akma yaşanmadan lineer hareket ile yayla çalışabildiği görülmüştür. İlk çevrimde tork değeri $10,16$ Nm iken diğer çevrimlerde ortalama olarak $10,6 \pm 0,24$ Nm tork değeri ölçülmüştür. Lazer kesim ile üretilen 8. ve 9. numunelerde de benzer davranış görülmüştür (Ek Şekil 1.8 ve Şekil 1.9). Lazerle kesilen numunelerin ortalama torku **$10,50 \pm 0,34$ Nm** olarak ölçülmüştür. Talaşlı imalat ile üretilen yüksek tekrarlanabilirlikteki yaylar ile kıyaslandığında tork değeri $1,62$ Nm azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçtan lazerle kesme işlemi sırasında, kesilen bölgenin etrafındaki bölgeye ısının yayılmasıyla ısı tesiri altındaki bölge oluşumuna sebep olmuştur. Bu bölgede ise akma gerilmesinde düşüş meydana gelmiştir. AISI 630 çelik malzeme H925 temperi durumundadır. Bu temper durumu malzemenin çözeltiye alındıktan sonra 496°C 'de yaşlandırılmış halini belirtir. Lazerle kesme sırasında ısı

tesiri altındaki bölgede yaşlandırma ile çökelp mukavemet artışı sağlayan çökeltilerin tekrar çözündüğü bunun da mukavemeti azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Her ne kadar mukavemetteki azalma ile tork değeri bir miktar düşse de ilk çevrimden sonra yaylar kararlı bir şekilde çalışabilmiştir. İşlenmiş yayların talaşlı imalattaki üretim süresi 5,5 saat iken lazer profil kesme yönteminde 1,5 saattir. Üretim maliyetinde lazer profil kesme %500 oranında düşüş meydana getirmiştir. Lazer profil kesme ile elde edilen tork değerleri işlenmiş yayların lazer profil kesim yöntemiyle üretilmesinin daha uygun olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4. Yayların 135° burulmasından sonra oluşan tork değerleri : analitik ve deneysel sonuçlar

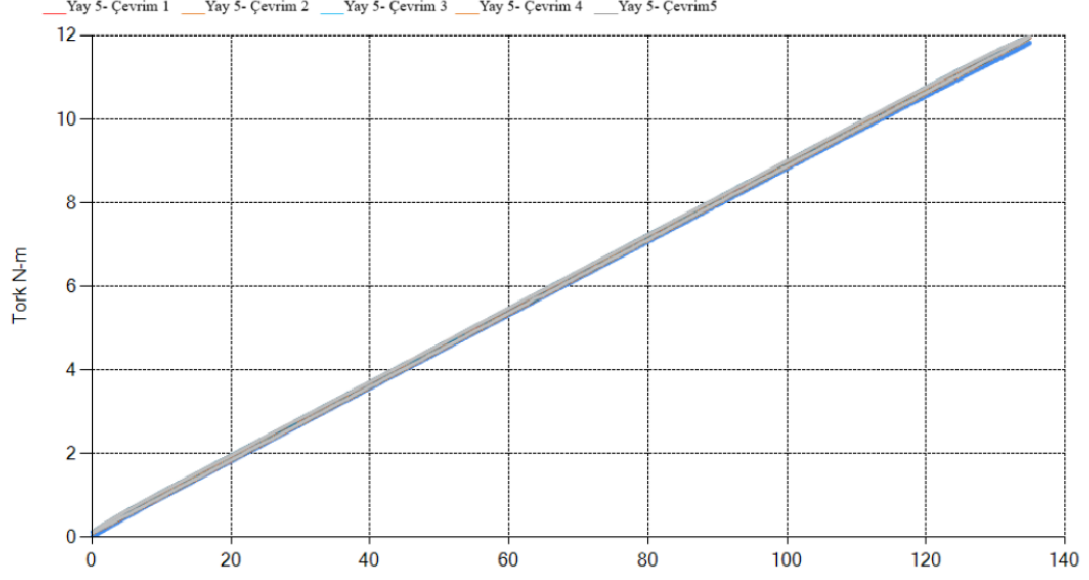
Deney numunesi	Kesit ölçüsü bxt (mm)	Analitik sonuçlar (N · m/°)	Deneysel sonuçlar (N · m/°)	Fark (%)
1	4,42×3,905	10,550	10,955	3,84
2	4,65 × 3,97	11,700	11,370	2,90
3	4,65 × 2,48	2,660	2,515	5,77
4	2,05 × 2,75	1,620	1,310	23.66
5	4,47x4,025	11,730	11,938	1,74
6	4,55x4,017	11,860	12,344	3,92
7	4,53 × 4,02	11,840	12,078	1,97
8	4,3 × 3,975	10,890	10,526	3,46
9	4,3 × 3,96	10,760	10,188	5,61
10	4,3 × 3,965	10,800	10,500	2,86
Ortalama fark				%5,57



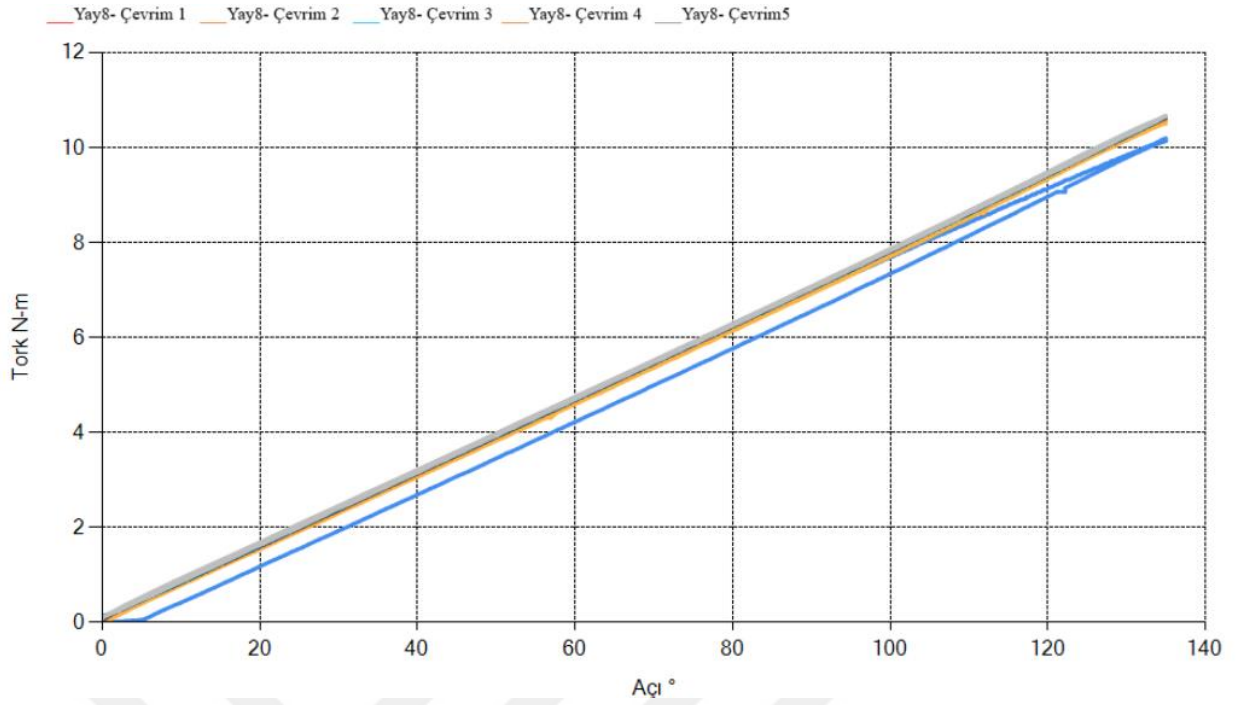
Şekil 4.8. İlk üreticinin ürettiği 1. yaya ait deneysel tork ölçüm sonuçları

Çizelge 4.5. İlk üreticinin ürettiği 1. yaya ait deneysel tork ölçümlerinin maksimum değerleri

Numune	Açı (°)	Tork (N.m)
Yay 1 / Çevrim 1	135	10,71
Yay 1 / Çevrim 2	135	11,2
Ortalama Tork		10,955

**Şekil 4.9.** İkinci üreticinin ürettiği 5. Yaya ait deneysel tork ölçüm sonuçları**Çizelge 4.6.** İkinci üreticinin ürettiği 5. yaya ait deneysel tork ölçümlerinin maksimum değerleri

Numune/Test sayısı	Açı (°)	Tork (N.m)
Yay1 / Çevrim 1	135	11,82
Yay1 / Çevrim 2	135	11,95
Yay1 / Çevrim 3	135	11,97
Yay1 / Çevrim 4	135	11,97
Yay1 / Çevrim 5	135	11,98
Ortalama Tork		11,94 ± 0,13



Şekil 4.10. Lazer kesim ile üretilen 8. yaya ait deneysel tork ölçüm sonuçları

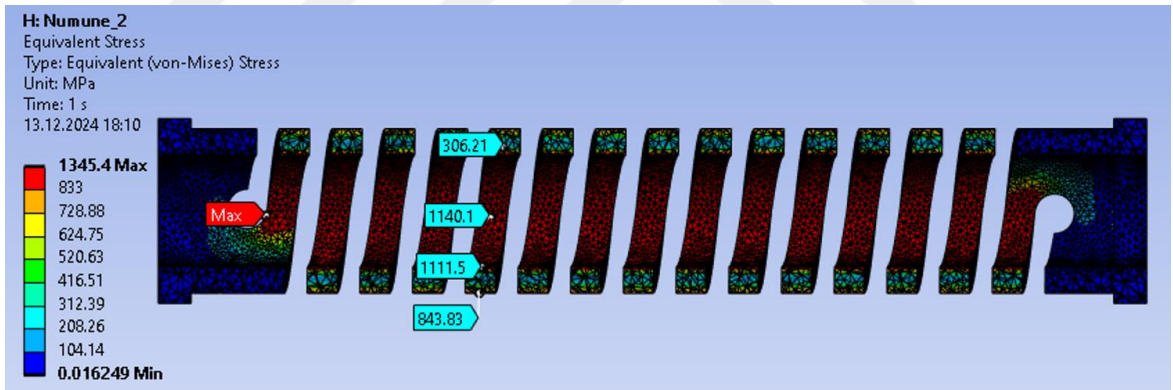
Çizelge 4.7. Lazer kesim ile üretilen 8. yaya ait deneysel tork ölçümlerinin maksimum değerleri

Numune	Açı (°)	Tork (N.m)
Yay 8 / Çevrim 1	135	10,16
Yay 8 / Çevrim 2	135	10,53
Yay 8 / Çevrim 3	135	10,63
Yay 8 / Çevrim 4	135	10,65
Yay 8 / Çevrim 5	135	10,66
Ortalama Tork		10,52 ± 0,42

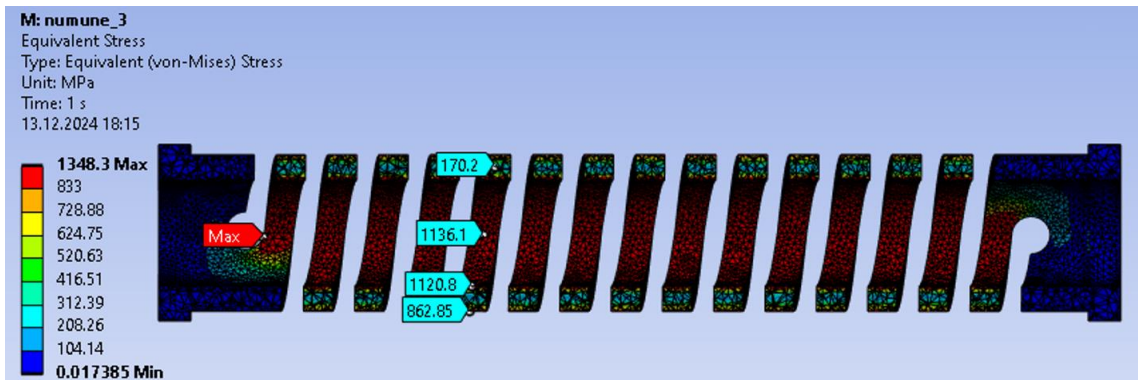
4.6. İşlenmiş Yayların Tork Değerlerinin SEA ile Tahmini

Bölüm 3.3’de ayrıntılı şekilde açıklandığı üzere, işlenmiş yayların üretiminde karşılaşılan zorluklar nedeniyle tasarlanan üretim ölçülerinden sapmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle SEA’lardan yayların tork değerlerinin elde edebilmek için imal edildiği ölçülerıyla yayların katı modelleri Autodesk Inventor programında yeniden oluşturulmuş ve analiz edilmek üzere ANSYS yazılımına aktarılmıştır.

Her bir yay numunesinin modellenmesinde sonuçların eleman boyutundan bağımsız hale geldiği eleman sayısı olarak 100.000 civarında tetrahedral eleman kullanılmıştır. Analizler sonucunda hem 135° burulma sonucundaki gerilme değerleri hem de tork değerleri belirlenmiştir. Yapılan örnek bir analizin numune 2’ye ait olan sonucu Şekil 4.11’de, numune 3’e ait olan sonucu Şekil 4.12’de gösterilmiş olup diğer yayların analizleri EK 1’te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre maksimum von Mises gerilme değeri helislerin bitimlerinde meydana gelmiştir. Yayların iç yüzeylerindeki gerilme dış yüzeylerine göre daha fazla olmuş, merkezinde ise en az gerilme değeri meydana gelmiştir.



Şekil 4.11. Numune 2’nin SEA’dan elde edilen von Mises gerilme dağılımı



Şekil 4.12. Numune 3’ün SEA’dan elde edilen von Mises gerilme dağılımı

Analizlerden hesaplanan tork değerleri, daha önce her bir yay için analitik olarak hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen tork değerleriyle Çizelge 4.9'da karşılaştırılmıştır. Analitik olarak elde edilen yay katsayısı değerleri ile ANSYS sonuçları arasında 5,69 standart sapma, numerik ve deneysel sonuçlar arasında ise 2.24 standart sapma tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, işlenmiş yayların tasarımında sonlu elemanlar analiz (FEA) yönteminin güvenilirliğini ortaya koymuştur.

Çizelge 4.8. İmalatı yapılmış olan işlenmiş yayların SEA'dan elde edilen gerilme değerleri ve 135° burulmadaki nümerik tork değeri

Deney numunesi	Maximum gerilme (MPa)	Nümerik Tork Değeri (Nm)
1	941,42	10,228
2	1336,6	11,251
3	883	2,699
4	883	1,301
5	1367,5	11,748
6	1345,4	11,886
7	1348,3	11,861
8	1328,3	10,907
9	1319,4	10,776
10	1323,5	10,823

Çizelge 4.9. İşlenmiş yayların 135 ° burulmaları durumundaki tork değerlerinin nümerik, analitik ve deneysel karşılaştırması

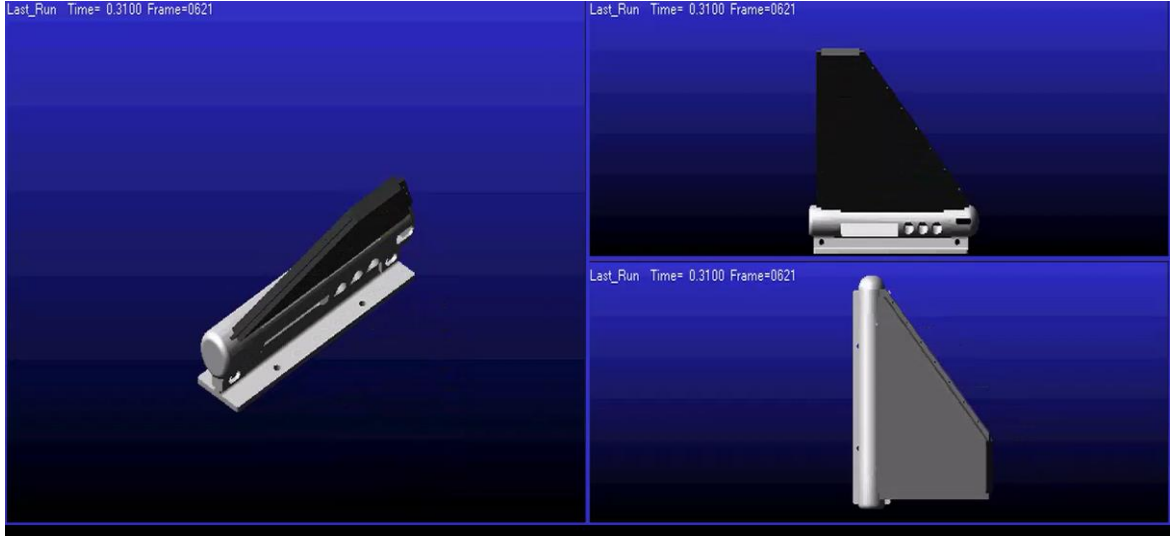
Deney numunesi	Kesit ölçüsü bxt (mm)	Nümerik Tork (Nm)	Deneysel Tork (Nm)	Analitik Tork (Nm)	Nümerik ve Deneysel Fark (%)	Nümerik ve Analitik Fark (%)
1	4,42×3,905	10,228	10,955	10,550	6,64	3,02
2	4,65 × 3,97	11,251	11,370	11,700	1,05	3,80
3	4,65 × 2,48	2,699	2,515	2,660	7,32	1,38
4	2,05 × 2,75	1,301	1,310	1,620	0,69	19,52
5	4,47x4,025	11,748	11,938	11,730	1,59	0,19
6	4,55x4,017	11,886	12,344	11,860	3,71	0,22
7	4,53 × 4,02	11,861	12,078	11,840	1,80	0,21
8	4,3 × 3,975	10,907	10,526	10,890	3,62	0,156
9	4,3 × 3,96	10,776	10,188	10,760	5,77	0,153
10	4,3 × 3,965	10,823	10,500	10,800	3,08	0,18
Ortalama fark					3,53	2,88

4.7. Katlanır Kanadın Adams Programı İle Açılma Sürelerinin Hesaplanması

Dünya üzerindeki alçak ve orta irtifa roket sistemlerinin çoğunluğu, atışa hazır halde bulundukları kanisteri veya fırlatma rampasını 300 milisaniye ile 1000 milisaniye arasında bir çıkış süresiyle terk etmektedir. Bu süre, roketin fırlatma sırasında istikrarlı bir şekilde yükselmesi için kritik bir faktördür.

Roket üzerinde bulunan katlanır kanatçıkları, itkinin olduğu nozul kısmına en yakın bulundukları konumda, açılma süresinin yaklaşık 200 milisaniye civarında olması, tasarım açısından başarılı ve doğru bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bölüm 3.8’de açıklandığı üzere, her bir yay numunesi için Adams yazılımı kullanılarak 135 derecelik burulma açısında meydana gelen ve Çizelge 4.10’da belirtilen dört farklı deneysel tork değeri altında, Çizelge 3.4’te belirtilen boyutsal ve ağırlık parametreleriyle kanat açılma analizleri yapılmıştır. Sonuçta, kanatın açılma simülasyonlarından farklı sürelerde kanat konumları Şekil 4.13’te görüldüğü gibi belirlenmiştir. Analizler sonucunda belirlenen her bir kanadın açılma süreleri milisaniye (ms) cinsinden Çizelge 4.10’da verilmiştir. Ayrıca kanadın açılma açısı ve süre grafikleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

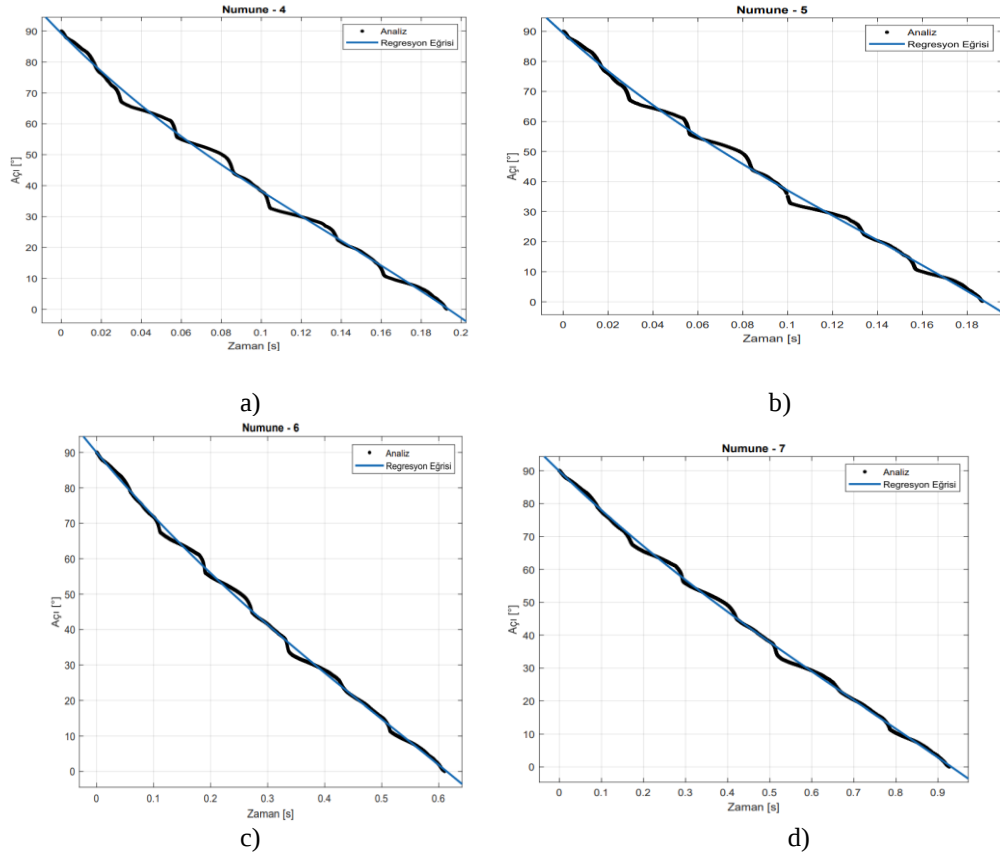
Elde edilen sonuçlara göre, hedeflenen 100 milisaniye civarındaki açılma süresine, 4 numaralı numune 1310 milisaniyede, 3 numaralı numune ise 595 milisaniyede ulaşmış ve bu sürelerin hedeflenen süreden uzak olmaları sebebiyle bu yaylar katlanır kanat mekanizmasında başarısız olarak değerlendirilmiştir. Ancak, 1 ve 2 numaralı numuneler sırasıyla 185 ve 180 milisaniye açılma süreleriyle hedeflenen 200 milisaniye süresine oldukça yakın performans sergilemiştir. Bu nedenle, bu numuneler tasarımsal açıdan uygun ve başarılı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.13. Katlanır kanat deneysel açılma süreleri

Çizelge 4.10. Adams programından elde edilen katlanır kanat açılma süreleri

Numune numarası	135°'deki Tork Değeri (Nm)	Kanat Açılma Süresi (ms)
Numune 1	10,955	192
Numune 2	11,370	186
Numune 3	2,515	610
Numune 4	1,310	927



Şekil 4.14. Açılma Hızı Grafikleri a) Numune 4, b) Numune 5, c) Numune 6, d) Numune 7

4.8. Katlanır Kanadın Açılma Sürelerinin Yüksek Hızlı Kamera ile Ölçülmesi

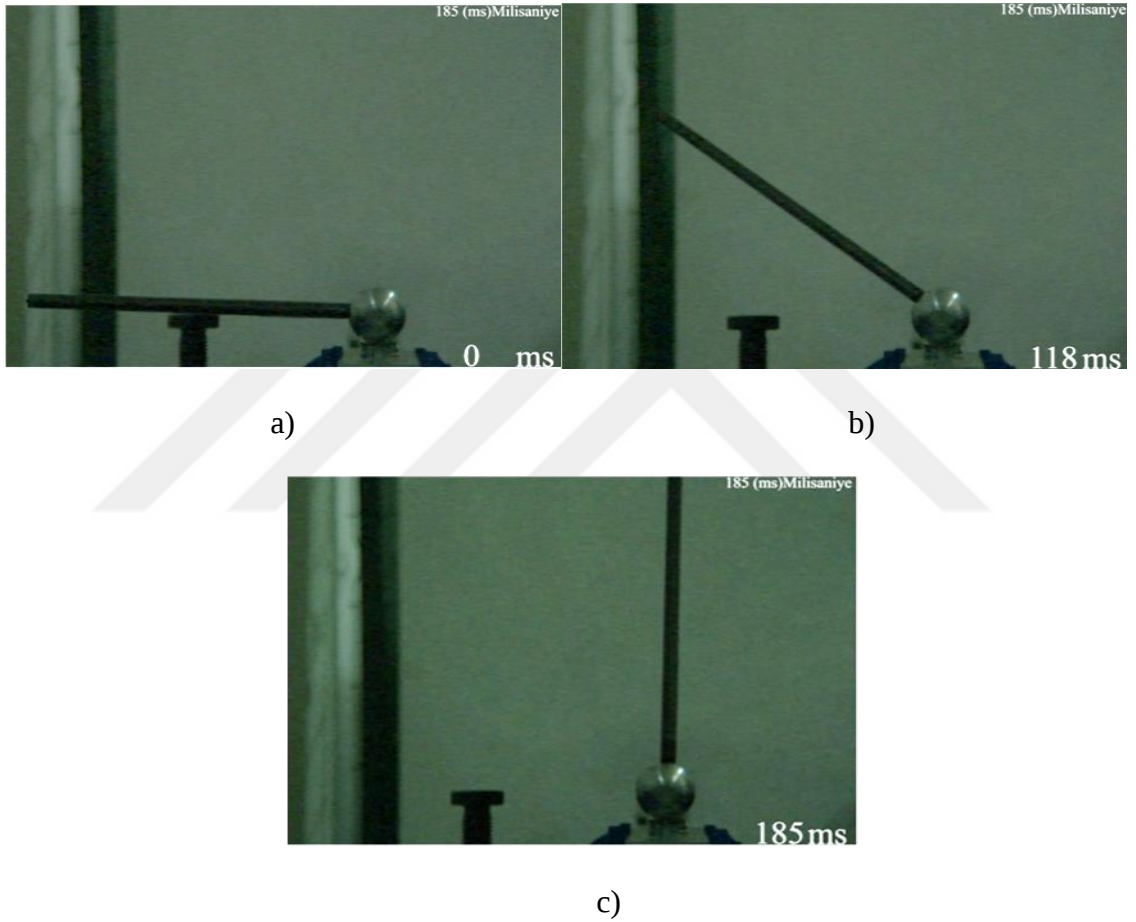
Tez çalışması kapsamında işlenmiş yayların performansını ölçmek için tasarımı, imalatı ve kurulumu yapılan katlanır kanat mekanizmasında kanat açılma testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, Bölüm 4.7’de verilen ve kanat açılma süreleri Adams yazılımı ile hesaplanan 1, 2, 3 ve 4 numuneler ile yapılmıştır. Diğer yayların tork değerleri 1 ve 2 numunelere yakın olduğu için tüm yaylar test edilmemiştir. Yaylar, Bölüm 3.7’de anlatıldığı gibi katlanır kanat mekanizmasına bağlandıktan sonra açılma testi yapılmış ve kanatın açılma süresi yüksek hızlı kamera ile ölçülmüştür. Böylece, katlanır kanat mekanizmasındaki açılma hızlarına bağlı performansları değerlendirilmiştir.

Deneylerde kanatın açılma hızları, Chronos marka yüksek hızlı kamera ile 1057 FPS (saniyedeki kare sayısı) hızında kaydedilen videolar yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 4.15’te kameradan elde edilen kanat açılma ölçümü görülmektedir. Açılma süresinin hesabında Denklem 4.1 kullanılmıştır. Burada, deneylerde ölçülen açılma süresinin hesabı için kamerada kaydedilen videolar bilgisayar ortamına aktarılmış ve bilgisayarda videonun özelliklerinden videonun dönüştürüldüğü FPS değeri belirlenmiştir. Kaydedilen videolar bilgisayarda açıldığında, dönüştürülmüş FPS değerinin 60 olduğu bulunmuştur. Bu değer, Denklem 4.1’de $FPS_{bilgisayar}$ olarak belirtilmiştir. Denklem ’de FPS_{kamera} değeri yerine 1057 olarak yazılmış, böylece milisaniye (ms) cinsinden açılma süreleri belirlenmiştir.

Performansı ölçülen yaylarla kanatın açılma süreleri Çizelge 4.11’de verilmiş ve Adams yazılımından simülasyonlardan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Katlanır kanat mekanizmasında yer alan ön ve arka burun yataklama sürtünmeleri, malzeme seçimi, toleranslandırmalardan kaynaklanan mekanik boşluklar ve kasıntılar, kanatçığin açılma sürelerine doğrudan etki etmektedir. Bu faktörlerin etkisiyle, 1,310 Nm tork değerine sahip olan 4 numaralı yay numunesi, kanatçığı açmada yetersiz kalmış ve test başarısız olmuştur. 2,515 Nm tork değerine sahip 3 numaralı numune, kanat açılmasını 583 milisaniyede gerçekleştirmiştir. Ancak bu süre, hedeflenen 200 milisaniyeden yaklaşık 3 kat fazla olduğu için tasarımsal açıdan uygun görülmemiştir. Buna karşılık, 11 Nm civarında tork değerine sahip 1 ve 2 numaralı numuneler, hedeflenen 200 milisaniye açılma süresine oldukça yakın performans sergilemiştir. Bu nedenle, bu numuneler hem tasarım hem de açılma hızı açısından uygun bulunmuştur.

Deneyisel ölçümler ve simülasyon değerleri arasındaki fark incelendiğinde, farkın en büyük olduğu değer %3,78 ile açılma süresi 185 milisaniye olan 1 numaralı yayda meydana gelmiştir. Simülasyonlarla yapılan tahminler, deneysel açılma sürelerini %96'ya varan oranda doğru tahmin edebilmiştir. Böylece, farklı yay tasarımları yapılırken simülasyonların güvenle kullanılabileceği, pahalı ve zaman alıcı testlere ihtiyaç olmadan yay tasarımlarının yapılabilmesi gösterilmiştir.

Sonuç olarak, tasarımı yapılan yaylar, deney düzeneği, gerçekleştirilen deneyler ve simülasyonlar başarılı olmuştur.



Şekil 4.15. Kanat açılma testleri a) 0ms, b)118 ms, c)185 ms

$$t_o = \text{FPS}_{\text{bilgisayar}} * t_b / \text{FPS}_{\text{kamera}}$$

4.1

Çizelge 4.11. Katlanır kanat deneysel ve sayısal sonuçlar ile hata oranları

Numune numarası	135°'deki Tork Değeri (Nm)	Deneysel ölçüm sonucu (ms)	Simülasyon sonucu (ms)	Fark (%)
Numune 1	10,955	185	192	3,78
Numune 2	11,370	180	186	3,33
Numune 3	2,515	595	610	2,52
Numune 4	1,310	Açılma başarısız	927	-

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, işlenmiş yayların katlanır kanat mekanizmasındaki kullanılabilirliğini ve performansını belirlemeye yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, burma yükü altında çalışan işlenmiş yayların tasarımı SEA desteği ile yapılmış, tasarlanan yayların iki farklı yöntemle imalatı gerçekleştirilmiştir. Farklı kesit ölçülerinde AISI 630 martenzitik paslanmaz çelikten imal edilen yayların yay sabitleri analitik olarak hesaplanmış ve sonlu elemanlar analizleri ile de tahmin edilmiştir. Yaylar, karakterizasyon testlerine tabi tutularak burma açısına karşılık gelen tork ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece yay sabiti ve 0-135° burma aralığındaki tork değerleri deneysel olarak da belirlenmiştir.

Yayların çalışma performansını belirlemek amacıyla katlanır kanat mekanizması tasarlanarak imal edilmiştir. Yayların Adams yazılımında dinamik analizleri yapılmış ve mekanizmanın çalışması simüle edilmiştir. Daha sonra imal edilen yaylar, kurulan deney sistemine takılarak çalışma performansı ve kanatın açılma süreleri deneysel olarak ölçülmüştür.

- Gerçekleştirilen bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:
- AISI 630 H925 temperli halinde temin edilen malzemeye uygulanan çekme testi sonucunda akma mukavemeti 1098 MPa ve çekme mukavemeti 1201 MPa bulunmuştur.
- İşlenmiş yayın akmasına neden olmayacak eksenel kesit uzunluğu (b) ve kesit kalınlığı (t) ölçüleri SEA ile belirlenerek 4 farklı yay tasarımı yapılmıştır.
- Tasarlanan yaylar, talaşlı imalat yöntemiyle iki farklı üreticiye ürettirilerek yayların imal edilmiş ölçüleri belirlenmiştir. İlk üreticide, imalatçı kaynaklı hatalar, helislerin neden olduğu esnemeler, malzemenin yüksek akma mukavemetine sahip olmasının getirdiği işleme zorlukları ve takım esnemeleri gibi üretimden kaynaklanan zorluklar sebebiyle tasarlanan ölçülerden %18'e varan oranda ve 0,46 mm ölçülerde sapmalar meydana gelmiştir. İkinci üreticide, talaşlı imalatla esneme sorununu ortadan kaldıran önlemler alındıktan

sonra hedeflenen boyutların en fazla %0,6 oranında sapmayla ve 0,05 mm tolerans ile elde edilebildiği bulunmuştur.

- Daha hızlı ve uygun maliyetli bir imalat yöntemi olarak profil lazer kesim yöntemiyle işlenmiş yayın imal edilebilirliği araştırılmıştır. Lazer kesimde, kesit kenarlarında cüruf olduğu için helisel kesitin eksenel uzunluk değeri 0,2 mm hata ile elde edilirken, kesit kalınlığı 0,04 mm farkla imal edilebilmiştir. Böylece, lazer profil kesim yönteminde belirsizliğin ve hatanın talaşlı imalata göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle, hedeflenen yay sabitini sağlayacak şekilde imalatın lazer profil kesimle zor olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Lazer profil kesim yöntemiyle üretilen yayların, 135° burulması durumundaki tork değeri, aynı kesit ölçüleriyle talaşlı imalat ile üretilen yaylara göre 1,62 Nm değerinde ve %13,3 oranında daha az çıkmıştır. Lazerle kesme işlemi sırasında, kesilen bölgenin etrafındaki bölgede ısının yayılmasıyla akma gerilmesinde düşüş meydana gelmiş ve sonuç olarak 135° burulma değeri hedeflenirken, 105°'de akma oluşmuştur.
- Her ne kadar lazer profil kesim yöntemiyle üretilen yaylarda ilk çevrimde akma meydana gelse de, diğer çevrimlerde malzemenin pekleşmesiyle torkun akma meydana gelmeden lineer şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, çekme dayanımına ulaşmayacak torklarda, lazer profil kesimle üretilen yayların da kullanılmasının mümkün olduğu söylenebilir.
- Lazer profil kesim yöntemi, talaşlı imalata göre imalat süresinde 3,6 kat ve maliyette 5 kat azalma sağlamıştır. Lazer profil kesimin malzemenin akma mukavemetinde azalma oluşturma etkisi dikkate alınarak yayların kesit ölçülerinin akma oluşmayacak şekilde belirlenmesiyle talaşlı imalata göre maliyet açısından daha uygun bir seçenek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak torkun daha hassas bir şekilde uygulanması gerektiği durumlarda talaşlı imalatın öncelikli olarak seçilmesi uygundur.
- İşlenmiş yay numunelerinin 135° burulması sonucunda, analitik olarak hesaplanan tork değeri ile deneysel olarak ölçülen tork değeri arasında fark %5,05'tir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen tork değeri ile deneysel ölçülen tork değerinde ise ortalama fark %3,5'tir.

Böylece, nümerik ve analitik yöntemlerle belirlenen yay sabiti ve tork değerlerinin, deneysel olarak ölçülen değerleri %94'in üzerinde bir oranla doğru belirlenebildiği gösterilmiş, sonlu elemanlar analizlerinin ve analitik hesapların işlenmiş yayların tasarımında yüksek bir güvenilirlikle kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

- Tez kapsamında tasarlanıp üretilen açılır kanat mekanizması, işlenmiş yayların performanslarının ölçümünde başarıyla kullanılabilmektedir. 135°'de yaklaşık 11 Nm tork veren yayların, ortalama olarak 182,5 milisaniye süreyle hedeflenen 200 milisaniye kanat açma süresini çok yakın değerlerle sağlayabildiği bulunmuştur.
- Dinamik analiz sonuçlarının, deneysel olarak gerçekleştirilen katlanır kanat testlerinde yüksek hızlı kameralarla ölçülen açılma sürelerine %96,2 oranında yaklaştığı görülmüştür. Böylece, dinamik analizlerin, deneysel sistemler kurmaya bağlı maliyetlerden kaçınmak için başarıyla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

- İşlenmiş yaylar ve işlenmiş yayların katlanır mekanizmalarda kullanımı üzerine bundan sonraki çalışmalar için aşağıda bazı öneriler sunulmuştur:
- İşlenmiş yayların yüksek tolerans hassasiyetiyle üretilmesinin ardından, katlanır mekanizmaların kinematik olarak açılma hassasiyetleri incelenebilir. Bu kapsamda, mekanizmaya entegre edilecek CMM (Koordinat Ölçüm Makinesi) yöntemiyle, kanatların açılma durumu ve öncesindeki konumları ölçülerek analiz edilebilir. Elde edilen veriler, mekanizmanın performansı ve tasarım parametreleri ile karşılaştırılarak, işlenmiş yayların kanatların konumlarını ne kadar hassasiyetle sağlayabileceği değerlendirilebilir.
- Akma mukavemeti düşük olan işlenmiş yaylar, fazla sayıda çevrime tabi tutularak, işlenmiş yayların yüksek çevrimli testlerinde yaylanma katsayısındaki değişimler incelenebilir. Bu çalışmada, çevrim sayısının yaylanma katsayısı üzerindeki etkisi gösterilerek, çevrim sayısının performansa olan etkisi detaylı bir şekilde ele alınabilir.

- İşlenmiş yayların farklı sıcaklık koşullarındaki çalışma performansları incelenebilir ve bu bulgular, yay tasarımlarına önemli katkılarda bulunabilir.
- İşlenmiş yayların, minimal boyutlarda maksimum tork elde edilecek şekilde tasarımları gerçekleştirilerek, farklı yaylanma katsayılarına sahip olabilecek minimal boyutlara ilişkin literatüre katkı sağlanabilir.
- İşlenmiş yaylarda meydana gelen olumsuz etkiler, farklı işleme yöntemlerinde elde edilen tolerans değerleriyle kıyaslanarak, işleme yöntemlerinin parametrelerinin toleranslar üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirilebilir.
- Profil lazer kesim yönteminde yayların kesme yüzeylerinde cüruf meydana geldiği için cürufsuz bir kesim için lazer kesim yönteminde güç ve ilerleme hızının işlenmiş yay üretimine etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

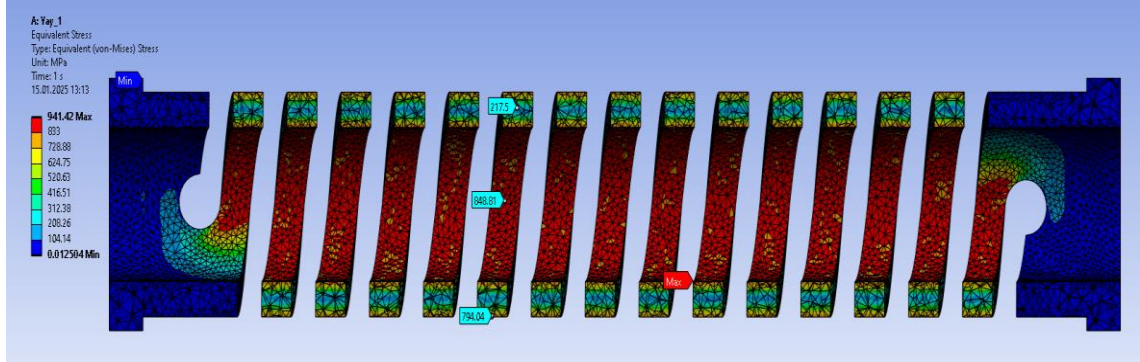
- Kutay, G. (2010). *Elastik Yaylar* [online], Türkiye, 4-6 [Ziyaret Tarihi: 08 Nisan 2023].
- Abssac (2016). *How Machined Springs Out-Perform Wire Wound Springs* [online], <https://www.machinebuilding.net/how-machined-springs-out-perform-wire-wound-springs> [Ziyaret Tarihi: 08 Nisan 2023].
- Anonymous a (2024). *BMW Springs: Springs and Spring Elements* [online], <https://www.planplus.rs/en/bmw-springs-springs-and-spring-elements/131060> [Ziyaret Tarihi: 8 Aralık 2024].
- Anonymous a (2023). *Video on Machined Springs* [online], <https://youtu.be/RUIeoTq8kXQ> [Ziyaret Tarihi: 08 Nisan 2023].
- Anonymous b (2023). *Machined Springs* [online], <https://www.abssac.co.uk/c/Machined+Springs/17/> [Ziyaret Tarihi: 08 Nisan 2023].
- Boehm, G. L. (2007). *Wire Springs or Machined Springs* [online], <https://www.designworldonline.com/wire-springs-or-machined-springs/> [Ziyaret Tarihi: 8 Nisan 2023].
- Anonymous c (2024). *Types of Springs and Their Applications* [online], <https://www.madearia.com/tr/blog/types-of-springs-and-their-applications/> [Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2024].
- Calderon, J. D. D. ve Perez, C. (2013). "On the General Characterization of Machined Springs and Their Manufacturing Processes". *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Cilt 12: Systems and Design, V012T13A054.
- Chen, T., Zhang, Y., Qiu, S., Jiang, J., Zhang, Q. ve Zhang, X. (2022). "Experiments and Modeling of Machined Spring Rotary Actuators with Shape Memory Alloys". *Materials*, 15(19), 6674.
- Demirtaş, O., 2019, "İşleme Burulma Yayının Katılığına Ait Parametrelerin Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-150.
- Industrial Technology, 2025, *Do you know what a machined spring is?* [online], Industrial Technology, <https://www.industrialtechnology.co.uk/do-you-know-what-a-machined-spring-is> [Ziyaret Tarihi: 14 Ocak 2025].
- Kawaharazuka, K., Makino, S., Kawamura, M., Nakashima, Z., Asano, Y., Okada, M. ve Inaba, M. (2020). "Human Mimetic Forearm and Hand Design with a Radioulnar Joint and Flexible Machined Spring Finger for Human Skillful Motions". *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2020, 1-8.
- Lee, K., and Brown, R., 2023, Studies on the dynamics of the valve train with machined valve springs, *Journal of Automotive Engineering*, 78(4), 45-60.
- Lu, X., Yang, R., Qian, W. ve Sun, S. (2022). "Design and Manufacture of Similar Model of Folding Wings and Study on Dynamic Characteristics". *Machines*, 10(12), 1149.

- Marghitu, D. (2001). *Mechanical Engineer's Handbook*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 20-30.
- Nama, S. A. (2015). "Modeling and Analysis of a Helical Machined Springs". *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*, 15(2), 123-134.
- Smith, J., and Johnson, A., 2023, Effect of pitch angle on static characteristics of a helical machined spring, *International Journal of Mechanical Science*, 45(3), 123-135.
- Watson, M. ve Gonzalez, F. (2023). "Design and Implementation of a Low-Cost Folding Wing UAV for Model Rocket Deployment". *Aerospace Science and Technology*, 134, 106-119.
- Xiaopeng, Z. ve Haixin, C. (2017). "Conceptual Design of Self-Expanding/Folding Extremely Large Aspect Ratio Wing Airplane". *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(1), 15-25.

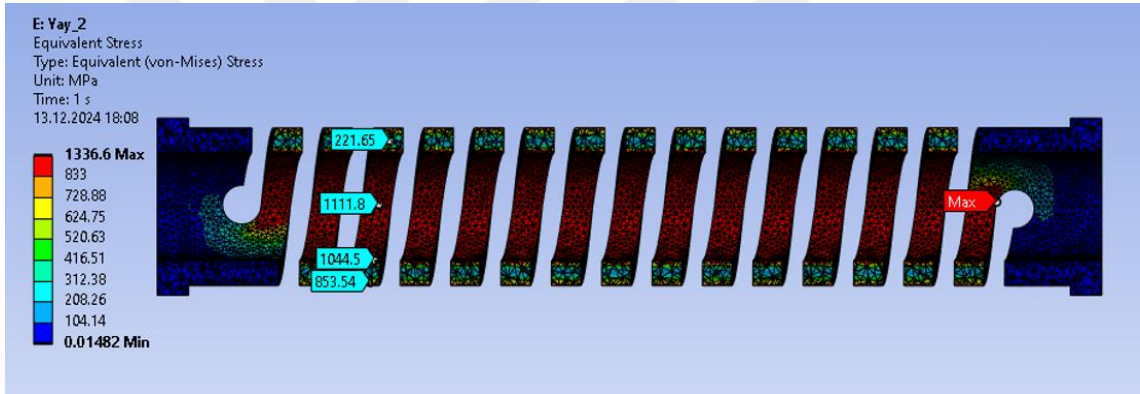


EKLER

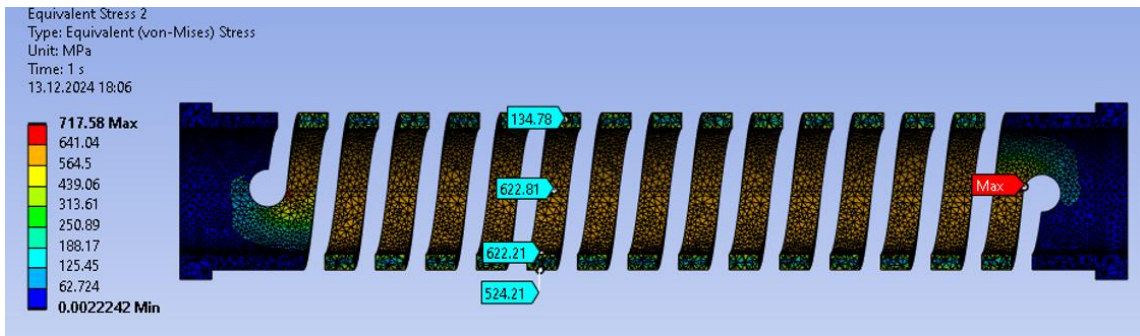
EK-1 Numeric tork ölçüm sonuçları



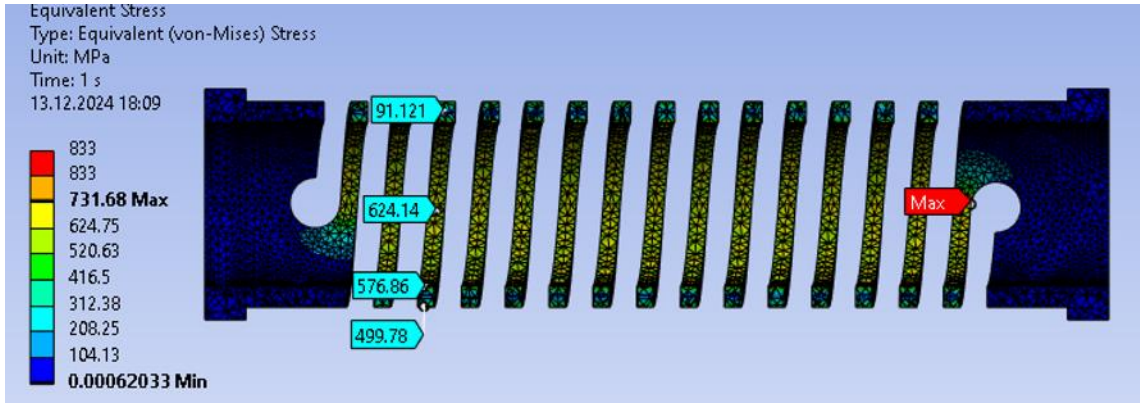
Şekil E.1.1 1 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



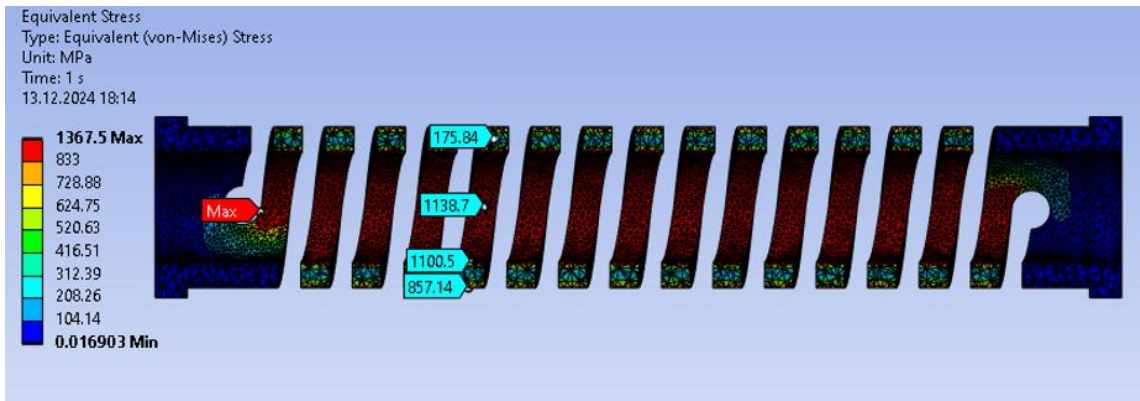
Şekil E.1.2 2 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



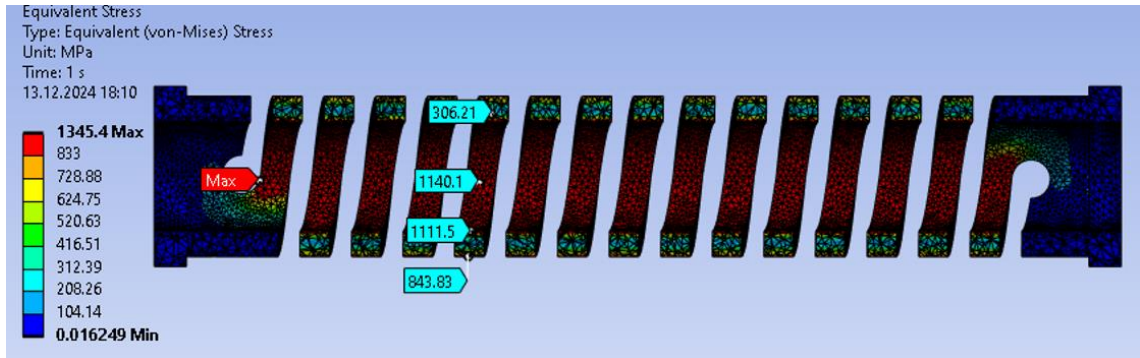
Şekil E.1.3 3 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



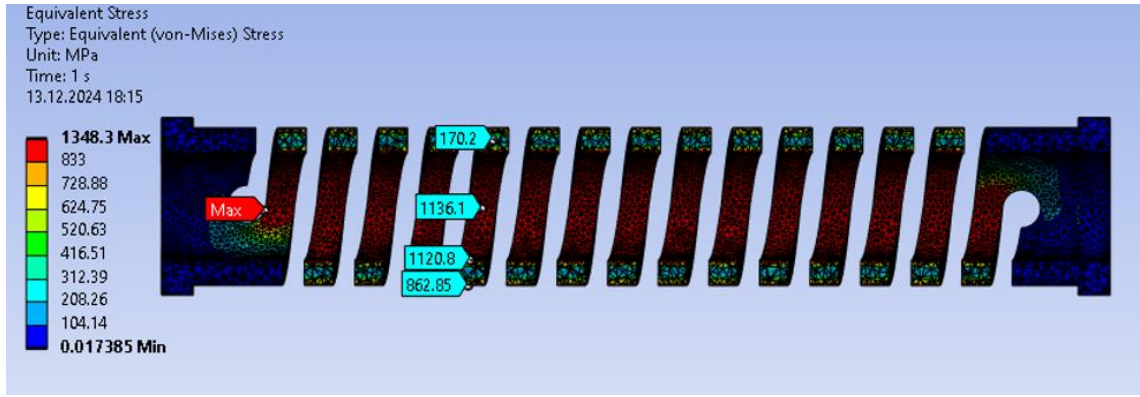
Şekil E.1.4 4 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



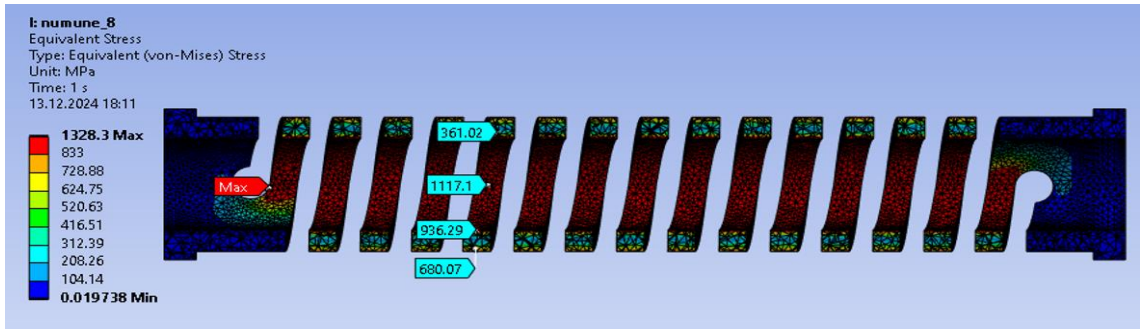
Şekil E.1.5 5 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



Şekil E.1.6 6 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



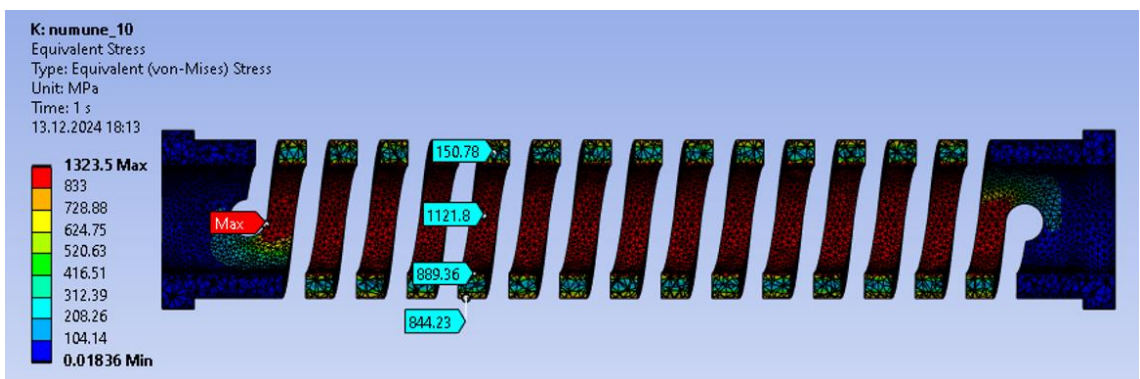
Şekil E.1.7 7 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu



Şekil E.1.8 8 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu

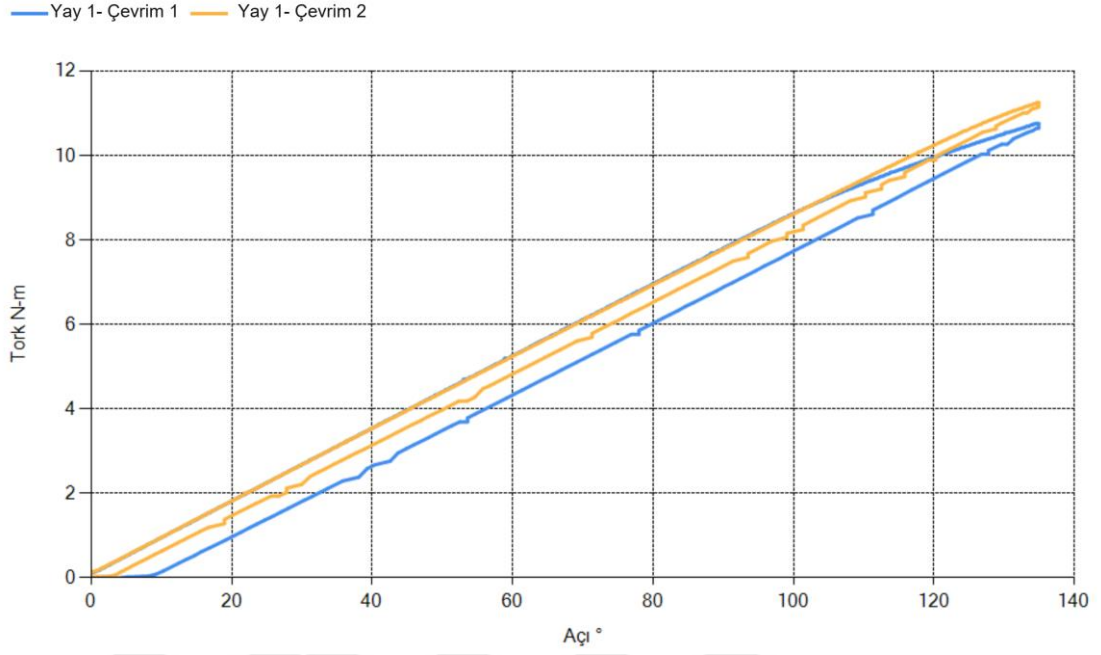


Şekil E.1.9 9 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu

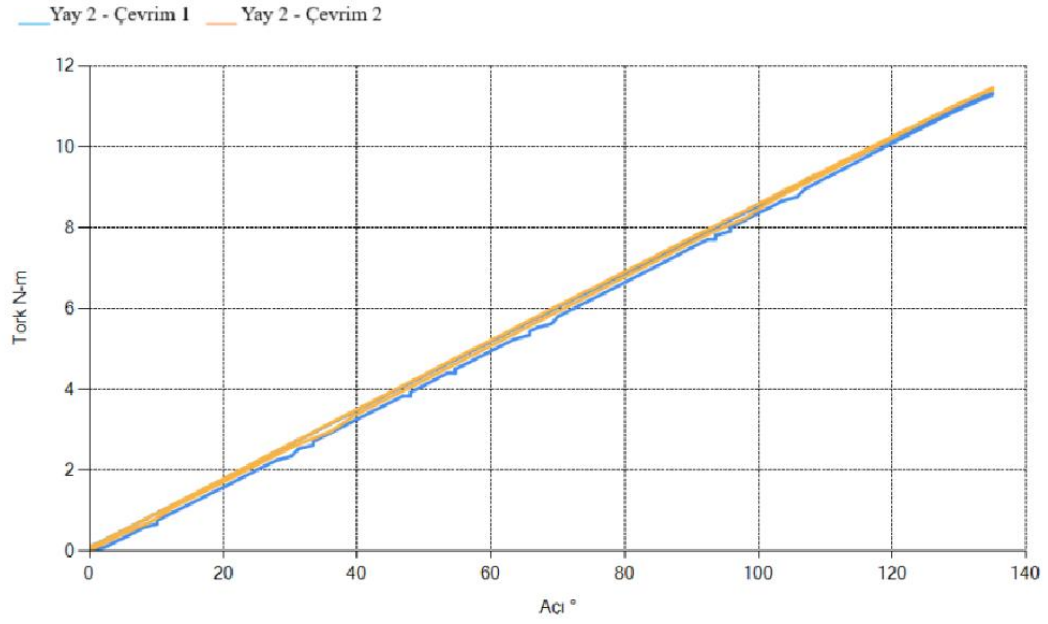


Şekil E.1.10 10 numaralı yayın numerik kesit gerilmeleri ve tork ölçüm sonucu

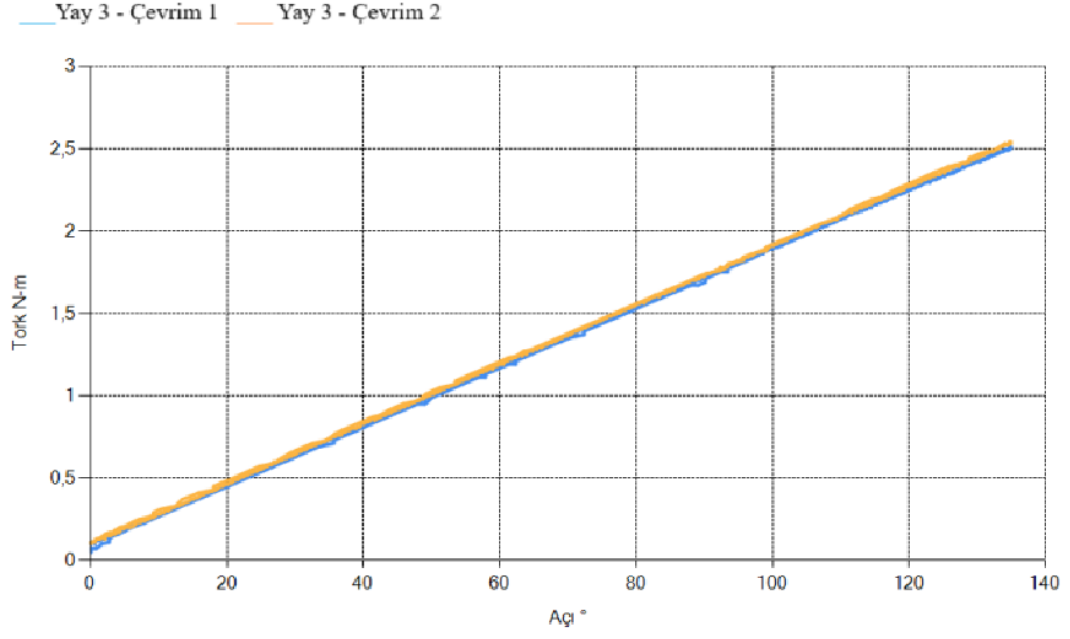
EK-2 deneysel tork ölçüm sonuçları



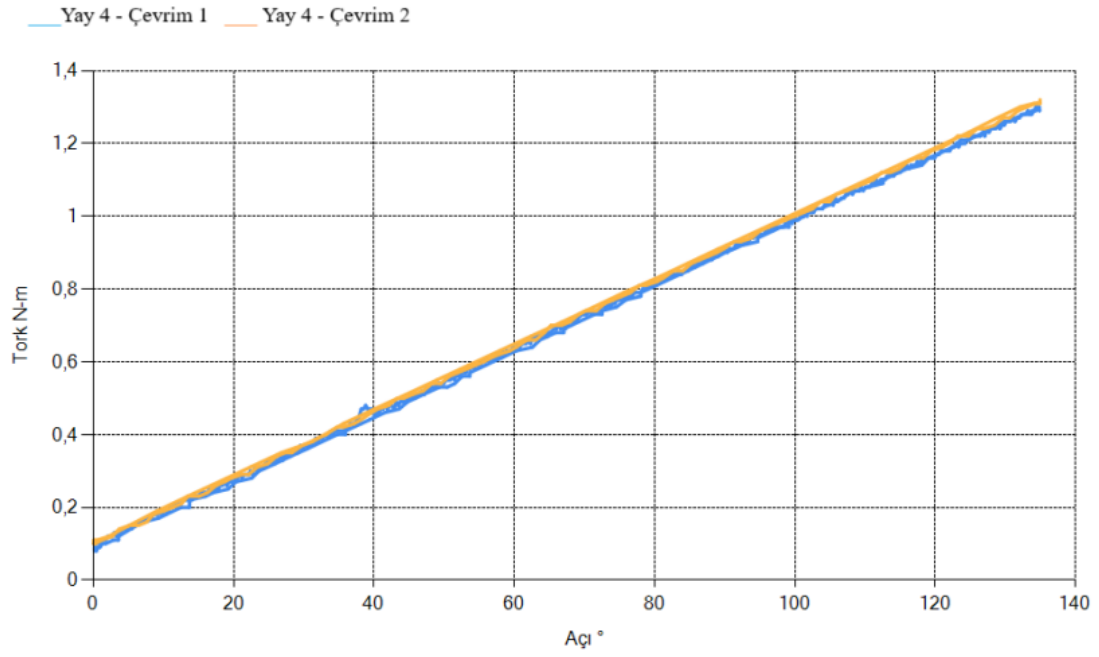
Şekil E.2.1 1 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



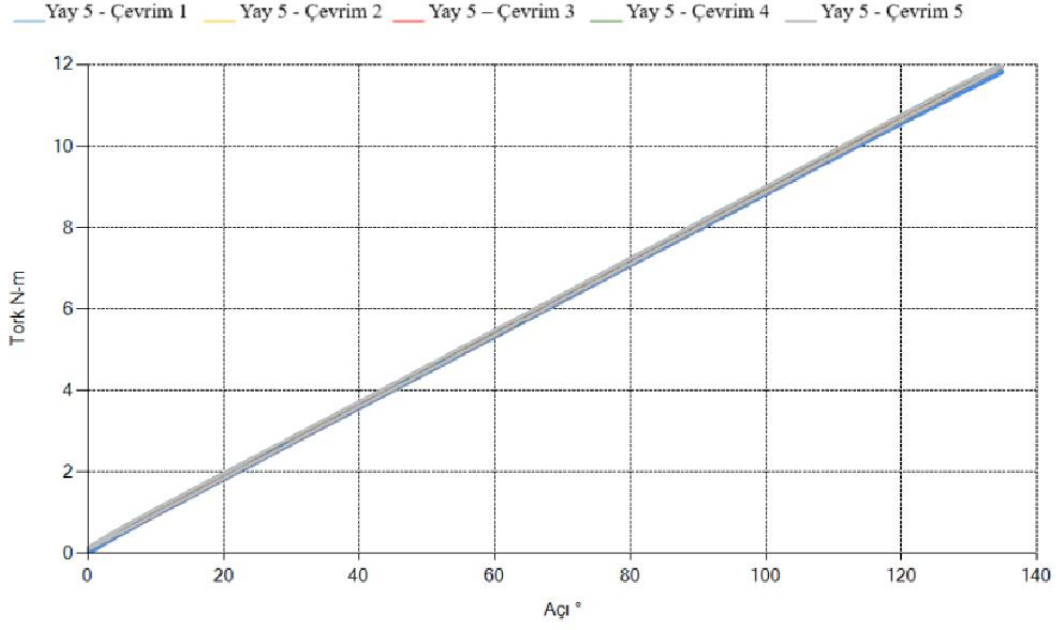
Şekil E.2.2 2 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



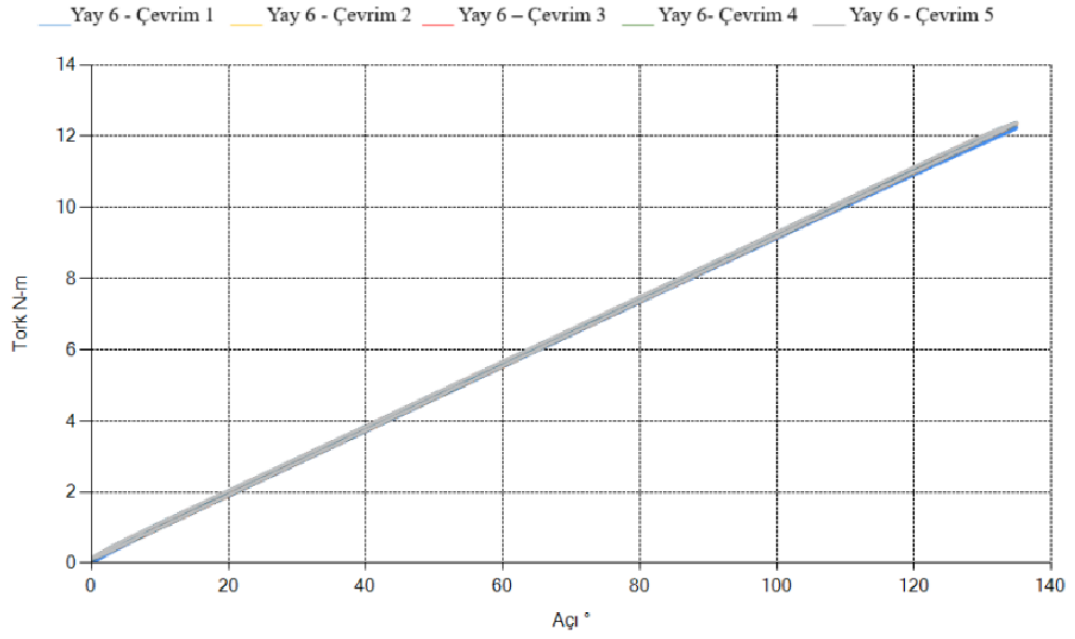
Şekil E.2.3 3 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



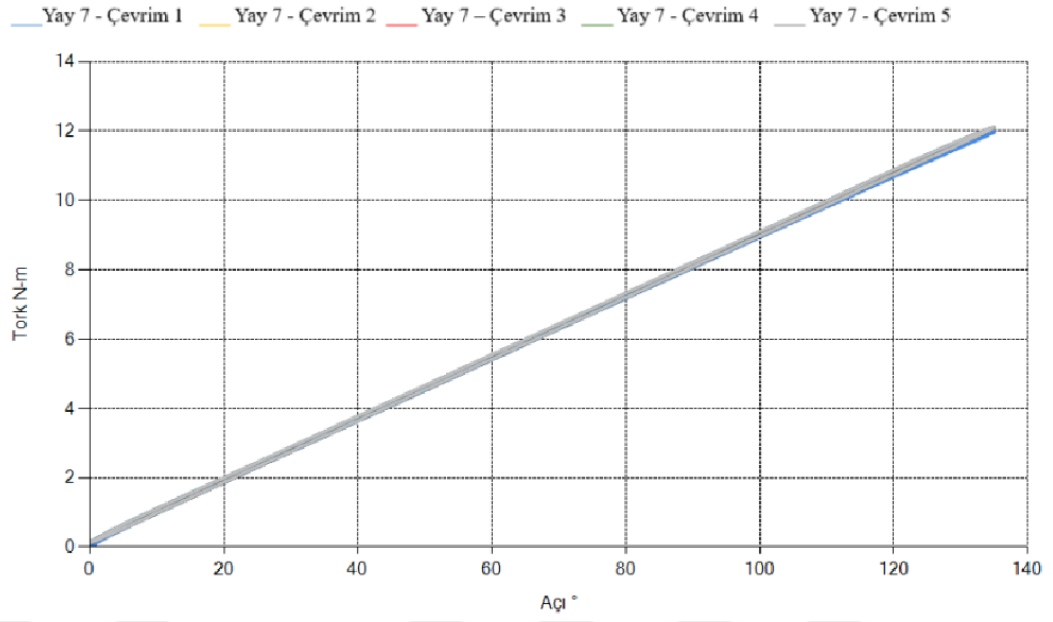
Şekil E.2.4 4 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



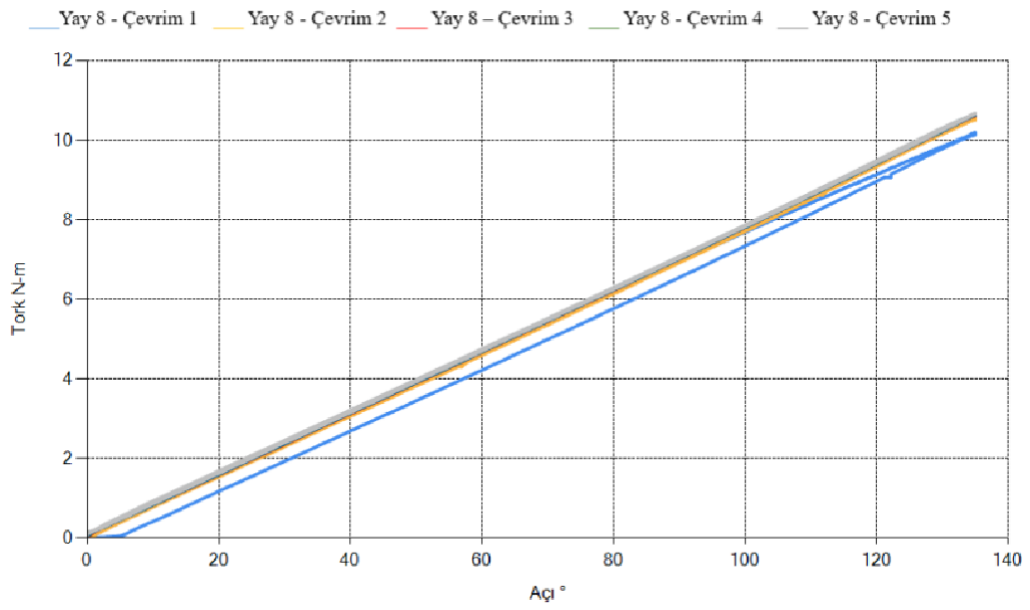
Şekil E.2.5 5 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



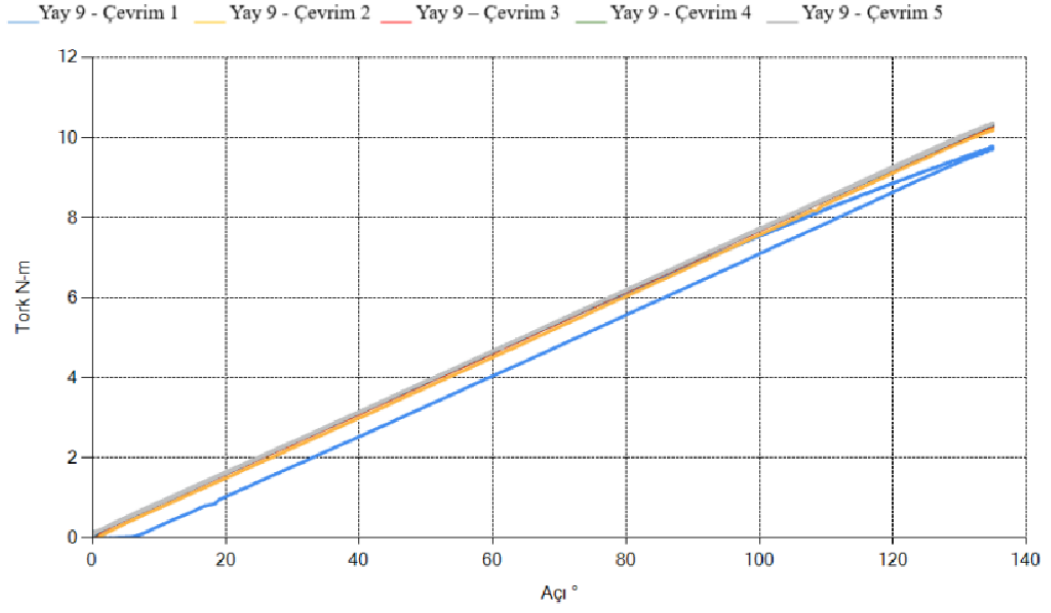
Şekil E.2.6 6 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



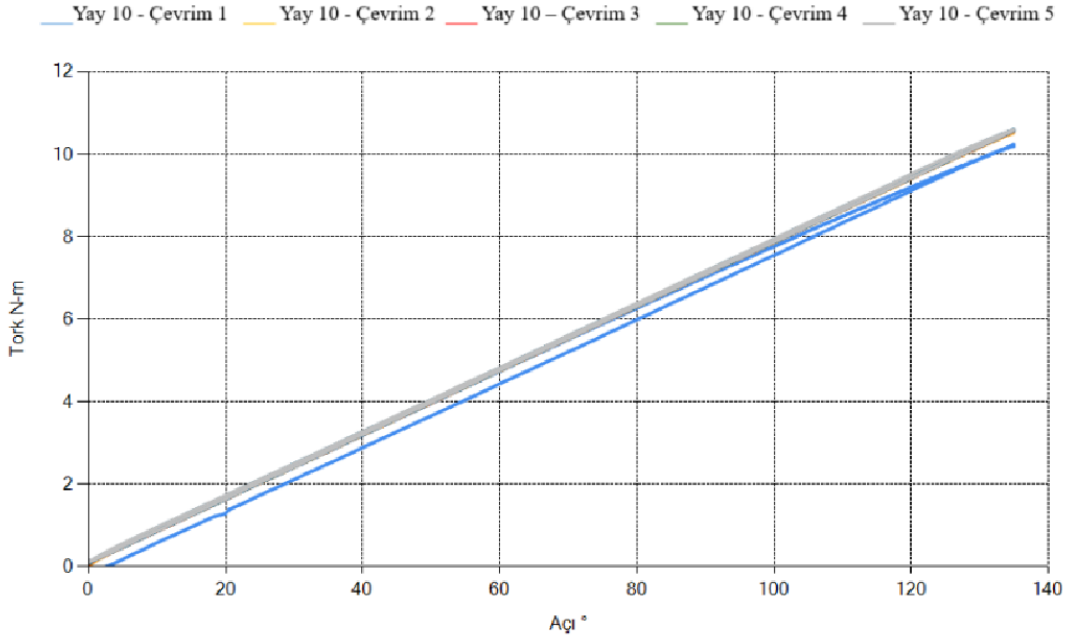
Şekil E.2.7 7 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



Şekil E.2.8 8 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



Şekil E.2.9 9 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları



Şekil E.2.10 10 numaralı yayın deneysel tork ölçüm sonuçları