T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOBİL SÜSPANSİYON HELİSEL BASMA YAYLARININ BLOKLAMA OPERASYONUNUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

ERDEM BÖREKÇİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOBİL SÜSPANPANSİYON HELİSEL BASMA YAYLARININ BLOKLAMA OPERASYONUNUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

ERDEM BÖREKÇİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE
2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF BLOCKING OPERATION OF AUTOMOBILE SUSPENSION HELICAL COMPRESSION SPRINGS

ERDEM BÖREKÇİ

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE

2016

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2016 tarih ve 2016/43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/06/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Erdem BÖREKÇİ'nin tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Hasan KURTARAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Sedat SÜSLER

ONAY

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……. tarih ve ……/…….. sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, otomobil süspansiyon silindirik helisel yaylarının üretiminde yer alan bloklama operasyonunda yay boyunda oluşan plastik deformasyon miktarı oda sıcaklığında deneysel olarak incelenmiş ve sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan 60SiCr7 yay çeliği malzemesine özdeş yaylar, aynı bloklama şartlarında 100°C ve 200°C'de bloklanmış, sıcaklık arttıkça yay malzemesinin elastisite ve akma gerilmesi azaldığından dolayı, blok boyundaki maksimum kuvvet değeri azalmış ve yayların plastik deformasyon miktarları artmıştır. Ayrıca, deney yayının ortalama sargı çapının ±20 mm ve sarım sayısının da ±0.25 değerlerinin kombinasyonları ile elde edilmiş 9 adet yayın CAD modeli oluşturulmuş, sonlu elemanlar modeli ile Ansys programında bloklama operasyonları analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, sarım sayısı ve ortalama sargı çapı azaldıkça, blok boyundaki maksimum kuvvet değeri ve yay boyundaki plastik deformasyon miktarının arttığı hesaplanmıştır. Cevap yüzeyi metodu ile sarım sayısı ve ortalama sargı çapı parametreleri ile plastik deformasyon miktarı ve maksimum kuvvet değerlerini veren fonksiyonlar bulunmuştur.

,

Anahtar Kelimeler: Otomobil süspansiyon silindirik helisel yayı, bloklama operasyonu, sonlu elemanlar metodu, plastik deformasyon, maksimum kuvvet.

SUMMARY

In this study, amount of plastic deformation occurs in helical spring at blocking operation in automobile suspension cylindrical helical spring production is researched experimentally and finite element analysis in room temperature and results is compared. Identical springs have 60SiCr7 spring steel material structure used in the experiment are blocked in 100°C and 200°C temperatures at identical blocking conditions. Temperature increase, because of reduced spring material elasticity module and yield stress, reduced the maximum force occurring in spring and increased the amount of plastic deformation of the spring. Also, 9 springs CAD model are obtained by combining ±20 mm values of mean cooling diameter and ±0.25 values of number of coils of the experiment spring. These CAD models are analyzed by finite element method in Ansys program. As result of analysis number of coil and mean cooling diameter decrease, maximum force and amount of plastic deformation increase is calculated. Using response surface method with number of coils and mean cooling diameter parameter is found functions that are given maximum force and plastic deformation values.

Key Words: Automobile suspension cylindrical helical spring, blocking operation, finite element method, plastic deformation, maximum force.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Hasan KURTARAN'a, bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşlarım Reis TEZCAN ve Oğuz YILDIZ'a, RÖZMAŞ A.Ş.'de çalışmakta olan Ar-GE Şefi İlker DEMİR, Kalite Şefi Ömer YILDIZ, vardiya amiri Osman ÖZCAN'a ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Burcu BÖREKÇİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2.YAYLARIN TEORİSİ	8
2.1. Süspansiyon Sistemi	8
2.1.1. Süspansiyon Sisteminin Görevleri	10
2.1.2. Süspansiyon Sistemi Elemanları	10
2.1.3. Yaylar	11
2.1.3.1. Yayların Görevleri	12
2.1.3.2. Yay Çeşitleri	12
2.2. Helisel Yaylar İle İlgili Analitik Formülasyonlar	15
2.3. Helisel Yayların Bloklanması	19
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1. Deney Yayının Malzemesinin Mekanik Özellikleri	21
3.2. Deney Yayının Boyutsal Özellikleri	23
3.3. Deneyin Yapılışı	25
3.4. Deney Sonuçları	26
3.5. Deneyin Farklı Sıcaklıklarda Yapılması	29
3.6. Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Deneylerin Sonuçlarının Karşılaştırılması	35
4. SONLU ELEMANLAR MODELİ ve ANALİZİ	37
4.1. Sonlu Elemanlar Analizi	38

4.2. Deney Yayına Özdeş Sarım Sayıları ve Ortalama Sargı Çapları Farklı Yayların Sonlu Elemanlar Analizi 46
4.3. Cevap Yüzeyi Metodu 47
4.4. Maksimum Kuvvet ve Plastik Deformasyon İçin Cevap Yüzeyleri Oluşturulması 48
4.5. Deney İle Sonlu Eleman Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması 50
5.SONUÇLAR 53

KAYNAKLAR 54
ÖZGEÇMİŞ 56

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
F_{maks}	:	Maksimum kuvvet
ΔL	:	Plastik deformasyon miktarı
n	:	Sarım sayısı
D_0	:	Ortalama sargı çapı
d	:	Yay teli çapı
α	:	Helis açısı
τ	:	Burulma gerilmesi
M_b	:	Burulma momenti
M_e	:	Eğilme momenti
W_p	:	Polar mukavemet momenti
τ_k	:	Kesme gerilmesi
Σ	:	Bası gerilmesi
F_y	:	Helis açısına göre bası kuvvetinin yatay bileşeni
F_d	:	Helis açısına göre bası kuvvetinin dikey bileşeni
τ_i	:	İdeal haldeki burulma gerilmesi
τ_{maks}	:	Yay kesitinde oluşan maksimum gerilme
k	:	Sarım oranı $w = D_0 / d$ ‘nin bir fonksiyonu
c	:	Yay rijitliği
w	:	Sarım oranı
s	:	Yaylanma miktarı
G	:	Kayma modülü
D	:	Yay gövde dış çapı
d_o	:	Çekme testi numunesi başlangıç kesit çapı
l_o	:	Çekme testi numunesi başlangıç boyu
E	:	Elastiste modülü
N	:	Newton
MPa	:	Mega Pascal
mm	:	Mili metre

e	:	Gerinim
mm^2	:	Milimetre kare
HRc	:	Rockwell sertlik birimi
z	:	Yay yüksekliği
% e_{kopma}	:	Yüzde kopma uzaması
$\sigma_{0.2}$	:	Akma mukavemeti
$\sigma_{çekme}$	:	Çekme mukavemeti
M_e	:	Eğilme momenti
W_p	:	Polar mukavemet momenti
°C	:	Celcius
Π	:	Pi sayısı
sn.	:	Saniye
dk.	:	Dakika
R^2	:	Cevap yüzeyi metodu ile uydurulan fonksiyonun uyum kalitesi
C	:	Karbon elementi
Si	:	Silisyum elementi
Mn	:	Mangan elementi
S	:	Kükürt elementi
P	:	Karbon elementi
Cu	:	Bakır elementi
Cr	:	Krom elementi
V	:	Vanadyum elementi
Mo	:	Molibden elementi
A.Ş.	:	Anonim şirketi
CAD	:	Computer Aided Design (Bilgisayar destekli tasarım)
CAM	:	Computer Aided Manufacture (Bilgisayar destekli imalat)
FEM	:	Finite Element Method (Sonlu elemanlar metodu)
GTÜ	:	Gebze Teknik Üniversitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Araçta meydana gelen süspansiyonlu kütle salınımları.	8
2.2:	Araç üzerinde süspansiyon sistemi.	9
2.3:	Süspansiyon sistemi elemanları.	11
2.4:	Tümsekten geçen bir aracın yay salınımları.	11
2.5:	Yaprak yay ve bağlantıları.	13
2.6:	Burulma çubuğu.	13
2.7:	Helisel yay.	14
2.8:	Helisel yayların araçtaki görünümü.	14
2.9:	Silindirik Helisel Yay.	15
2.10:	Yaya gelen kuvvetin bileşenleri.	17
2.11:	Yay kesitinde oluşan gerilme.	18
2.12:	Yayların bloklanması.	20
3.1:	Çekme testi numunesi.	21
3.2:	Deney yayı malzemesinin gerilme - gerinim grafiği.	23
3.3:	Deney yayının boyutlandırılması.	24
3.4:	Deney yayının CAD modeli.	25
3.5:	a) Deney yayının tabaklara montaj halinin görünümü, b) Montajın CAD modeli.	26
3.6:	Deney sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.	28
3.7:	Meneviş fırınından alınmış bir helisel yayın bloklama deneyine başlamadan önceki görünümü.	29
3.8:	Meneviş fırınından alınmış bir helisel yayın bloklama deneyi esnasında blok boyuna yakın bir boydaki görünümü.	30
3.9:	100°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.	32
3.10:	200°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.	34
3.11:	Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerin sonucunda elde edilen yay boyu -kuvvet değerlerinin karşılaştırmalı grafiği.	36
4.1:	Ana geometrinin sonlu elemanlar modeli ile daha küçük elemanlara ve	37

düğüm noktalarının bölünmesi.
4.2: Yayın kendi içindeki kontaktının hem 'Contact Eleman' hem de 'Target Eleman' olarak tanımlanması 39
4.3: Yay ile tabakların temas halindeki yüzeyleri 'Bonded' kontaktlar olarak tanımlanması. 40
4.4: Yayın sonlu elemanlar ağı. 41
4.5: Farklı ağ tiplerindeki yayın kesit görünümü. 41
4.6: Yayın üst tabağına z yönünde 320 mm yer değiştirme uygulanması. 42
4.7: Yayın alt tabağının her 3 yön için de sabitlenmesi. 42
4.8: 2 aşamalı olan analizde, 2.aşama olan serbest bırakmanın pasifize edilmesi. 43
4.9: Bloklanmış yay görünümü. 43
4.10: Eleman sayısı - F_{maks} değeri grafiği. 45
4.11: F_1 fonksiyonunun grafiği. 49
4.12: F_2 fonksiyonunun grafiği. 50

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
3.1:	Deney yayı malzemesinin alaşımlarının yüzde kimyasal bileşimi.	21
3.2:	Deney yayı malzemesinin gerilme - gerinim değerleri.	22
3.3:	Çekme testi sonuç değerleri.	23
3.4:	Deney yayının sarım sayısı - yay yüksekliği değerleri.	24
3.5:	Deney sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.	27
3.6:	100°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.	31
3.7:	200°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.	33
3.8:	Farklı sıcaklıklarda yapılan bloklama deneylerindeki F_{maks} ve plastik deformasyon (ΔL) değerleri.	35
4.1:	Yay malzemesinin gerilme - plastik gerinim değerleri.	38
4.2:	Farklı ağ yapıları ile elde edilmiş sonlu eleman tablosu.	42
4.3:	Analizdeki süreye bağlı değişen kuvvet değerleri.	44
4.4:	Yay boyunda süreye bağlı değişen deformasyon miktarları.	44
4.5:	Farklı ağ tipleri ile yapılmış analiz sonuçları.	45
4.6:	Farklı yay geometrileri ile elde edilen maksimum kuvvet ve plastik deformasyon tablosu.	46
4.7:	F_{maks} ve ΔL değerlerinin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	51
4.8:	Farklı sürtünme katsayıları durumları için maksimum kuvvet değerleri.	51
4.9:	Farklı ortalama sargı çapı değerleri için maksimum kuvvet değerleri.	52

1. GİRİŞ

Otomobillerin süspansiyon sisteminde kullanılan silindirik helisel yayların tasarımı aşamasında 3 farklı yay boyu önem taşımaktadır. Bunlardan birincisi, aracın durağan halindeki gövde ağırlığı yükünü taşıdığındaki yay boyu olan tasarım (design) boyudur. Diğer ikisi, aracın çalışma koşullar dahilinde, yayın açılabileceği maksimum boy (rebound boyu) ve kapanabileceği minumum boydur (jounce boyu).

Yay imalatında, sıcak veya soğuk sarım prosesleri ile çelik çubuk şeklindeki ham maddelere plastik şekil verilerek helisel yaylar elde edilir. Ardından yaylara ısıl işlem prosesi uygulanıp, yaylar bloklama operasyonuna tabi tutulur. Burada yaylar, jounce boyunun altındaki bir boya bloklanır ve blok kuvveti yayda plastik deformasyona neden olur. Bu plastik deformasyonun sonucunda yayda kalıcı boy kaybı oluşur. Jounce boyunun altına sıkıştırılan yay, aracın çalışma koşullarında bu blok boyundan daha açık boylara sıkışacağı için araca takılmış yayda kalıcı boy kaybı olmayacaktır. Böylece araç gövdesi ile tekerlekler arasındaki mesafe sürekli sabit kalacaktır. Tersi durum düşünüldüğünde, eğer jounce boyunun altına sıkıştırılmamış bir yay araca monte edildiğinde, yayın jounce boyuna sıkışıp geri yaylandıktan sonra yayda boy kaybı olacak ve araç gövdesinde, tekerleklere ve zemine göre bir miktar aşağıya doğru çökme gözlenecektir [1], [2].

Yay sarım proseslerinde boklamada oluşacak boy kaybı kompanse edilmelidir. Bu yüzden sarım proseslerinde yaylar bitmiş ürün boyuna göre daha uzun sarılmaktadır. Sarımı yapılacak yayın bloklama sonrası plastik deformasyon miktarı bilinmeden veya yaklaşık olarak öngörülmeden üretilecek prototip yayların üretiminde zaman kaybı, hurda yaylar, sarım prosesinde kullanılacak hatalı ekipmanlar ile gereksiz ekipman maliyetleri, sarım -ısıl işlem- bloklama operasyonlarının proses maliyetleri oluşacaktır [1], [2].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Mevcut yay imalatında istenen bloklama sonu yay boyunun elde edilebilmesi için deneme-yanılma yöntemi ile bloklama sonu yay boyundan daha uzun bir boyda yay sarılmaktadır. Rastgele sarılan yayın bloklama sonu boyu ölçülmekte, istenen bloklama sonu yay boyu elde edilene kadar sarım prosesinde yay boyu

ayarlanmaktadır. Bu yöntem ile prototip yay çalışmalarında gerek zaman gerek de proses, ekipman, ham madde maliyetleri açısından ciddi kayıplar yaşanmaktadır.

Helisel yaylar ile ilgili yapılan literatür araştırması sonucunda aşağıdaki gibi örnek çalışmalar elde edilmiştir.

Helisel yaylar için özgün bir sonlu elemanlar model oluşturma çalışmasında, eksenel yük altında burulmaya veya uzamaya zorlanan yayda, sınır şartlarını belirleyebilmek için silindirk yay teli kesitinden bir dilim üzerinden modelleme yapılmıştır. Kullanılan analitik denklemlerle, ortalama sargı çapının yay teli çapı oranı ve helis açısına bağlı olarak değişen eş değer gerilme değerleri geleneksel yaklaşımlara göre daha kesin sonuçlar vermiştir [3].

Otomotiv süspansiyon yaylarında meydana gelen hata türlerinin analizi çalışmasında, günümüz otomobil endüstrisinde süspansiyon yaylarında ağırlık azaltma çalışmalarının hız kazandığı belirtilmektedir. Daha önceki yıllarda süspansiyon yaylarının araç çalışma koşuları esnasında maruz kaldığı maksimum gerilmelere, günümüzde daha düşük ağırlıktaki (daha düşük yay teli çapı kullanılması vb.) yaylar maruz kalmaktadır. Bu da yayların kırılması için risk teşkil etmektedir. Yüksek gerilme seviyelerine maruz kalacak yaylar için malzeme ve üretim prosesleri de kritik öneme sahip olmaktadır. Örneğin tavlama prosesinde yay yüzeyinde oluşacak dekarbürizasyon, daha önceki yıllarda önemli bir hata unsuru olarak görülmez iken günümüzde büyük önem taşımaktadır. Yetersiz yük taşıma kapasitelerinde yay tasarımı yapılması, sertleştirme prosesi sonunda yay malzemesinde oluşan çatlaklar, yay hammaddesinin malzeme yapısındaki kusurlar, korozyon ve aşırı dekarbürizasyon gibi hata türleri incelenmiş ve bu hatalar sonlu elemanlar analizi ile modellenmiştir. Yay üreticileri için yaylarda meydana gelebilecek olası hataların analizi için bir klavuz oluşturulmuştur [4].

Ağır vasıta süspansiyon sistemindeki helisel basma yaylarındaki, yayın alt tabağa oturduğu yataklanmış sarımından yaylanan sarıma geçiş bölgesinde meydana gelen kırılmaların nedenlerinin analiz edildiği bir çalışmada, kırılmanın gerilme seviyesinin daha yüksek olduğu yayın iç tarafında gerçekleştiği belirtilmiştir. Elektron tarama mikroskobu ile kopan yüzeyde yapılan incelemelerde, aşınma izinden yayılan çatlağın yay teli kesiti eksenine 45° açı ile yayıldığı ve görsel olarak da kopan yüzeyin yarım ay şeklinde pürüzlü yüzeyler oluşturarak koptuğu görülmüştür. Ayrıca, yataklanmış sarım ile aktif sarımın başlangıcı arasında yay ile tabak arasında, araç çalışma koşullarında yay malzemesini korozyona uğratan

akışkan maddeler girdiği, aşınma ile birlikte boyalı yay yüzeyindeki fosfat tabakasının kalkmasıyla yay yüzeyinden çekirdeğe doğru korozyonun ilerlediği belirtilmiştir. Çalışmada malzemesi 60Si2CrVA ve sertliği 52,3 HRc olan yay örneği üzerinde durulmuştur. Korozyonun önlenmesi için boya prosesinin kalitesinin iyi olması gerektiği vurgulanmış ve yay tasarımında aktif sarım ile yataklanmış sarım arasındaki mesafenin fazla olması gerektiği belirtilmiştir [5].

Soğuk sarılmış otomobil süspansiyon yaylarındaki kalıcı gerilmelerin nötron kırınımı ile ölçümü çalışmasında, yay imalatındaki soğuk sarım, bloklama ve kumlama proseslerinden sonra kalıcı gerilmelerin ölçümü yapılmıştır. Soğuk sarım prosesinde düz yay teli makaralarla burularak sarıldığından, bloklama prosesi sonrası yay basma ve burulma gerilmelerine maruz kaldığından yayda kalıcı gerilmeler oluşmaktadır. Bloklamadan sonra uygulanan kumlama prosesinde yayda kalıcı gerilmeler bir miktar azaltılmaktadır fakat fazla kumlama yayın sertliğini azaltacağından düşük kumlama ise yaydaki kalıcı gerilmeleri yeterince azaltamayacağından dolayı bu proseste optimizasyon uygulanmalıdır. Yayın yorulma ömrünü belirleyen kalıcı gerilmelerin ölçülmesi gerekmektedir bu da yayın geometrik yapısının karmaşık olduğundan dolayı analitik hesap yerine bazı testler ile ölçüm yapılmaktadır. X-Ray kırınımı yönteminde ölçülecek yay sprinin diğer spirler gölge oluşturacağı için kesilmesi gerekmektedir. Fakat nötron kırınım ile yay kesiti kesilmeden kıvılcım ile malzeme işleme ve pnömatik taşlayıcı ile ölçüm yapılabilmekte hem de bu ölçüm metodu ile çok daha küçük 2x2x2 mm hacmindeki kesitlerde ölçüm yapılabilmektedir. Visteon fabrikası'nda soğuk sarım yöntemi ile sarılmış yaylar üzerinde soğuk sarım, bloklama ve kumlama prosesleri sonrasındaki kalıcı gerilmelerin Nötron kırınımı ile ölçümleri yapılmıştır [6].

Helisel basma yaylarının burulması üzerine yapılan bir çalışmada, kısmi diferansiyel denklemler ile yay bitiş uçları ve kesitinde çözüm veren transfer matriks yöntemi kullanılarak kritik yay sarım sayısı numarası ve poisson oranına göre değişen burulma grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerdeki değişkenler kritik burulma sapmasının serbest yay boyuna oranı ile serbest yay boyunun ortalama sargı çapına oranıdır [7].

Otomobillerin motorlarında kullanılan helisel basma valf yaylarının yüksek çevrimli yorulma testlerinin sonuçları üzerine yapılan bir çalışmada, yorulma testinde kullanılan SiCr alaşımlı yay çeliği malzemeli kumlanmış 2 mm tel çapındaki helisel yaylar yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma gerilmesi 10^7 çevriminden

sonra giderek azalmaya başlamıştır. 10^8 çevrim sonucundaki yorulma gerilmesi 10^7' dekine göre yaklaşık %10, $1{,}2x10^9$ çevrim sonucundaki yorulma gerilmesinde ise 10^7'dekine göre yaklaşık %90 azalma olduğu hesaplanmıştır. Yorulma sonucunda yaydaki kırılma bölgeleri elektron mikroskopu taramasıyla incelenmiş ve yay kestindeki çatlak başlangıçları gösterilmiştir [8].

Helisel basma yaylarının çok eksenli yorulma ve hata analizi üzerine yapılan bir çalışmada, sabit yük genliği altında olan helisel yayların tahmini ömürleri üzerine kritik yüzey yaklaşımında bulunan Fatemi-Socie ve Wang-Brown ile kesme deformasyonu temelli Coffin-Manson metotları deneysel olarak yapılan yorulma testinin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Gerilme analizi sonlu elemanlar metodu olarak Ansys programında, çoklu eksenli yorulma çalışması da nCode yazılımında uygulanmıştır. Test sonucu yaydaki yorulma çatlağı başlangıcı bölgesi ile analiz sonucunda yayda oluşan maksimum gerilmenin bölgesinin yakınlığı kıyas kriteri olarak kabul edilmiştir. Çalışmada bahsedilen nümerik yaklaşımlar ile analiz sonuçları kıyas edilerek, nümerik yöntemlerin uygunluğu hakkında sonuçlar verilmiştir [9].

SUP12 yay çeliği malzemesi deneysel ve nümerik araştırması çalışmasında, Japonyo Endüstri Standardına göre, (Japanese Industrial Standard, JIS) SUP12 malzemeli bir helisel yay sonlu elemanlar metodu ile Hyperworks programında analiz edilmiştir. Araç çalışma koşullarındaki yayın durgun aracın statik ağırlığı altındaki boyu (221,1 mm), açılabilecek maksimum boyu (280,9 mm) ve kapanabilecek minumum boylarındaki (114,9 mm) yük değerleri elde edilmiş ve bu değerler müşteri beklentileri ile kıyas edilmiştir. Analizde kullanılan yayın geometrik tel çapı 11,05 mm, ortalama sargı çapı 91,05 mm, sarım sayısı 9,18, yay serbest boyu 308,9 mm'dir. Analize başlamadan önce SUP12 malzemesinden yapılmış çekme testi numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve çekme mukavemeti, akma gerilmesi, uzama oranı, maksimum kuvvet JIS'deki değerler ile kıyaslanıp uygun bulunmuştur. Deneyden elde edilen malzemenin mekanik özellikleri Hyperworks programında kullanılmıştır. Analiz sonucu değerleri ile müşterinin talep ettiği değerler arasında tutarlılık görülmüştür [10].

Helisel basma yaylarının gerilim boşaltmanın yorulmaya olan etkilerinin incelenmesi çalışmasında, soğuk sarılan yaylarda oluşan önemli ölçüdeki plastik şekil değişimler sonucu yay içerisinde oluşan çekme yönündeki kalıcı gerilmelerin yorulmaya olan olumsuz etkileri üzerinde durulmuştur. Isıl işlem prosesleri ile kalıcı

gerilmelerin boşaltılmasıyla yorulma üzerindeki olumlu etkilerinden bahsedilmiştir. Özdeş yaylara, farklı sıcaklık ve sürelerde gerilim giderme tavlaması uygulanarak, yorulma ömrüne olan sonuçları kıyaslanmıştır [11].

Farklı malzemelerden yapılmış helisel basma yaylarınınm yorulma ömürlerinin karşılaştırılması konulu çalışmada, kumlanmış Si-Cr alaşımlı, Si-Cr-V alaşımlı ve paslanmaz çelik malzemeli 1,6 mm ve 3 mm tel çapındaki helisel yayların özdeş yorulma koşullarındaki yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Yayların kırılma bölgeleri elektron mikroskop tarama yöntemi incelenmiş ve sonuçların kıyaslamaları yapılmıştır [12].

İzotropik silindirik helisel yayların gerilme analizi için geliştirilmiş farklı bir sonlu elemanlar metodu çalışmasında, 6 serbestlik dereceli 2 düğüm noktalı 1 adet sonlu eleman kullanarak, tüm yay boyunca gerilme dağılımı sonuçları elde edilebilmiştir. Yaya etki eden kuvvetlerin bileşkesi yaklaşımıyla, bileşke denge denklemleri tam olarak doğrulanmıştır. Bu element ile yayın her bir sarım sayısındaki gerilme değerleri elde edilip grafik halinde gösterilmiştir [13].

Bilgisayar destekli helisel yay tasarımı çalışmasında, Visual basic bilgisayar programında tel çapı, gövde çapı, sarım sayısı değişkenleri ile minumum hacimde yay ölçülendirecek ve girilecek kuvvet değeri ile yaydaki yer değiştirmeyi ve girilecek yer değiştirme değeri ile elde edilecek kuvvet değerini hesaplayan bir program yazılmıştır. Ayrıca ortalama sargı çapının yay teli çapına olan oranı, sabit kuvvet altında yer değiştirmeye göre değişimi ve sabit yer değiştirme altında kuvvete göre değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Ansys programında, yaya yer değiştirme uygulanıp kuvvet değerleri elde edilmiş, analitik olarak hesaplanan yay sabitine yaklaşık yay sabiti değerleri elde edilmiştir [14].

Bilgisayar destekli helisel yay tasarımı ve optimizasyonu çalışmasında, Turbo Pascal programı kullanılarak, belirli tasarım kısıtlayıcıları dikkate alınarak, belirli bir eksenel basma kuvveteine maruz ve ortalama sargı çapı, tel çapı, sarım sayısı değişkenleri belirli bir aralıkta sabit artırımlarla değiştirilerek maksimum enerjiyi veren, minumum yay hacmi veren tablolar elde edilmiştir. Burada tasarım kısıtlayıcıları olarak, uygulanan kuvvet altında tel çapına bağlı olarak malzemenin izin verdiği gerilme değeri, yayın geometrik özelliklerine ve yataklanmasına bağlı olarak uygulanan yük altında burkulma sınırında olup olmadığı, tasarım başlangıcında belirlenen emniyet katsayısı ($1,2 < E_{mn} < 2,5$), sarım oranı ($4 \leq c \leq 12$)

olarak ele alınmıştır. Program ile elde edilen veriler, Marc. Mentat sonlu elemanlar programında simule edilmiştir [15].

Silindirik helisel bir yayın dinamik optimizasyonu çalışmasında, hem geometrik, mekanik hem de dinamik amaç fonksiyonları ve kısıtlar belirlenmiş, optimizasyon algoritmaları kullanılarak yayın dinamik davranışı sayısal metotla modellenmiştir. Dinamik optimizasyon probleminde yay tel çapı, ortalama sargı çapı, aktif sarım sayısı ve helis hatvesi değişkenleri kullanılmıştır. Elde edilen algoritmalar Matlab programında çözülerek yay kütlesi ve onun başlangıç doğal frekansı optimize edilmiştir [16].

Kok bataryalarında yer alan helisel basma yaylarındaki yorulmaya bağlı olarak kırılmış bir yay örneğinin kırılma analizleri yapılmıştır. Kırılma bölgesinde, çatlak başlangıcının nerede başlayıp nereye doğru ilerlediği görsel olarak incelenmiş ve hem X-Ray kırınımı hem de elektron tarama mikroskobu ile kırılan yüzeyde kükürt ve klor bazlı bileşikler bulunduğu tespit edilmiştir. Bu kimyasallar ile kırılma yüzeyi korozyono uğramıştır. Korozyono uğrayan bölgenin hemen yanındaki bir bölgeden parça örneği alınmış ve bu parçanın mikroyapısı ve sertliği incelenmiş olup, ilgili şartnamaelere uygun olduğu görülmüştür. Böylece, yay malzemesinden emin olunmuştur. X-Ray kırınımı ile kırılan yüzeyin kalıcı gerilmeleri ölçülmüş ve yayın sağlam bölgelerinde ölçülmüş değerler ile kıyaslanmıştır. Korozyona uğrayan yüzeyde, korozif tabaka yüzeyden çekirdeğe doğru ilerleyip yay malzemesini ortadan kaldırdığı için bu bölgede basma yönündeki kalıcı gerilmeleri oldukça azaltmıştır. Yorulmaya olumlu yönde etkisi olan basma yönündeki kalıcı gerilmelerin önemi vurgulanmıştır [17].

Yukarıdaki çalışmalar; helisel yayların tasarımı ve optimizasyonu, sonlu elemanlar metodu ile analitik ve/veya nümerik metodlar kullanarak yaya ait bir niceliğin hesaplanması ve optimizasyonu, otomobillerde yaşanmış yay hatalarının imalat ve tasarım kaynaklı nedenlerinin araştırılması, farklı yay malzemelerinin yorulmaya olan etkileri, yaydaki kalıcı gerilmelerin ölçümü yöntemleri ve bu gerilmelerin youlmaya olan etkileri, farklı ısıl işlem koşullarının yorulmaya olan etkileri üzerine yapılmış çalışmalardır. Bu tezin literatüre olan katkısı, helisel yayların üretiminde oda sıcaklığında yapılan bloklama sonrasında yayın boyca uğradığı plastik deformasyon miktarının sonlu elemanlar modeli ile yaklaşık olarak hesaplanmasıdır.

Ayrıca, endüstride helisel yay imalatçılarına yönelik de katkılar sağlamaktadır. Pratik bilgi olarak, otomotiv ana sanayi firması yayı üretmesi için yayın CAD modelini tedarikçi firmaya sunmaktadır. Bu model yayın imalattaki bütün proseslerden geçip bitmiş ürün olarak araca monte edilebilir durumda olan CAD modeldir. Fakat bu model ile tedarikçi firma yay imalatına başlayamaz. Bloklamada yaşanacak boy kaybını, bu tezde önerilen yöntemlerle belirleyip, CAD modeldeki yay boyuna ekleyip, yay sarma prosesine bu eklenmiş yay boyu ile başlaması önerilmektedir. Dolayısıyla, bloklamada kalıcı olarak oluşacak boy kaybı, daha uzun sarılmış yay ile kompanse edilmiş olacak ve üretimde yaşanacak zaman, hurda, proses ve ekipman kayıpları azaltılacaktır.

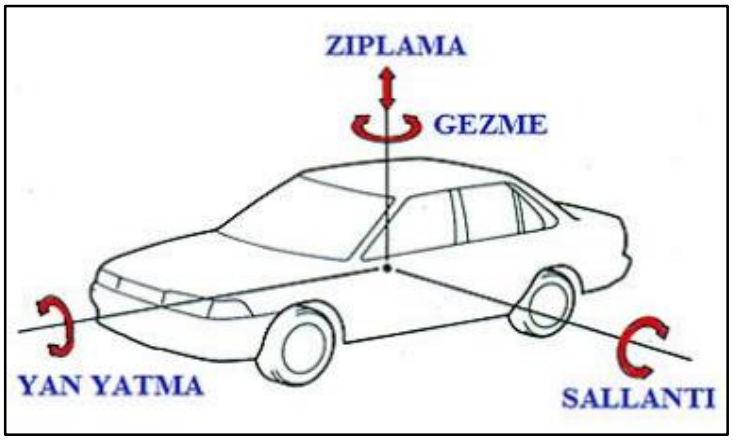
Tezin ikinci bölümünde, yayların araçta yer aldığı süspansiyon sistemi, süspansiyon sisteminde yer alan yayların görevi ve en çok kullanılan yay çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu bölümde helisel yaylar ile ilgili analitik formülasyonlar verilmiş ve bloklama operasyonu hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde oda sıcaklığında yapılan bloklama deneyinin yapılışı anlatılmıştır. Aynı deney şartları ile 100°C ve 200°C sıcaklıklarında bloklama deneyleri yapılıp, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde, oda sıcaklığındaki bloklama deneyi sonlu elemanlar yöntemi ile Ansys programında analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bloklama deneyindeki yayın sarım sayısının ±0,25 ve ortalama sargı çapının ±20 mm'deki değerlerinin kombinasyonları ile yayların CAD modeli Solidworks programında oluşturulup Ansysy programında analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, cevap yüzeyi metodu ile sarım sayısı ve ortalama sargı çapı değişkenlerine bağlı maksimum kuvvet ve plastik deformasyon miktarını veren fonksiyonlar bulunmuştur. Beşinci bölümde, tezde elde edilen sonuçlar maddeler halinde anlatılmıştır.

2. YAYLARIN TEORİSİ

Araç süspansiyon yayları, süspansiyon sisteminin bir elemanı olup, süspansiyon sistemi ile ilgili bilgiler 2.1 başlığında belirtilmiştir.

2.1. Süspansiyon Sistemi

Seyir halinde olan bir araç, yoldan ve havadan gelen bazı kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler, Şekil 2.1' deki gibi araçta bazı salınımlara neden olmaktadır [18].



Şekil 2.1: Araçta meydana gelen süspansiyonlu kütle salınımları.

Bu salınımlar;

- Sallantı

Aracın ağırlık merkezine göre ön ve arkasının aşağı yukarı hareket etmesidir. Bu sallantı özellikle, aracın pürüzlü ve kasisli, çok çukurlu stabilize yollarda kullanıldığı durumlarda meydana gelir.

- Yan Yatma

Bozuk bir yolda araç döndüğünde veya hareket halinde iken aracın bir tarafındaki yay kısalırken diğeri uzamaya başlar. Bunun sonucunda aracın gövdesi bir taraftan diğer tarafa yanal hareketler yapar.

• Zıplama

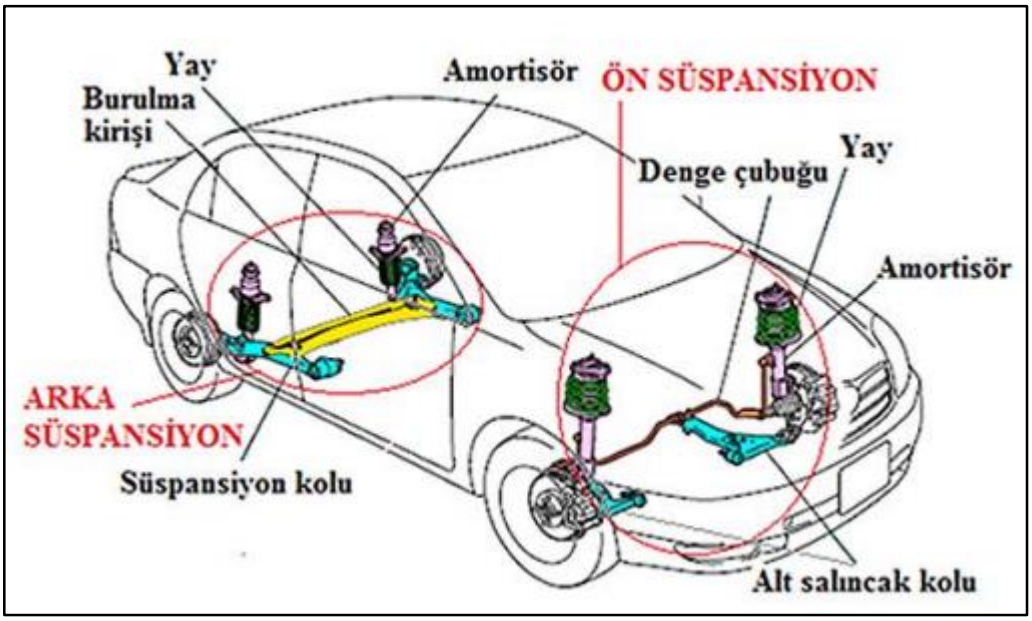
Aracın tümüyle aşağı yukarı hareketidir. Düzgün olmayan yollarda ve tümseklerde yüksek hızlarda araç kullanıldığı zaman meydana gelir.

• Gezme

Aracın ağırlık merkezine bağlı olarak eksenel merkezden sağa ya da sola hareketidir [18].

Araç gövdesi ile tekerlekler arasına yerleştirilen süspansiyon sistemi, yolun yapısından kaynaklanan yukarıda bahsedilen salınımları sönümlemek üzere tasarlanmıştır. Süspansiyon sistemi ile sürüş konforu ve güvenliği artırılmaktadır.

Tekerleklerin araca bağlantısını yapan parçaların tümüne birden süspansiyon sistemi denir. Ön tekerleklerin tekere bağlantısını yapan parçaların tümüne ön süspansiyon adı verilir. Arka tekerlerin araca bağlantısını yapan parçaların tümüne de arka süspansiyon adı verilir. Şekil 2.2' de araçtaki arka ve ön süspansiyon sistemleri ve süspnasiyon sistemi elemanları görülmektedir [18].



Şekil 2.2: Araç üzerinde süspansiyon sistemi.

Süspansiyon sistemi otomobilin ağırlığını taşıdığı gibi lastiklerin yola tutunmasını da sağlamalıdır. Otomobilin yol tutuşu hayati önem taşır; çünkü aracın aktif güvenliği, dengesi ve konforu bu sistemin sağlıklı çalışmasına bağlıdır.

2.1.1 Süspansiyon Sisteminin Görevleri

Süspansiyon sisteminin görevlerini şu şekilde sıralanabilir.

- Çekiş yapan tekerlekler tarafından tahrik kuvvetini aktarmak ve aynı zamanda aksın düzgün konumunu sağlarken her bir tekerlek tarafından yaratılan frenleme kuvvetini araç gövdesine iletmek.
- Sürüş esnasında lastikler ile birlikte çalışarak yolcuları veya taşınan yükü korumak ve sürüş konforunu iyileştirmek amacıyla yol yüzeyinin yapısından kaynaklanan titreşimleri ve ani şokları sönümleyerek yumuşatmak.
- Direksiyon hâkimiyeti ve yönlenme dengesini geliştirmek için sürekli olarak tekerleklerin yol yüzeyindeki bozuklukları izlemesini sağlayarak sürüş esnasında aracı dengelemek.
- Akslar üzerinde gövdeye destek olarak gövde ile tekerlekler arasında uygun geometrik ilişkiyi korur [18].

2.1.2 Süspansiyon Sistemi Elemanları

Standart bir süspansiyon sistemi aşağıdaki temel parçalardan oluşmaktadır. Şekil 2.3'de araç üzerinde bu elemanlar gösterilmiştir [18].

- Amortisörler

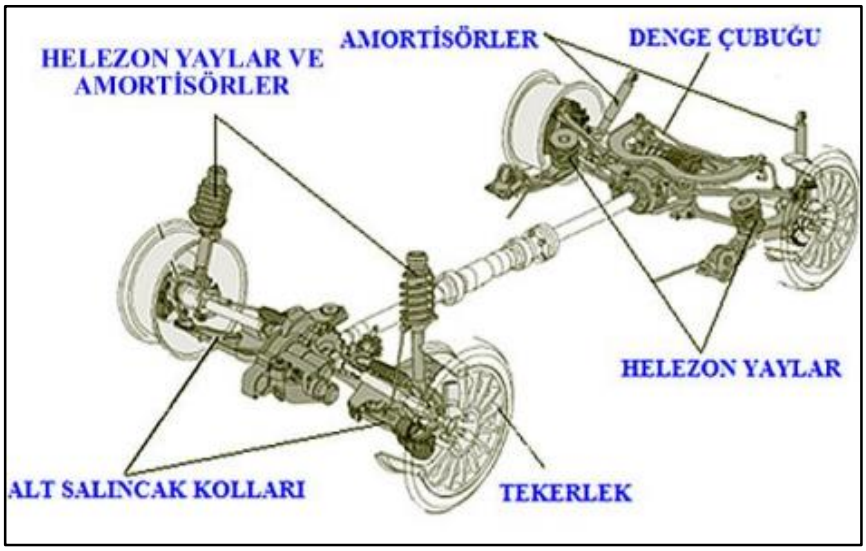
Yayların serbest salınımlarını sönümleyerek veya kontrol altında tutarak konforlu sürüş sağlarlar.

- Yaylar

Yol yüzeyinden alınan sarsıntıları ve darbeleri sönümleyen süspansiyon sistemi elemanlarıdır.

• Denge (Viraj) Çubuğu

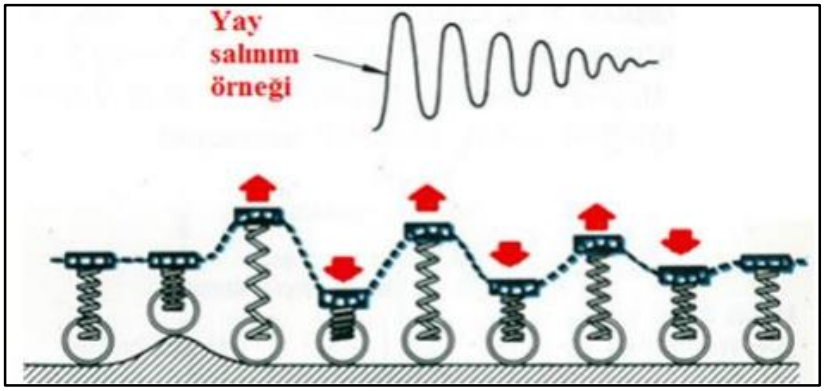
Aracın dönüşü esnasında iç ve dış tekerleklerin farklı eğrilik yarıçapına sahip olur ve oluşan merkezkaç kuvveti ile aracın savrulmamasını sağlar. Denge çubukları dönüş esanasında burulmaya zorlanır [18].



Şekil 2.3: Süspansiyon sistemi elemanları.

2.1.3 Yaylar

Bir aracın şasisi araca bindirilmiş yükü, aktarma organlarını ve motoru taşır. Şasi çerçevesi ise yaylar ve diğer bağlantı elemanları yardımıyla tekerleklere bindirilir. Yaylar tekerlekler ile dingil arasına yerleştirilir. Şekil 2.4' de tümsekten geçen bir araçtaki yayın salınımları gösterilmiştir [18].



Şekil 2.4: Tümsekten geçen bir aracın yay salınımları.

Yaylar enerji depolayan elemanlardır. Seyir halindeki taşıta yoldan gelen darbeler, tekerlekler aracılığı ile çok kısa zaman içerisinde yaylara kinetik enerji olarak iletilir (Şekil 2.4). Yaylar bu enerjiyi sıkışmak suretiyle potansiyel enerji olarak üzerine depolar. Bir süre sonra yaylar, oldukça yavaş bir salınım hareketiyle potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürerek bırakır. Birçok kez tekrar eden bu işleme yay salınımı diyebiliriz. Fakat her bir geri sıçrama bir öncekinden küçüktür aracın sonuçta aşağıya ve yukarıya hareket etmesi durur.

Eğer bu salınım hareketleri kontrol edilemezse, sadece sürüş konforsuzluğuna neden olmayacak, direksiyon hâkimiyetini de olumsuz etkileyecektir. Ortaya çıkan yayların aşırı salınım ve titreşimlerini de amortisörler kontrol altına almaktadır. Böylece yoldan gelen darbeler şasiye geçmeden yay üzerinde sönümlenmiş olur [18].

2.1.3.1 Yayların Görevleri

- Araca ait tüm kuvvetleri kendi üzerine alır.
- Sürüş konforu için yolun darbelerini karşılar ve bu darbeleri sönümleyerek yumuşak titreşimlere dönüştürür.
- Sürüş güvenliği için tekerleklerin yol yüzeyine iyi tutunmasını sağlar [18].

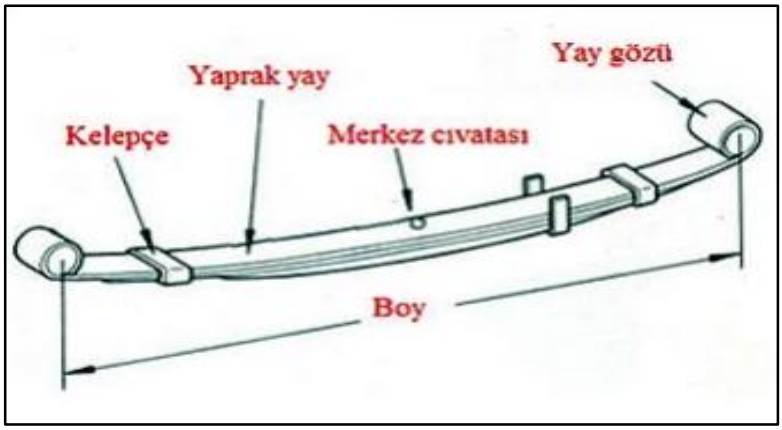
2.1.3.2 Yay Çeşitleri

Yaylar, kullanıldıkları araca, bağlantı yöntemlerine ve yapım şekillerine göre farklı yapısal özelliklere sahip olduğundan, motorlu araçlarda en çok kullanılan yay tipleri aşağıdaki gibidir.

- Yaprak (Makas) yaylar

Yaprak yaylar yassı çelikten bant şeklinde kıvrılarak yapılırlar. Bu şekildeki kalınlık ve genişlikleri aynı fakat boyları farklı olan yapıya Şekil 2.5’ de göserildiği gibi “yaprak” denilmektedir [18].

Uzundan kısaya doğru üst üste beraber demetlenmesiyle oluşur. Yaprakların bu demedi bir merkez cıvatası veya bir perçin ile beraber merkeze bağlanmışlardır. Yaprakların dışarı doğru kaymasını önlemek için de kelepçe ile tutturulmuşlardır. Bu bağlama şekliyle esnemesi durumunda kırılmaz, eğilmeğe zorlanır [18], [19].

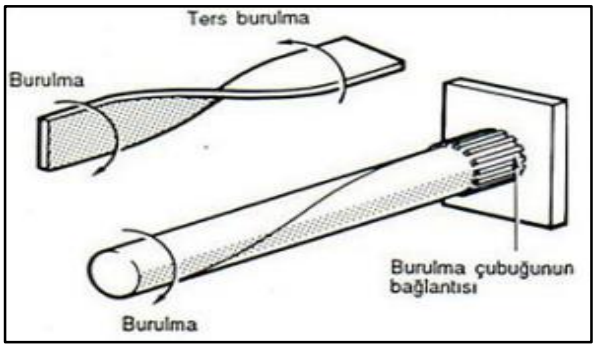


Şekil 2.5: Yaprak yay ve bağlantıları.

Yaprağın her bir kıvrımına büküm denir ve uzun yapraktan kısa yaprağa doğru gittikçe büküm artar. Bir yaprak yay (makas) içindeki fazla miktardaki yapraklar büyük yüklere dayanımı sağlamaktadır. Fakat yaylar sert olacağından sürüş konforu azalmaktadır. Bu nedenle binek otomobillerinde pek tercih edilmeyen yaprak yaylar, çoğunlukla kamyon, kamyonet gibi ağır hizmet tipi araçlarda kullanılmaktadır.

- Burulma çubuklu yaylar

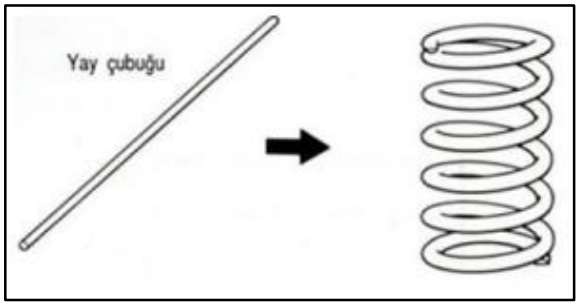
Bükülebilmeye ve burulmaya dayanıklı yay çeliğinden yapılırlar. Çelik çubuğun esnekliği kullanılarak yaylanma hareketi sağlanır (Şekil 2.6, [18]). Basit yapısı ve konforlu bir sürüş sağlaması nedeniyle kullanılır. Çubuğun bir ucu hareketsiz bir şekilde gövdeye, diğer ucu ise dönebilecek serbestlikte alt ya da üst salıncağa bağlanır. Helisel yaylar gibi burulma çubuklu yayların da salınımının kontrol edilmesi gerekmektedir, sürüş konforunun sağlanabilmesi için amortisör kullanımı zorunludur [18].



Şekil 2.6: Burulma çubuğu.

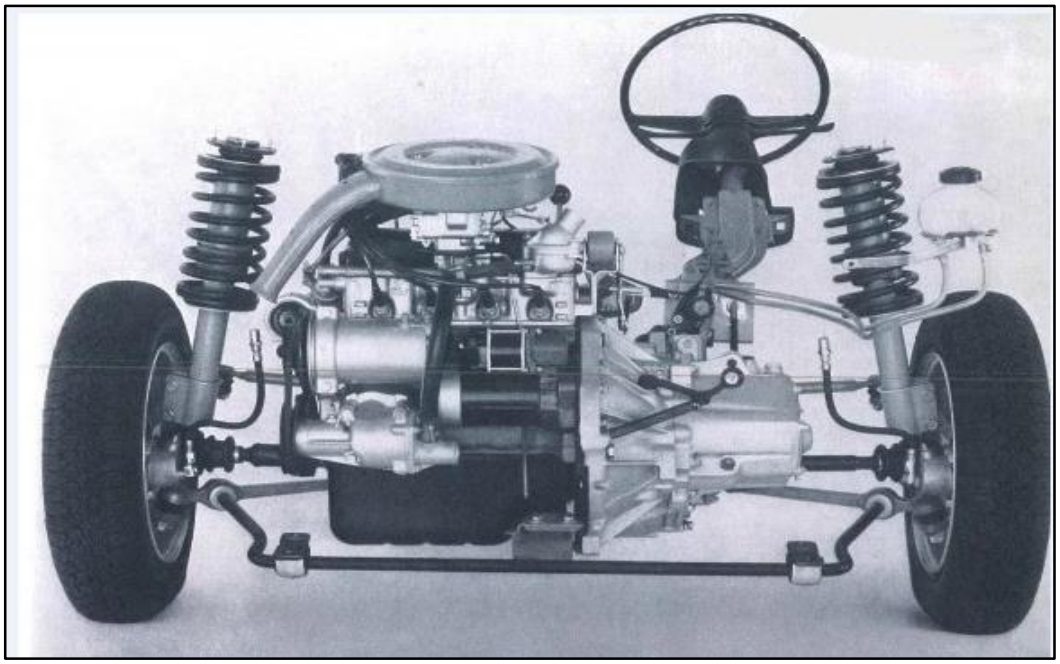
- Helisel (Helezon) yaylar

İnce bir çubuk yayın (telin) bir silindir etrafına sarılmasıyla helisel yay elde edilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Helisel yay.

Helisel yaylar, otomobillerde en çok kullanılan yaylardır. Çeşitli çaplarda yaylar, farklı yay karakteristikleri elde etmek mümkündür, yaylanma miktarı da diğer yay tiplerine göre daha büyüktür. Kullanılan malzemenin metalik, özellikle de çelik olması sürtünmenin olmaması nedeniyle sönümleme oranı çok küçüktür. Son yıllarda kompozit malzemeden üretilen yaylar otomobillerin süspansiyon sistemlrinde yerini almaktadır. Örneğin Audi A6 Avant serisinde kompozit yay kullanımıştır. Şekil 2.8' de helisel yayların araçtaki konumu gösterilmiştir [1].



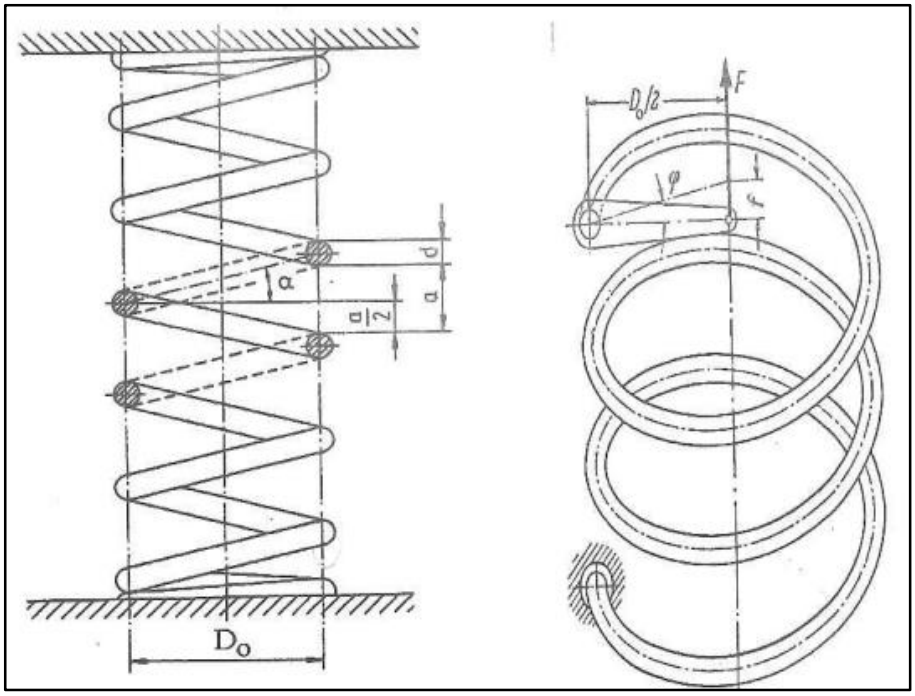
Şekil 2.8: Helisel yayların araçtaki görünümü.

Helisel yayların özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Birim ağırlığa düşen sönümleme gücü yaprak yaylara göre daha büyüktür, az yer kaplar ve bakım gerektirmez.
- Yapımı kolay ve yumuşak yaylar imal edilebilir.
- Yaprak yaylar gibi yaprak içi sürtünme olmadığından, yayların kendi salınımlarının kontrolüne gerek yoktur. Ancak amortisörlerin kullanılması zorunludur.
- Yayların yanal kuvvetlerde direnci olmadığından, aksı destekleyecek yanal bağlantı elemanları gereklidir [18], [19].

2.2. Helisel Yaylar İle İlgili Analitik Formülasyonlar

İnce bir çubuk telin bir silindir etrafına sarılmasıyla Şekil 2.9'daki gibi helisel yay elde edilir [18].



Şekil 2.9: Silindirik Helisel Yay.

- Yay telinin çapı: d
- Sargının ortalama çapı: D_0
- Sarımlar arası boşluk: a

Sarımın eksenel kesitte görülen helis açısı: α 2.1 eşitliği ile hesaplanır.

$$tg\alpha = \frac{a + d}{2 * \ D_0} \tag{2.1}$$

Helisel yaya ekseni doğrultusunda F kuvveti gelse, kuvvetten $D_0/2$ kadar uzakta bulunan tel kesitinde (ortalama sargı çapı her sarımda sabit olan yaylarda tüm kesitler kuvvetten D_0 / 2 kadar uzaktadır.) Şekil 2.10'daki gibi F kuvvetinin yatay bileşeni Fy ve dikey bileşeni Fd kuvvetlerinden dolayı burulma gerilmesi, eğilme gerilmesi, kesme gerilmesi ve nomal bası gerilmesi oluşur [19]. Bu gerilmeler 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5 eşitliklerindeki gibi hesaplanır.

$$Burulma: \tau = \frac{Mb}{Wp} = \frac{F * cos\alpha * (\frac{\mathrm{Do}}{2})}{\pi * (\frac{d^3}{16})} \tag{2.2}$$

- M_b: Burulma momenti
- W_p: Polar mukavemet momenti

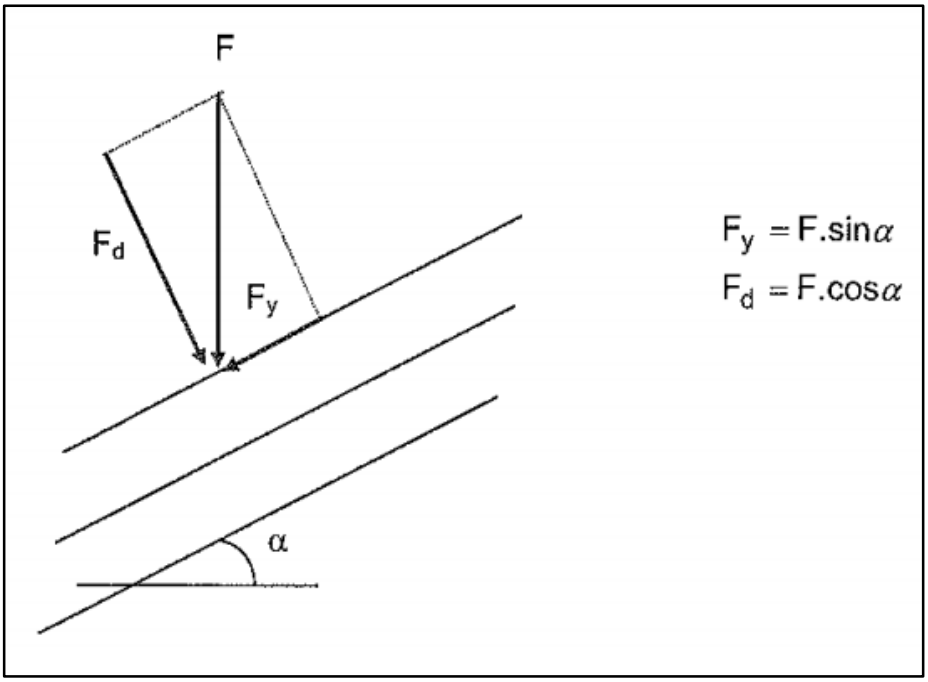
$$Eğilme: \sigma e \ = \frac{Me}{We} = \frac{F * sin\alpha * (\frac{Do}{2})}{\pi * (\frac{d^3}{32})} \tag{2.3}$$

- M_e: Eğilme momenti
- W_e: Eksenel mukavemet momenti

$$Kesme: \tau k = \frac{F * cos\alpha}{\pi * (\frac{d^2}{4})} \tag{2.4}$$

$$Bası\ (Normal): \sigma = \frac{F * sin\alpha}{\pi * (\frac{d^2}{4})} \tag{2.5}$$

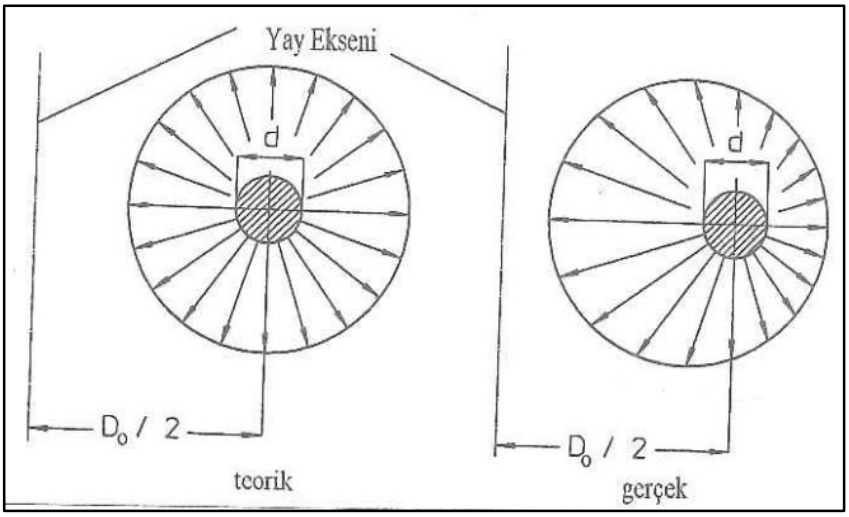
Şekil 2.11'de α helis açısındaki yayın ekseni doğrultusunda gelen F kuvvetinin yayr sarımına göre yatay ve dikey bileşenleri gösterilmiştir [19].



Şekil 2.10: Yaya gelen kuvvetin bileşenleri.

Helis açısı α küçük olduğundan sin α ≈ 0 ve cos α ≈ 1 alınabilir. Bu durumda eğilme ve bası gerilmelerinin ihmal edilebilecekleri görülür. Tel ince uzun bir çubuk gibi düşünüldüğünde kesme gerilmeleri de burulma gerilmesinin yanında ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu yaklaşımlar sonucunda helisel yaylar, literatürde burulmaya zorlanan yaylar sınıfına dâhil edilir. Burulma gerilmesinin yayın çevresine eşit dağıldığında varsayılan ideal haldeki değeri, eşitlik 2.6' daki gibidir [1], [19].

$$\tau i = \frac{Mb}{Wp} = \frac{F * \left(\frac{\mathrm{Do}}{2}\right)}{\pi * \left(\frac{d^3}{16}\right)} = \frac{8 * F * \mathrm{Do}}{\pi * d^3} \tag{2.6}$$



Şekil 2.11: Yay kesitinde oluşan gerilme.

Yayın eğiminden dolayı bu dağılım eşit olmayıp, iç tarafta dışarıya göre çok daha fazladır [1], [2], [19]. Şekil 2.11' de yay kesitinde teorik ve gerçek durumlarında oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir. İç taraftaki en büyük burulma gerilmesinin hesabı 2.7 eşitliği ile ile hesaplanır [1], [19].

$$\tau\, maks \;= k * \tau i = \frac{8 * k * F * \mathrm{Do}}{\pi * d^3} \tag{2.7}$$

Faktör k, sarım oranı $w^2 = D_0 \;/\; d$ 'nin bir fonksiyonudur [19].

$$k = 1 + \frac{5}{4} * \frac{1}{w} + \frac{7}{8} + \frac{1}{w^2} + \frac{1}{w^3} \tag{2.8}$$

Yaylanma miktarı (s) 2.9 eşitliğindeki gibi hesaplanır [19].

- s = Yaylanma miktarı
- $\dot{I}_y$ = Yaylanan sarım sayısı
- G = Kayma modülü

$$s = \frac{8 * F * \dot{I}y * Do^3}{G * d^4} \tag{2.9}$$

Yay rijitliği (c) 2.10 eşitliğindeki gibi hesaplanır [19].

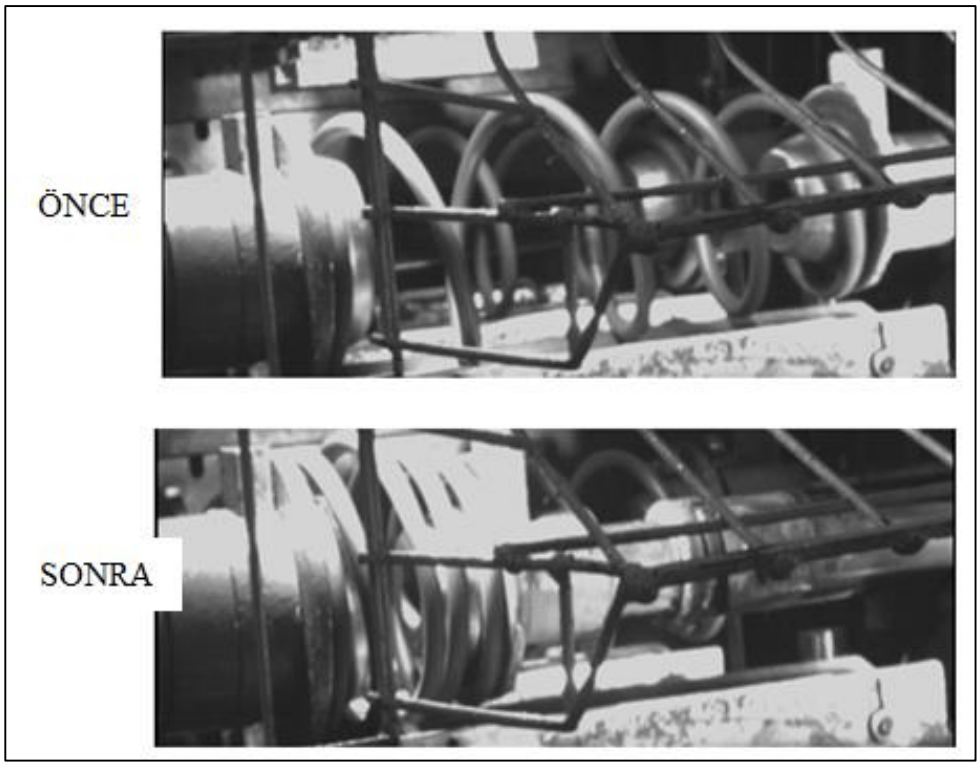
$$C = \frac{F}{S} = \frac{G * d^4}{8 * İy * Do^3} \tag{2.10}$$

Yukarıda bahsedilen gerilme, yaylanma miktarı ve yay rijitliği ile ilgili formülasyonlar, yaya etki eden kuvvetlerin yay malzemesine göre elastik deformasyon bölgesinde yani malzeme akma gerilmesinin altında oluşan gerilmeler neticesinde geçerlidir. Akma bölgesinde dışında gerçekleşen gerilmeler, yayda plastik deformasyonlara neden olacağı için bu bölgede, yukarıdaki analitik formülasyonlar geçerli değildir. Plastik deformasyonu incelemek için 5.1 başlığında açıklanan sonlu elemanlar metodu ile modelleme yöntemi kullanılmıştır.

2.3. Helisel Yayların Bloklanması

Yay imalatında, öncelikle çubuk şeklindeki yay çeliği malzemeli ham maddeler tel çaplarına göre soğuk veya sıcak sarım prosesleri ile plastik şekil verme ile helisel yay şekline getirilir. Tel çapı 10 mm'den küçük yaylar soğuk şekillendirilir, çap 20 mm'den büyük ise sıcak şekillendirilir. Aradaki tel çaplarında her iki yöntem de uygulanabilir. Daha sonra yaylar ısıl işleme tabi tutulur. Tavlama-sertleştirme - menevişleme ısıl işlem proseslerinden geçen yaylara uygun sertlik ve mikro yapı kazandırılır ve yaylar bloklama prosesine tabi tutulur [1], [2], [19].

Yayın, durağan bir araçtaki sadece araç gövde ağırlığını taşıdığındaki yay boyuna design, araç çalışma koşullarında yayın açılabilebileceği maksimum boya rebound, kapanabileceği minumum boya da jounce boyu denir. Bloklama prosesinde yay, araç çalışma koşullarındaki kendi jounce boyunun da altındaki bir boya biri itici silindir ile sıkıştırılır ve sonra silindir geri çekilerek yay seserbest bırakılır. (Şekil 2.12'de bir helisel yayın bloklama operasyonundan önceki durum ve blok anı görülmektedir.) Sıkıştığı boy, yay sarımlarının birbiri üzerine temas etttiği blok boyu veya blok boyuna yakın bir boydur. Yay, bu blok boyuna sıkıştıktan sonra plastik deformasyona uğrar ve serbest bırakıldığı boy, bloklamadan önceki boyuna göre daha kısadır, yay sarımları arasındaki mesafeler kısalmıştır.



Şekil 2.12: Yayların bloklanması.

Bu plastik deformasyondaki amaç ise, yayın araç çalışma koşullarında maruz kalacağı bası kuvvetlerinden sonra geri yaylanma sonucunda herhenagi bir boy kaybına uğramaması, yani yay boyunda kalıcı boy kaybı (çökme) meydana gelmemesi içindir. Eğer yay boyunda bir çökme olursa, aracın yere göre olan gövde yüksekliğinde azalma olacak, sürüş konforu azalacaktır. Yay, araca monte edilmeden önce henüz imalat aşamasındayken, araçtaki tüm çalışma ömrü boyunca uğrayabileceği maksimum kuvvetten daha büyük bir kuvvete maruz kalır. Bundan sonra, araç seyir esnasında yayın uğrayacağı kuvvetler yayda elastik deformasyonlara sebebiyet verecektir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

60SiCr7 yay çeliği malzemeli ve 52 HRc sertliğe sahip, sargı çapı her sarım sayısından aynı düz bir helisel yay bloklama işlemine tabi tutulmuştur. Bloklama işlemine başlamadan önce, deney yayı malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için yay malzemesi ve sertliğine eş çekme testi deney numunesine çekme testi uygulanıp, gerilim-gerinin grafiği elde edilmiştir. Benzer yaklaşım SUP12 yay çeliği malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır [10].

3.1. Deney Yayının Malzemesinin Mekanik Özellikleri

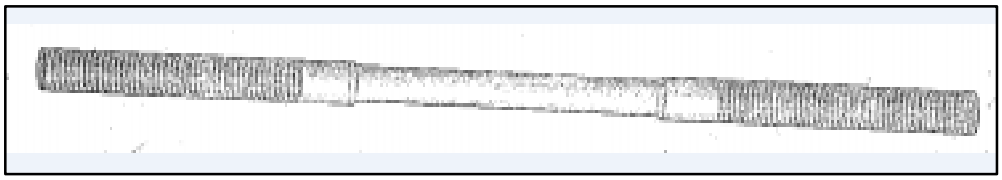
Deney yayına özdeş 60SiCr7 yay çeliği malzemeli 52 HRc yüzey sertliğine sahip temperlenmiş martenzit mikro yapısında ve Tablo 3.1' deki gibi kimyasal bileşime sahip olan, deney yayına özdeş özelliklerde 10 mm çapında ve toplam 360 mm boyundaki çekme testi deney numunesi Zwick marka 250 Z modelindeki çekme-basma test cihazında EN ISO 6892-1 metalik malzemelerin çekme deney standardına göre çekme testi uygulanmıştır. Test, oda sıcaklığında 10 mm/dk çekme hızı ile yapılmıştır.

Tablo 3.1: Deney yayı malzemesinin alaşımlarının yüzde kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	V
0,59	1,605	0,811	0,012	0,012	0,128	0,282	0,004

Mo	Sn	Ni
0,031	0,016	0,088

Deney öncesi çekme testi numunesi görünümü Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1: Çekme testi numunesi.

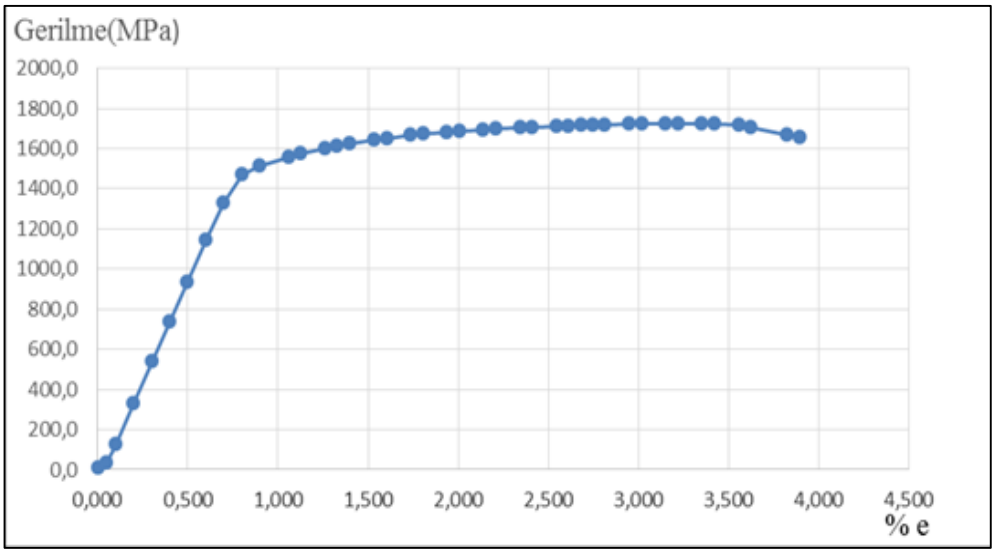
- Çubuk çapı: $d_o = 10$ mm
- Aktif çubuk uzunluğu: $l_0 = 110$ mm
- Kesit alanı: $s_0 = (\pi * d_o^2) / 4 = 78{,}54$ mm^2

Çekme testi esnasında, cihazdan alınan gerilme ve gerinim değerleri aşağıdaki Tablo 3.2' deki gibidir.

Tablo 3.2: Deney yayı malzemesinin gerilme - gerinim değerleri.

Gerinim (%)	Gerilme(MPa)
0,004	11,4
0,050	35,0
0,100	124,5
0,200	327,2
0,300	539,6
0,400	736,5
0,500	936,6
0,600	1142,4
0,700	1329,1
0,800	1471,5
0,901	1514,6
1,061	1559,3
1,128	1576,5
1,262	1602,2
1,330	1613,9
1,399	1624,9
1,535	1643,5
1,604	1651,8
1,737	1665,6
1,806	1671,8
1,939	1682,0
2,008	1686,6
2,141	1694,4
2,210	1698,0
2,343	1703,9
2,410	1706,5
2,545	1711,2
2,614	1713,2
2,681	1715,1
2,747	1716,6
2,814	1718,1
2,949	1720,4

Tablo 3.2' deki değerler ile Şekil 3.2'deki gibi gerilme – gerinim grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 3.2: Deney yayı malzemesinin gerilme - gerinim grafiği.

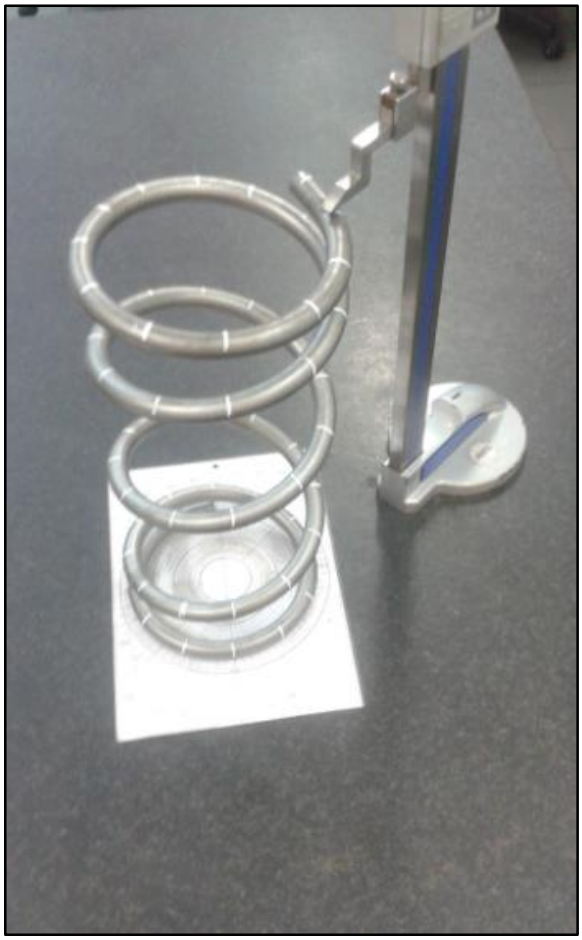
Deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 3.3'deki gibidir.

Tablo 3.3: Çekme testi sonuç değerleri.

Elastiste Modülü (kN / mm2)	Toplam Yük (kN)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Kopma uzaması
E = 216,7	135,14	$\sigma_{0.2}$= 1523,1	σçekme = 1720,7	% e kopma = 2,949

3.2. Deney Yayının Boyutsal Özellikleri

17 mm çapında çelik ham madde sıcak sarım ortalama sargı çapı 163,5 mm ve toplam sarım sayısı 4,82 olacak şekilde sarılmıştır. Tavlama, yağda setleştirme ve menevişleme ısıl işlem proseslerinden geçen yay, düz bir oturma yüzeyine oturtularak mihengir ölçü alet ile Tablo 3.4' deki gibi sarım sayılarına karşılık gelen yay yükseklik değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.3' deki gibi, yay üzerinde çap ve açı değerleri bulunan bir şablona oturtulmuş ve yay dış çapı ve sarım sayısı şablon üzerindeki uygun yere denk getirilecek şekilde ölçüm gerçekleştirilmiştir.

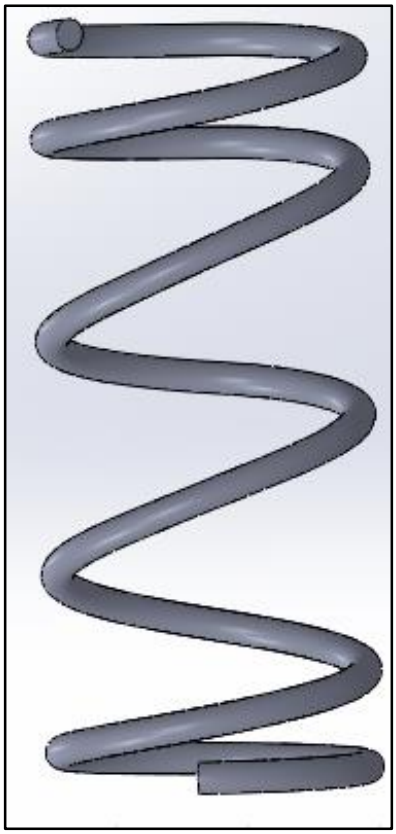


Şekil 3.3: Deney yayının boyutlandırılması.

Tablo 3.4: Deney yayının sarım sayısı - yay yüksekliği değerleri.

Sarım Sayısı (n)	Yay yüksekliği (mm)
0,583	22,83
1	42
2	162
3	292
4	392
4,583	425
4,82	430

Ölçüm sonrası elde edilen değerler ile Şekil 3.4' de görüldüğü gibi deney yayının Solidworks programında (Solidworks 2012) cad datası oluşturulmuştur.

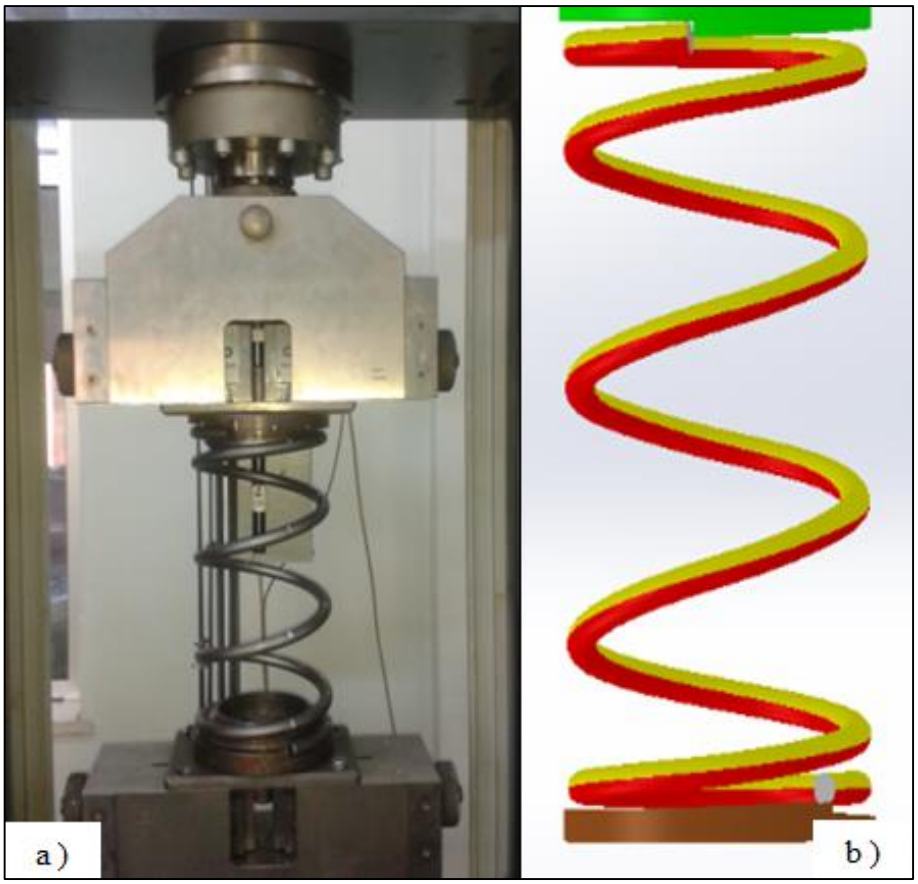


Şekil 3.4: Deney yayının CAD modeli.

3.3. Deneyin Yapılışı

Bloklama deneyinde yayın başlangıç ve bitiş çaplarının oturduğu yay tabakları kullanılmıştır. Bu tabaklar Şekil 3.5' de görüldüğü gibi yayı, yay başlangıç ve bitiş sarımlarından 210 dereceye kadar yay helis açısı ile özdeş olacak şekilde sarmaktadır.

Deney oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney, 3.1 başlığında belirtilen çekme testi numunesinin çekme testinin yapıldığı Zwick marka 250 Z model çekme - basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyde, 430 mm boyundaki helisel yayı 110 mm'ye sıkıştırılıp, sıkıştırıldaktan sonra serbest bırakılmıştır. Basma işlemi yaklaşık 45 sn, serbest bırakma işlemi yaklaşık 40 sn sürmüştür. Toplam deney süresi 85 sn'dir. Deney esnasında, cihaza girilen 320 mm'lik yer değiştirme değerine karşılık, yay boyunun konumu ve bu konuma karşılık elde edilen kuvvet değerleri cihazdan alınmıştır.



Şekil 3.5: a) Deney yayının tabaklara montaj halinin görünümü, b) Montajın CAD modeli.

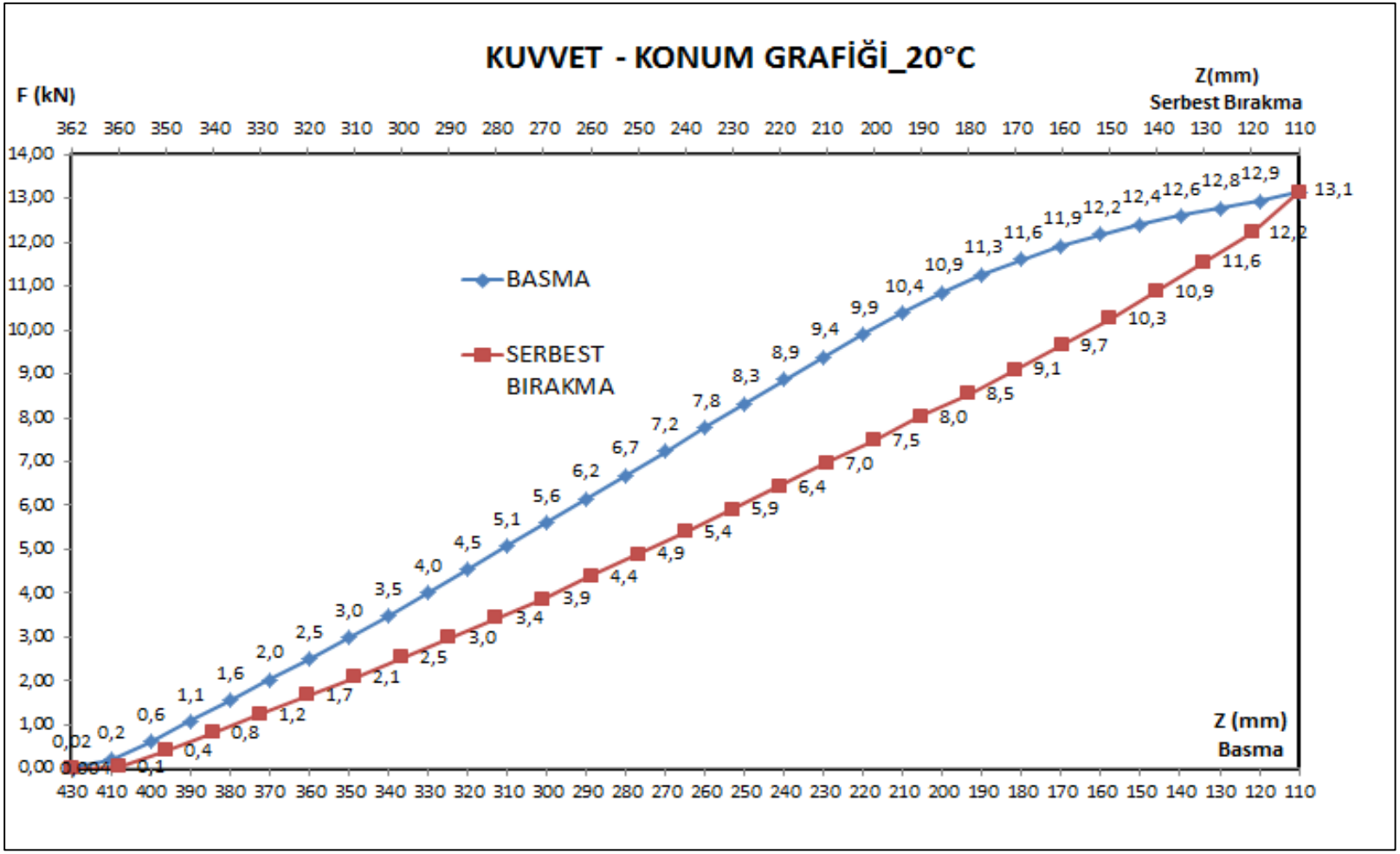
3.4. Deney Sonuçları

Deney sonucundan, cihazdan Tablo 3.5' deki gibi yay boyu - kuvvet değerleri elde edilmiş ve bu değerler Şekil 3.6'daki gibi grafikte gösterilmiştir.

Tablo 3.5: Deney sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.

BASMA		**SERBEST BIRAKMA**	
F (N)	z (mm)	F (N)	z (mm)
21,7	430,2	12223,7	120,3
198,7	415,1	11551,2	130,1
614	400,3	10889,9	140,1
1081	390,1	10255,8	150,1
1552,2	380,1	9659,6	160,1
2024,6	370,1	9099,3	170,1
2502,6	360,1	8549,7	180,3
2983,6	350,1	8022,2	190,1
3466,8	340,3	7489,2	200,1
4010,9	330,1	6960,8	210,1
4545,2	320,1	6434,6	220,1
5082,9	310,1	5911,4	230,3
5617,2	300,1	5403,1	240,1
6152,8	290,1	4892,3	250,1
6691,8	280,1	4386,1	260,1
7232,9	270,1	3874,9	270,3
7777,4	260,1	3427,5	280,1
8317,7	250,1	2976,8	290,1
8859,7	240,1	2527,4	300,3
9389,3	230,1	2097,1	310,1
9901	220,1	1670,7	320,1
10398,2	210,1	1243,4	330,1
10851,9	200,1	823	340,1
11260	190,1	417	350,1
11613,1	180,1	53,7	360,1
11918	170,1	3,8	362,3
12179,8	160,1		
12402,4	150,1		
12597,7	140,2		
12773,8	130,1		
12940,1	120,1		
13138,8	110		

Deney öncesinde boyu 430 mm olan helisel yay, 110 mm boyuna sıkıştırılıp serbest bırakıldıktan sonra yaklaşık 362 mm boyuna kadar geri yaylanabilmiştir. Yayın, 110 mm’de elde edilen kuvvet değeri de yaklaşık 13,1 kN’dur.

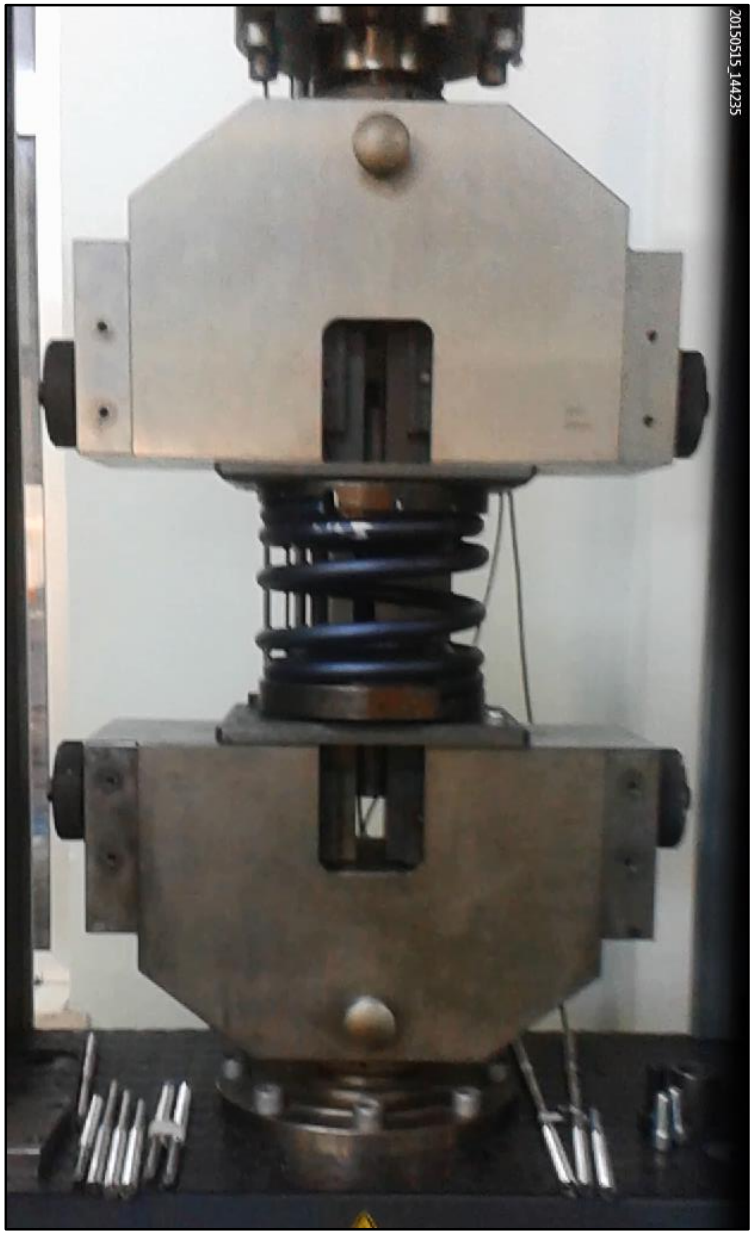


Şekil 3.6: Deney sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.

3.5. Deneyin Farklı Sıcaklıklarda Yapılması

440°C sıcaklığında doğalgaz ile çalışan ısıl işlem fırınında menevişlenen yaylar, sıcak haldeyken alınıp ısı geçişine yalıtılmış bir ortamda deneyin gerçekleşmesine imkân olmadığı için Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görüldüğü gibi oda sıcaklığındaki deney ortamına alınmıştır. Sürekli olarak yay üzerinden rastgele noktalardan el pirometresi ile sıcaklık ölçümleri alınmış ölçülen değerler 200 ± 20°C aralığında olduğunda deney başlatılmıştır. Bir başka özdeş yay ile 100 ± 20°C aralığında iken deneye başlanmıştır. Yayın oda sıcaklığındaki alt ve üst tabaklarına temas halindeki başlangıç ve bitiş sarımlarındaki soğuma hızı yayın diğer bölgerlerine göre daha hızlı gerçekleşmiştir.

Şekil 3.7: Meneviş fırınından alınmış bir helisel yayın bloklama deneyine başlamadan önceki görünümü.



Şekil 3.8: Meneviş fırınından alınmış bir helisel yayın bloklama deneyi esnasında blok boyuna yakın bir boydaki görünümü.

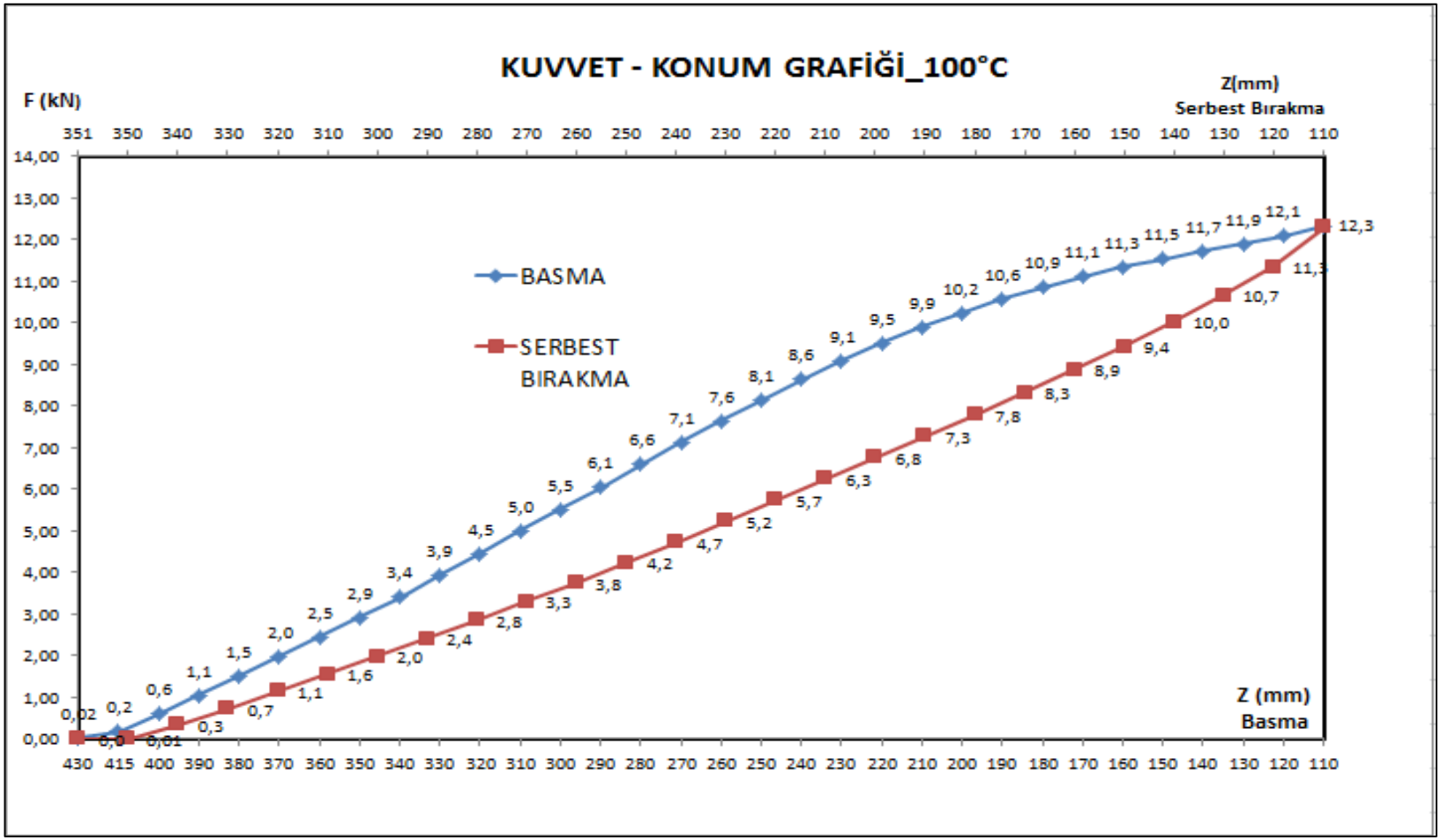
100°C'de gerçekleştirilen bloklama deneyinden elde edilen yay boyu – kuvvet değerleri Tablo 3.6' daki gibidir.

.

Tablo 3.6: 100°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.

BASMA		**SERBEST BIRAKMA**	
F (N)	z (mm)	F (N)	z (mm)
21,7	430,2	12223,7	120,3
198,7	415,1	11551,2	130,1
614	400,3	10889,9	140,1
1081	390,1	10255,8	150,1
1552,2	380,1	9659,6	160,1
2024,6	370,1	9099,3	170,1
2502,6	360,1	8549,7	180,3
2983,6	350,1	8022,2	190,1
3466,8	340,3	7489,2	200,1
4010,9	330,1	6960,8	210,1
4545,2	320,1	6434,6	220,1
5082,9	310,1	5911,4	230,3
5617,2	300,1	5403,1	240,1
6152,8	290,1	4892,3	250,1
6691,8	280,1	4386,1	260,1
7232,9	270,1	3874,9	270,3
7777,4	260,1	3427,5	280,1
8317,7	250,1	2976,8	290,1
8859,7	240,1	2527,4	300,3
9389,3	230,1	2097,1	310,1
9901	220,1	1670,7	320,1
10398,2	210,1	1243,4	330,1
10851,9	200,1	823	340,1
11260	190,1	417	350,1
11613,1	180,1	53,7	360,1
11918	170,1	3,8	362,3
12179,8	160,1		
12402,4	150,1		
12597,7	140,2		
12773,8	130,1		
12940,1	120,1		
13138,8	110		

Tablo 3.6'daki değerler ile oluşturulmuş yay boyu-kuvvet grafiği Şekil 3.9' daki gibidir.

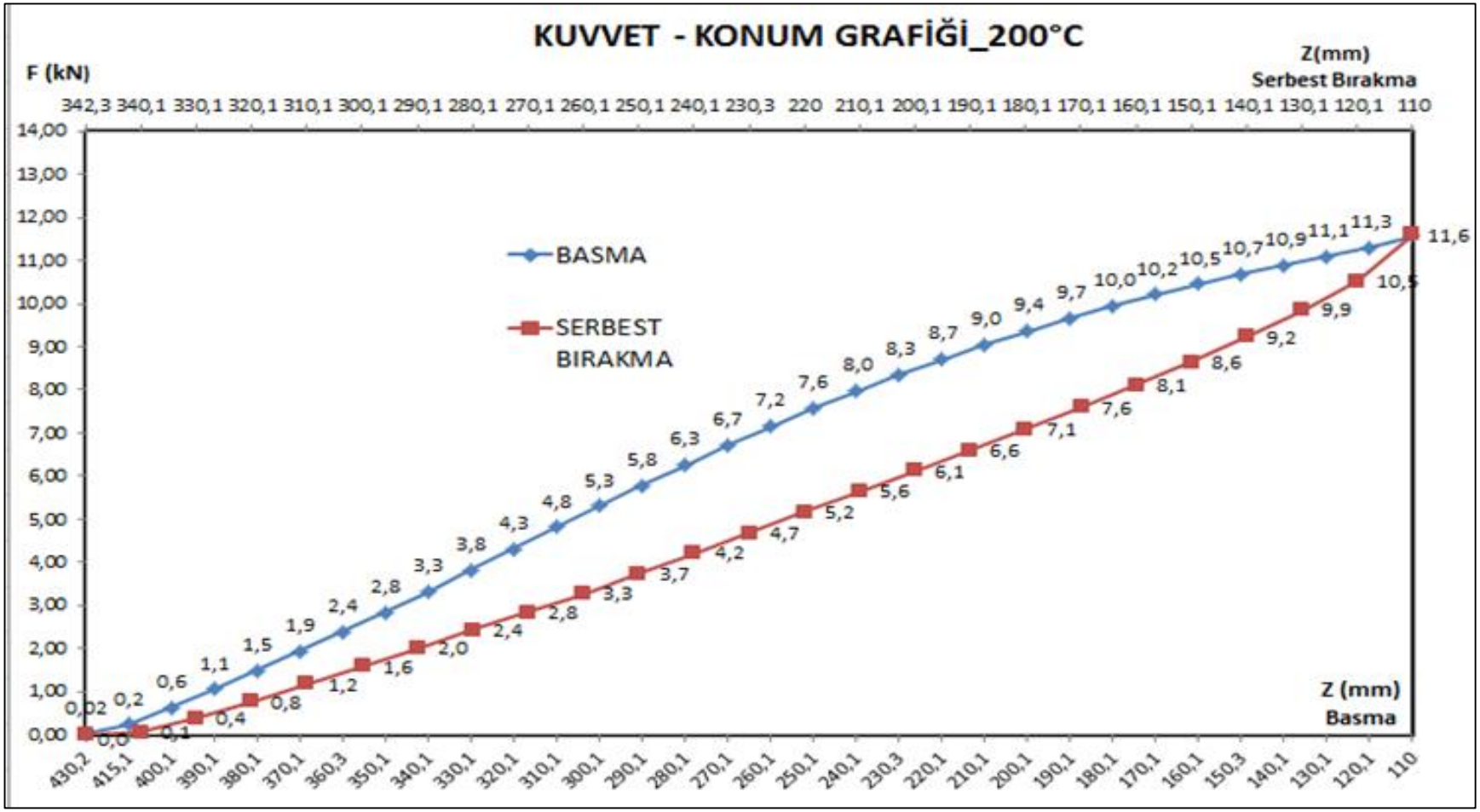


Şekil 3.9: 100°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.

200°C'de gerçekleştirilen bloklama deneyinden elde edilen yay boyu –kuvvet değerleri Tablo 3.7' deki gibidir. Bu değerler ile oluşturulmuş yay boyu-kuvvet grafiği Şekil 3.10'daki gibidir.

Tablo 3.7: 200°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu (z) - kuvvet değerleri.

BASMA		**SERBEST BIRAKMA**	
F (N)	z (mm)	F (N)	z (mm)
22,6	430,2	10527	120,1
239,2	415,1	9856,7	130,1
626,4	400,1	9232	140,1
1057,1	390,1	8639,7	150,1
1497,2	380,1	8102,4	160,1
1940,6	370,1	7595,4	170,1
2384,5	360,3	7097,3	180,1
2843,8	350,1	6606,1	190,1
3308,6	340,1	6121,2	200,1
3813	330,1	5643,2	210,1
4317,1	320,1	5167,8	220
4816,4	310,1	4681,2	230,3
5307,2	300,1	4210,5	240,1
5792,5	290,1	3736,3	250,1
6261,9	280,1	3274,5	260,1
6719,1	270,1	2847,2	270,1
7161,7	260,1	2423,3	280,1
7583	250,1	2002,5	290,1
7973,2	240,1	1587,1	300,1
8347,6	230,3	1179,5	310,1
8711,7	220,1	775,2	320,1
9049	210,1	391,4	330,1
9366,3	200,1	55,9	340,1
9672	190,1	0	342,3
9950,5	180,1		
10210,2	170,1		
10451,9	160,1		
10678,4	150,3		
10895,4	140,1		
11101,8	130,1		
11295,8	120,1		
11560,2	110		



Şekil 3.10: 200°C'de yapılan deneyin sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet grafiği.

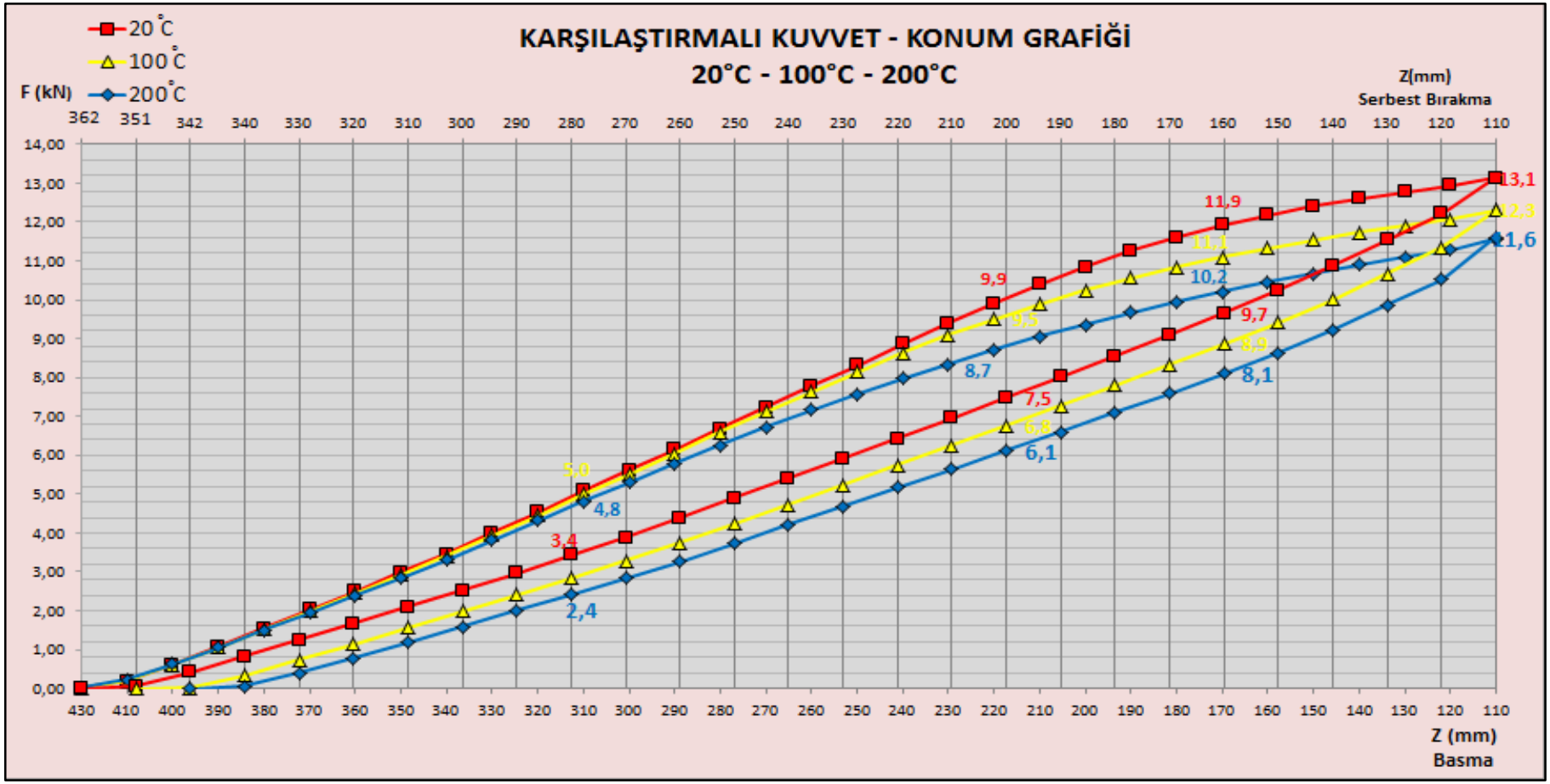
Deneyden önce 430 mm boyundaki yay 110 mm'ye sıkıştırıldıktan sonra yaklaşık 342 mm'ye kadar geri yaylanabilmiştir. 88 mm kadar boyca plastikdeformasyona uğramıştır. 110 mm'de elde edilen kuvvet değeri yaklaşık 11,5 kN'dur.

3.6. Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Deneylerin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Oda sıcaklığı olan 20°C, 100°C ve 200°C'de yapılan bloklama deneylerinde, sıcaklık arttıkça 110 mm'deki yay boyundaki kuvvet değeri düşmekte ve geri yaylanma miktarı düşmekte yani plastik deformasyon miktarı artmaktadır. Yay imalatında, artan sıcaklıkla plastik deformasyon miktarı arttığından dolayı, yayların sıcak halde bloklanması tercih edilmektedir. Aracın çalışma koşullarındaki (ortam sıcaklığı da dikkate alınarak) sıcaklığın da çok üzerinde bir sıcaklıkta bloklama işleminin yapılması da plastik deformasyon açısından emniyet sağlamaktadır. Her üç durum için de 110 mm'de elde edilen maksimum kuvvet ve boyca plastik deformasyon miktarları Tablo 3.8' de ve Şekil 3.11'deki gibi karşılaştırmalı grafik şeklinde verilmiştir.

Tablo 3.8: Farklı sıcaklıklarda yapılan bloklama deneylerindeki F_{maks} ve plastik deformasyon (ΔL) değerleri.

	20°C	100°C	200°C
F_{maks} (kN)	13,1	12,3	11,5
ΔL (mm)	68	80	88

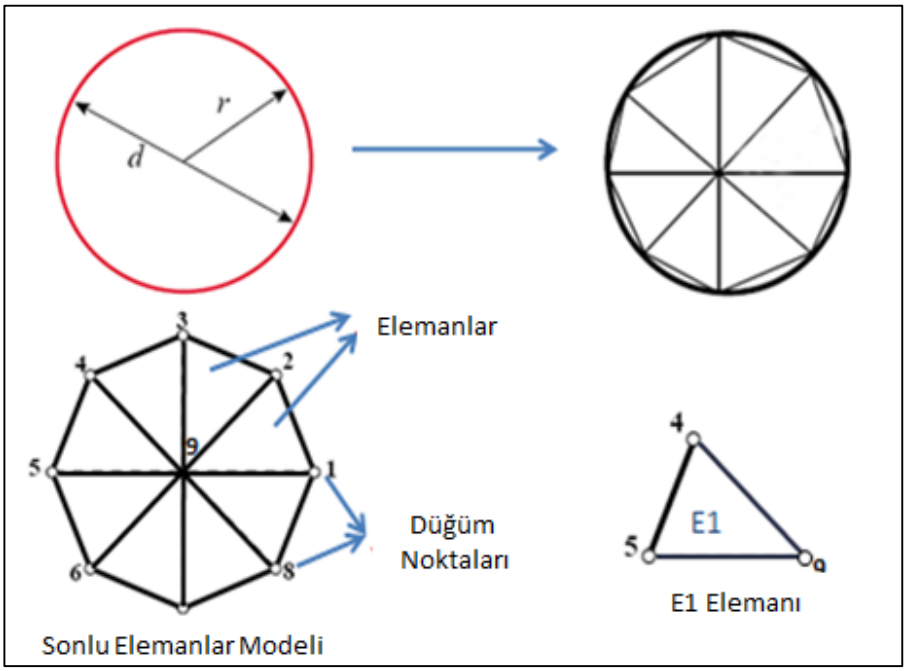


Şekil 3.11: Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerin sonucunda elde edilen yay boyu - kuvvet değerlerinin karşılaştırmalı grafiği.

4. SONLU ELEMANLAR MODELİ ve ANALİZİ

Sonlu elemanlar metodu, analitik olarak çözümü münkün olmayan karmaşık mühendislik problemlerini daha basit alt problemlere indirgeyerek her birini kendi içinde çözümlemesini sağlayarak tam çözüme veya yaklaşık çözüme ulaşmayı sağlayan nümerik bir yöntemdir. Bu yöntem, karmaşık bir problemi deneylemeden veya deney sayısında azaltma yaparak daha hızlı bir şekilde çözmeye yarar ve dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. CAD / CAM uygulamaları ile beraber çalışan yazılm paket programları mevcuttur. Bunlardan bazıları Ansys, Abaqus, Nastran, Hypermesh, Dytran, Cosmos, Algor, Patran programlarıdır [20].

Sonlu elemanlar metodunda, Şekil 4.1' deki gibi karmaşık geometrideki bir yapı, belirli bir geomterideki çok sayıda elemanlara bölünür. Elemanlar da birbirlerine izafi düğüm noktaları (node) ile birbirine bağlıdır [20].



Şekil 4.1: Ana geometrinin sonlu elemanlar modeli ile daha küçük elemanlara ve düğüm noktalarının bölünmesi.

Sonlu elemanlar modelinde, sistem önce eleman ve düğüm noktalarının yer aldığı daha küçük birim parçalara bölünür. Her bir elemanda bilinen fiziksel bir büyüklüğün davranışı belirlenir. Elemanlar, düğüm noktalarıyla birbirine bağlanarak, tüm sistem için bir denklem sistemi oluşturulur. Bu denklem takımının matris

şeklinde gösterimi [K].[U]=[F] şeklindedir. Burada [U] düğüm noktalarındaki yer değiştirme matrisi, [K] katılık matrisi, [F] ise düğüm noktalarına etkiyen yük vektörüdür.

Oluşturulan denklem sistemi çözülerek, düğüm noktaları için bilinmeyen fiziksel bir büyüklük yer değiştirme bulunur. Son olarak bulunan yer değiştirme değeri kullanılarak gerinim ve gerilmeler hesaplanır.

Bloklama simülasyonu, sonlu elemanlar yazılımı olan Ansys paket programı (Ansys Workbench 16.2) ile yapılmıştır [21], [22].

4.1. Sonlu Elemanlar Analizi

3.2 başlığındaki gometrik özellikleri belirtilen ve Şekil 1.2' deki gibi katı modeli oluşturulmuş yayın 3.1 başlığında belirtilmiş mekanik özellikleri (elastiste modülü, gerilme-gerinim grafğinden elde edilmiş plastik şekil değiştirme değerleri) Ansys Workbench programında Engineering Data bölümünde belirtilmiştir. Plastik şekil değiştirme-gerilim değerleri çoklu doğrusal izotropik sertleştirme (multilinear isotropic hardening) yöntemi seçilerek deney değerleri ile Tablo 4.1' de oluşturulmuştur.

Tablo 4.1: Yay malzemesinin gerilme - plastik gerinim değerleri.

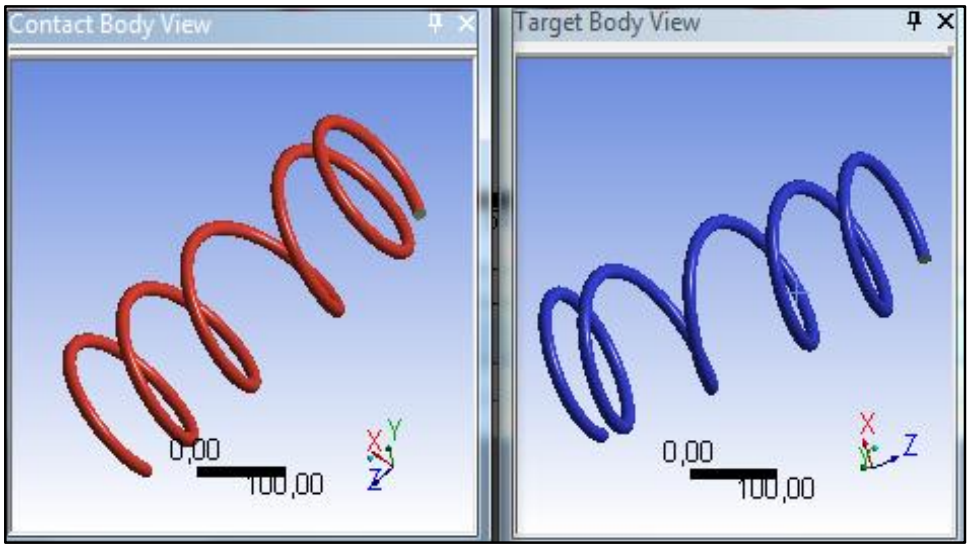
1	Plastic Strain (mm mm^-1)	Stress (MPa)
2	0	1500
3	0,002	1524
4	0,0062	1602
5	0,01	1652
6	0,0175	1698
7	0,021	1720

Yayın üst ve alt tabakları, analizde rijit yapılar olarak tanımlanacağı için, programda varsayılan çelik malzeme olarak tanımlı 'Structural Steel' malzeme yapısındaki değerler aynen alınmıştır.

Daha sonra, Solidworks programında oluşturulmuş yay, alt tabak ve üst tabaklarından oluşan montaj cad data üzerinden modelleme çalışmaları yapılmıştır. Analizin geometri bölümünde, alt ve üst tabak analiz edilmeyeceği için rijit yapılar

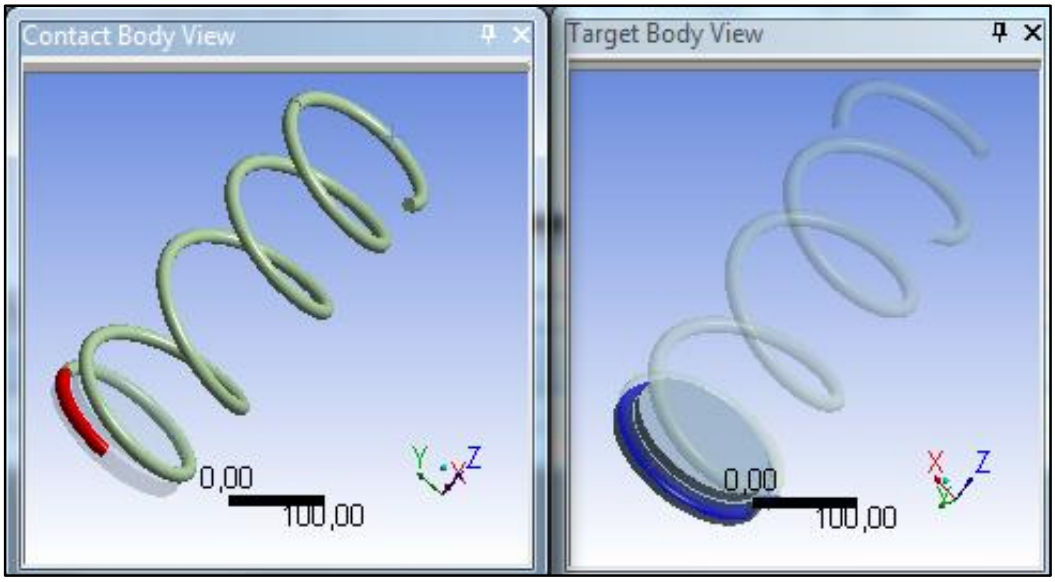
olarak tanımlanmış, yayın malzemesi olarak ise 3.1 başlığındaki mekanik özellikteki değerler ile oluşturulan malzeme yapısı seçilmiştir.

Deney esnasında yayın başlangıç ve bitiş sarımları her iki tabakla sürekli bir şekilde temaslı ve yay sarımları sıkıştıkça birbirleri üzerinde temaslı bir şekilde hareket etmektedir. Yayın temas edecek tüm yüzeyleri Şekil 4.2' deki gibi hem kontakt (contact) hem de hedef (target) eleman olarak tanımlanıp, temasları sürtünmesiz olarak kabul edip (frictionless), yayın kendi içindeki kontaktı tanımlanmıştır. Böylece sıkıştırmada, yay yüzeyleri birbirlerine temas ettiği anda, bu temas program tarafından algılanacak ve temas eden sarımlar birlikte hareket edecektir. Tersi durumda, yayın kendi içerisindeki kontakt tanımı yapılmaz ise sıkıştırma esnasında yay sarımları birbiri içerisine geçecektir.



Şekil 4.2: Yayın kendi içindeki kontaktının hem 'Contact Eleman' hem de 'Target Eleman' olarak tanımlanması.

Yayın başlangıç ve bitiş sarımlarındaki tabağa oturan sarımlar ile tabakların yay sarımlarına temas eden yüzeyleri, bloklama boyunca sürekli temas ettiği için bu temas hareketsiz (bonded) olarak, yani birbilerine yapışmış, kaynaklı temas olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.3' de alt tabağın yay ile temas halindeki yüzei mavi, yayın alt tabak ile temas halindeki yüzeyi kırmızı olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde yayın üst tabak olan temasında da yay yüzeyi target, üst tabağın temas yüzeyi de contact eleman olarak tanımlanmıştır.



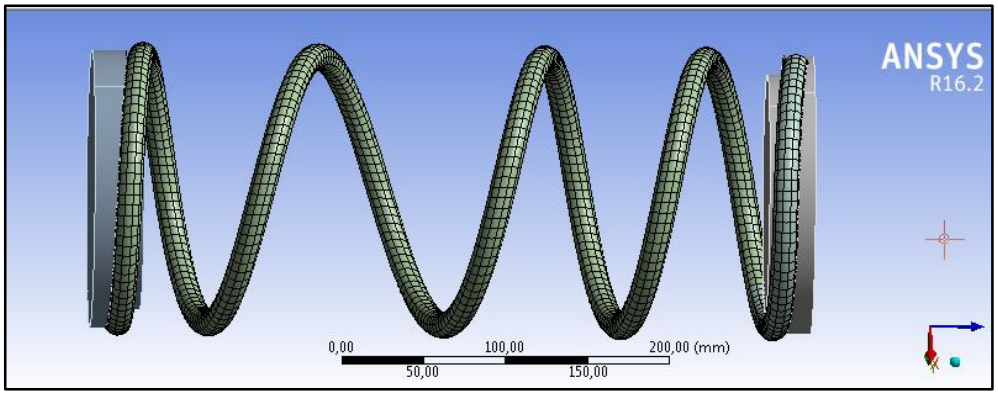
Şekil 4.3: Yay ile tabakların temas halindeki yüzeyleri ‘Bonded’ kontaktlar olarak tanımlanması.

Yay 3 farklı boyuttaki sonlu elemanlar ağı (mesh) ile modellenmiştir. Sonlu eleman tipi olarak 20 düğüm noktalı SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Kullanılan ağ tiplerindeki eleman boyutu, eleman sayısı ve düğüm noktası sayıları Tablo 4.2’ deki gibidir.

Tablo 4.2: Farklı ağ yapıları ile elde edilmiş sonlu eleman tablosu.

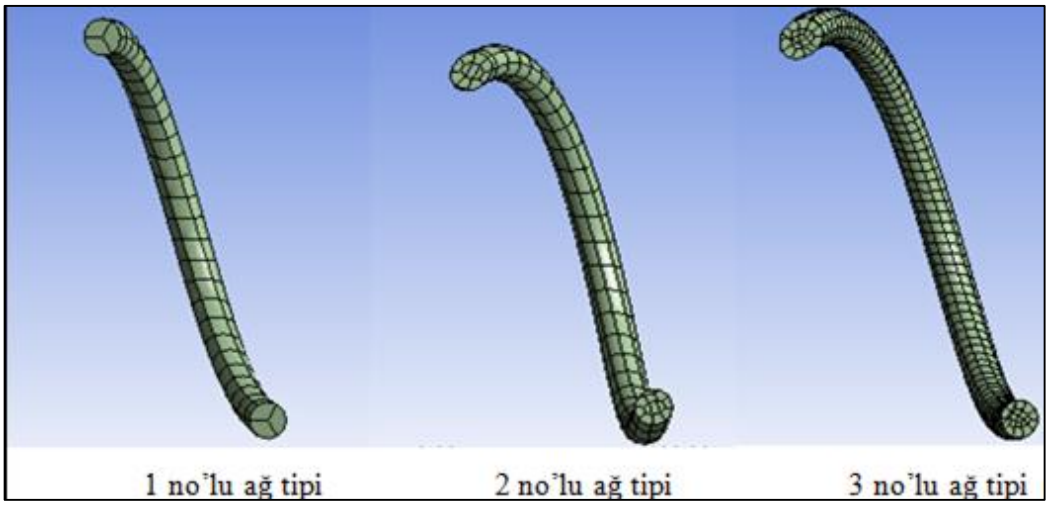
AĞ TİPLERİ	Eleman Büyüklüğü (mm)	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
1	10	1265	7595
2	6,5	2793	13743
3	6	7259	34420

Şekil 4.4’ de, yayın Tablo 4.2’de yer alan 3 numaralı sonlu elemanlar ağ tipi kullanılarak elde edilmiş görseli yer almaktadır.



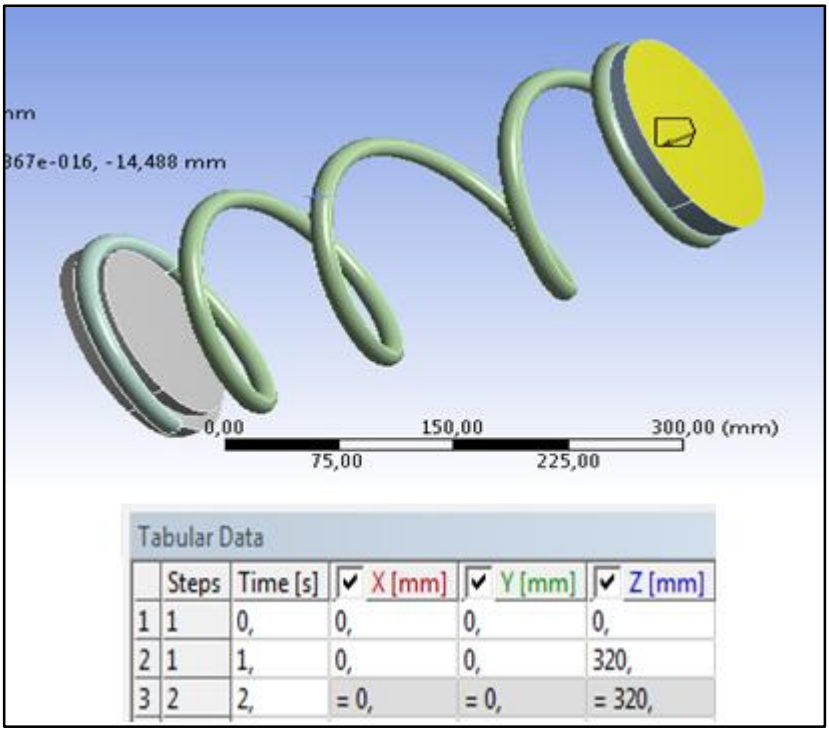
Şekil 4.4: Yayın sonlu elemanlar ağı.

Yayın farklı sonlu eleman büyüklükleri ile oluşturulmuş yay kesitinin ağ yapısı Şekil 4.5' deki gibidir.



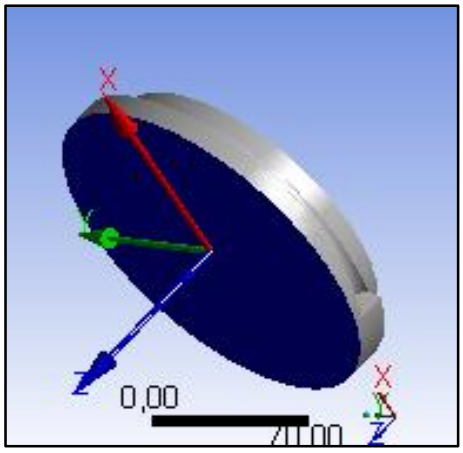
Şekil 4.5: Farklı ağ tiplerindeki yayın kesit görünümü.

Sonlu elemanlar analizi basma ve serbest bırakma olmak üzere iki aşamadan ibaret olduğu için 'Analysis Settings' bölümünde analiz 2 adımlı olarak tanımlanmıştır. Static Structural modülünde, Remote Displacement seçeneği kullanılmış olunup, hareketli tabak olan üst tabağı üst yüzeyine, yay ekseni doğrultusunda Şekil 4.6' de görüldüğü gibi 320 mm'lik yer değiştirme uygulanmıştır.



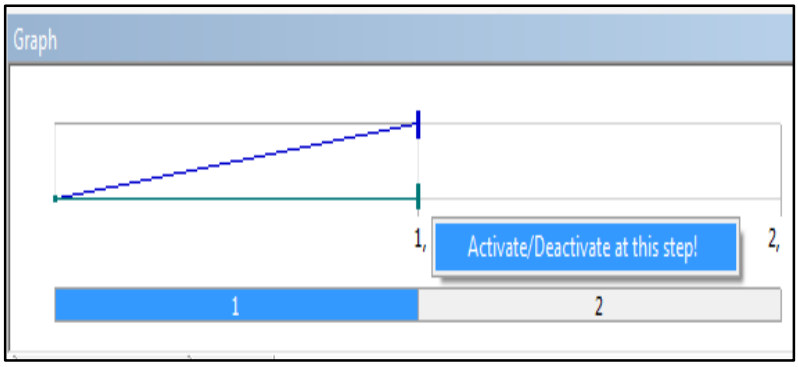
Şekil 4.6: Yayın üst tabağına z yönünde 320 mm yer değiştirme uygulanması.

Yayın alt tabağı hareketsiz olduğu için alt yüzeyi Şekil 4.7' deki gibi x, y ve z yönleri için hareketsiz kılınıp, sabitlenmiştir.



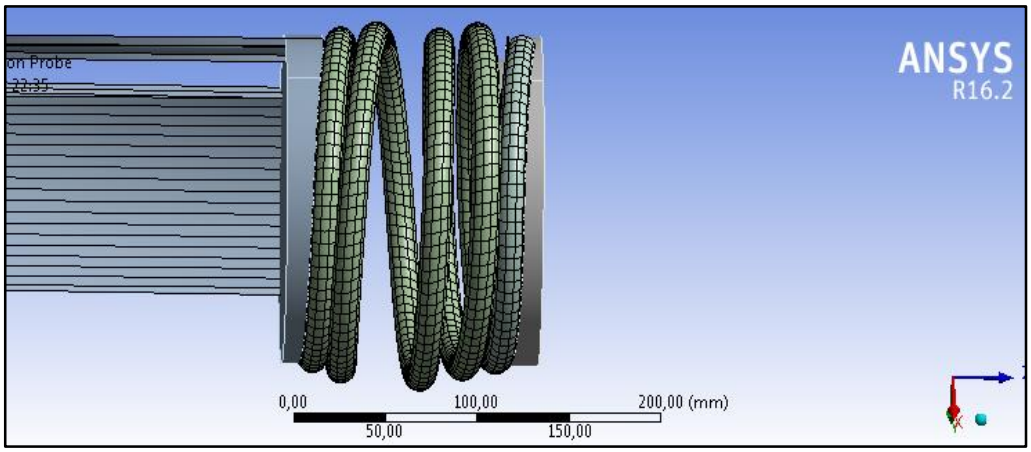
Şekil 4.7: Yayın alt tabağının her 3 yön için de sabitlenmesi.

Ansys Workebench yazılımında remote displacement bölümünde, yaya etki eden 320 mm'lik yer değiştirme sadece basma yönünde olup, sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra yaya hiçbir çekme kuvveti uygulanmadığı için Şekil 4.7'deki gibi 2 aşamalı olarak tanımlanan analizde, ikinci aşama olan serbest bırakma progamda pasifize edilmştir.



Şekil 4.8: 2 aşamalı olan analizde, 2.aşama olan serbest bırakmanın pasifize edilmesi.

Solution modülünde, yukarıda bahsedilen girdiler sonucunda Şekil 4.8' deki gibi yay blokalanarak analiz yapılmıştır.



Şekil 4.9: Bloklanmış yay görünümü.

Solution modülünde alt tabağa dik olarak z yönünde gelen zamana bağlı olarak değişen kuvvet değerleri Tablo 4.3' de verilmektedir.

Tablo 4.3: Analizdeki süreye bağlı değişen kuvvet değerleri.

Tabular Data

	Time [s]	Joint Probe (Total Force Z) [N]
1	0,2	-2469,1
2	0,4	-4865,9
3	0,7	-8307,
4	0,775	-8819,
5	0,85	-9257,1
6	0,8875	-9475,1
7	0,925	-9695,6
8	0,9625	-9896,4
9	0,98125	-10067
10	1,	-10416
11	1,2	-8332,8
12	1,4	-6263,4
13	1,7	-3099,7
14	1,85	-1574,4
15	2,	4,4913

Solution modülünde, deformation probe seçeneği ile yayın en üst noktasındaki deformasyon miktarının süreye bağlı değişen değerleri Tablo 4.4' deki gibidir.

Tablo 4.4: Yay boyunda süreye bağlı değişen deformasyon miktarları.

Tabular Data

	Time [s]	Deformation Probe (Z) [mm]
1	0,2	64,
2	0,4	128,
3	0,7	224,
4	0,775	248,
5	0,85	272,
6	0,8875	284,
7	0,925	296,
8	0,9625	308,
9	0,98125	314,
10	1,	320,
11	1,2	285,22
12	1,4	230,72
13	1,7	148,92
14	1,85	107,98
15	2,	67,01

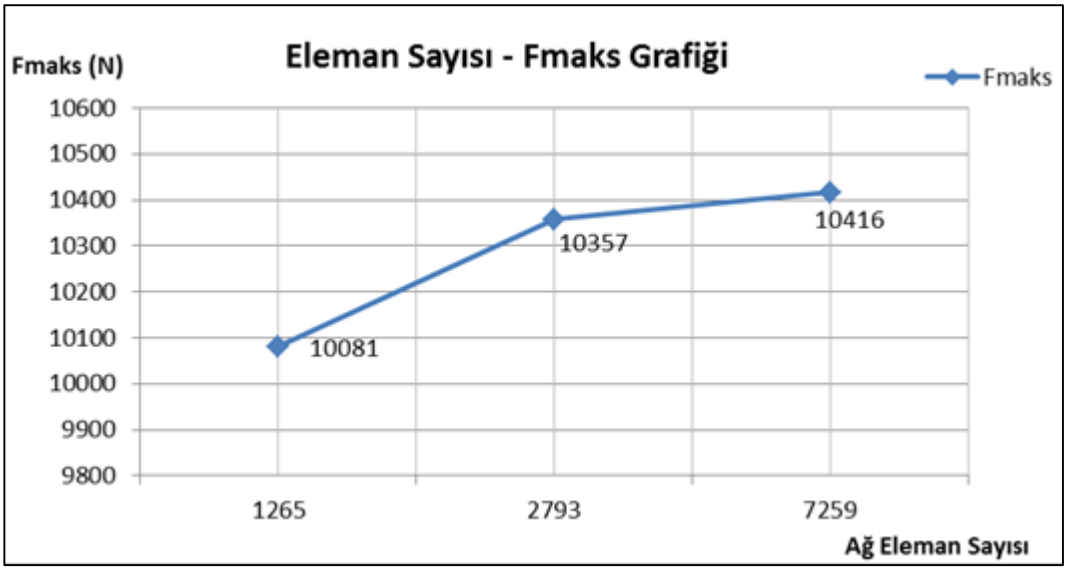
Tablo 4.2' de maksimum kuvvet değeri 10416 N olarak görülmekte, Tablo 4.3'de de yayda 67,01 mm'lik plastik deformasyon miktarı oluşmuştur. Yani, deneyden önce 430 mm olan yay boyu deneyden sonra yaklaşık 430-67 = 363 mm'dir.

Tablo 4.5' de farklı ağ tipleri ile analiz sonucundaki maksimum kuvvet ve plastik deformasyon miktarları yer alamaktadır.

Tablo 4.5: Farklı ağ tipleri ile yapılmış analiz sonuçları.

AĞ TİPLERİ	Eleman Büyüklüğü (mm)	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Maksimum Kuvvet F_{maks} (N)	Plastik Deformasyon Miktarı ΔL (mm)
1	10	1265	7595	10081	71.2
2	6,5	2793	13743	10357	66.8
3	6	7259	34420	10416	67

Eleman sayısı 2793'den 7259'a artırıldığı durumda, maksimum kuvvet değeri 10357 N'dan 10416 N'a çıkmıştır. Ardaki fark %1'in alrtında olduğu için 10416 n değeri analiz sonucu olarak kabul edilmiş, plastik deformasyon miktarı her 3 ağ tipinde de birbirine yakın sonuçlar göstermiştir ve analiz sonucu olarak 67 mm kabul edilmiştir. Eleman sayısına göre değişen maksimum kuvvet değeri Şekil 4.10'daki gibi grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Eleman sayısı - F_{maks} değeri grafiği.

4.2 Deney Yayına Özdeş Sarım Sayıları ve Ortalama Sargı Çapları Farklı Yayların Sonlu Elemanlar Analizi

Deneyde kullanılan yayın sarım sayısının 0,25 fazlası ve eksiği, sargı ortalama çapının da 20 fazlası ve eksiği değerlerinin kombinasyonları ile oluşan 9 farklı geometrideki yayın Solidworks programında CAD modeli oluşturulmuştur. Yaylar Ansys programında aynı şartlarda bloklama deneyine tabi tutularak F_{maks} ve ΔL değerleri elde edilmiş, sonuçlar Tablo 4.6'daki gibidir.

Tablo 4.6: Farklı yay geometrileri ile elde edilen maksimum kuvvet ve plastik deformasyon tablosu.

Yay No	n (sarım sayısı)	D_o (Ortalama sargı çapı)	Fmaks (N)	ΔL (mm)
1	4,57	143,5	16166	130
2		163,5	13392	81
3		183,5	10971	41
4	4,82	143,5	15714	100
5		163,5	13241	70
6		183,5	10642	25
7	5,07	143,5	15498	92
8		163,5	12852	54
9		183,5	10419	20

Elde edilen sonuçlara göre, aynı sarım sayısındaki yaylarda, sargı ortalama çapı dolayısıyla yay dış çapı arttığında F_{maks} ve ΔL değerleri düşmektedir. 2.10 numaralı analitik formulasyonda olduğu gibi aynı sarım sayısında yay dış çapı artarsa yay rijitlik katsayısı k, düşmekte yayın mukavemeti azalmakta, aynı sıkıştırma miktarına ulaşılması için dış çapı daha küçük rijit olan yaya daha fazla kuvvet gerekmektedir. Daha rijit olan yayda, aynı sıkıştırma miktarında daha fazla kuvvete ulaşıldığı için, geri yaylanma sonucunda oluşan plastik deformasyon miktarı da o ölçüde büyük olmaktadır. Yani burada ne kadar büyük kuvvet miktarına ulaşılabilirse, plastik deformasyon miktarı da artacak ifadesi çıkarılmaktadır.

Benzer durumda, aynı dış çaptaki yaylarda sarım sayısı arttığında, yine F_{maks} ve ΔL değerleri düşmektedir. Yine 2.10 formulasyonundaki gibi paydada yer alan sarım sayısı değeri azaldığında yay rijitlik katsayısı artacağı için, aynı sıkıştırma değerinde sarım sayısı değeri daha az olan yayda daha yüksek kuvvet değerleri elde edilecektir.

Daha yüksek kuvvet değerlerine ulaşıldığında da yay daha büyük gerilmelere maruz kalacağından dolayı geri yaylanma sonundaki plastik deformasyon miktarı da artacaktır.

4.3 Cevap Yüzeyi Metodu

Cevap yüzeyi metodu, deney sonucu elde edilmiş bağımsız değişken girdi verileri ile bağımlı değişken çıktı verileri için fonksiyon veya yüzey elde etmeye yarayan bir yöntemdir. Öncelikle deney verileri için uydurulacak fonksiyon veya yüzey tipi seçimi yapılır. Örneğin 4.1 eşitliğindeki gibi 2 değişkenli parabolik bir fonksiyon tanımlanabilir.

$$F(x,y) = a_1 + a_2*x + a_3*y + a_4*x^2 + a_5*y^2 + a_6*x*y \qquad (4.1)$$

Fonksiyon seçiminden sonra maksimum ve minumum x ve y girdi değerleri ile fonksiyonun hesaplanacağı geçerlilik bölgesi belirlenir. Daha sonra deney noktaları deney tasarımı yöntemleri ile belirlenir.

Uydurulan eğri veya yüzey kalitesinin belirlenmesi için R^2 yöntemine başvurulur. Uydurulacak en kötü fonksiyon değişken içermeyip sadece sabit bir değerden ibarettir. 4.1 eşitliğindeki E simgesi, fonksiyondaki hataların karelerinin toplamıdır.

$$R^2 = \frac{\text{E en kötü} - \text{E uydurulan}}{\text{E en kötü}} \qquad (4.2)$$

R_2=1 ise uydurlan fonksiyon gerçek fonksiyona birebir uyum göstermiş olacaktır. R_2=0 olur ise uydurulmuş fonksiyonun gerçek fonksiyona en kötü uyumu sağlanmış olacaktır. Gerçek fonksiyona uyum ne kadar artar ise, uydurulan fonksiyon verilere o kadar yakın noktalardan geçiyor demektir.

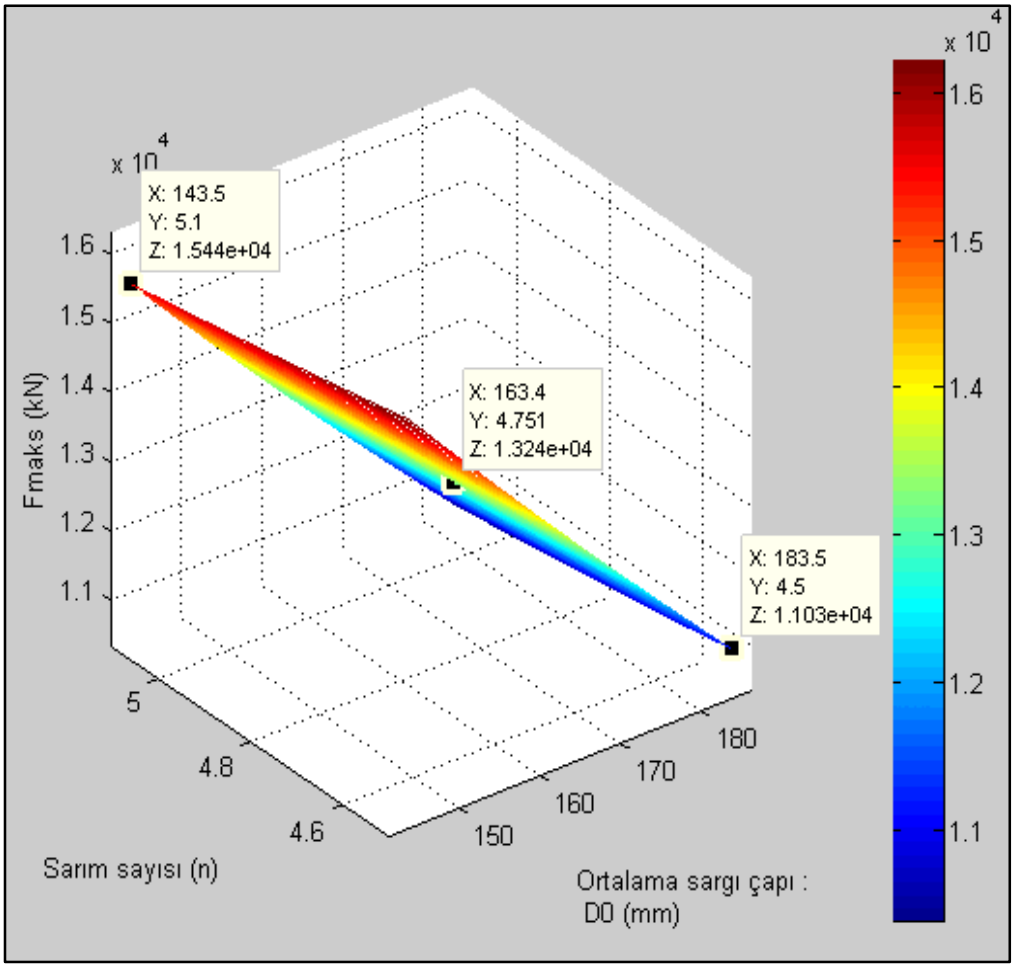
4.4 Maksimum Kuvvet ve Plastik Deformasyon İçin Cevap Yüzeyleri Oluşturulması

Cevap yüzeyi metodu ile maksimum kuvvet ve plastik deformasyonun, sarım sayısı ve ortlama sargı çapı cinsinden ifade eden cevap yüzeyi modelleri elde edilmiştir. Matlab programında (Matlab R2013a) 2.derece (full quadratic) fonksiyonlar oluşturulmuştur [23].

Plastik deformasyon için oluşturulan fonksiyon (F_1) 4.3 eşitliğindeki gibidir.

$$F1 = 3045{,}387381 - 5{,}791167 * Do - 916{,}095 * n - 0{,}000833 * Do^2 + 0{,}85 * Do * n + 74{,}6667 * n^2 \quad (4.3)$$

Bulunan fonksiyonun kalitesi olan yani onksiyonun tablo değerlerinden geçme uygunluğu olan, 0-1 değerleri arasında olan R^2 ifadesi R^2= 0,994060 olarak hesaplanmıştır. Bu, elde edilen fonksiyonun uyum kalitesinin çok iyi olduğunu belirtmektedir.

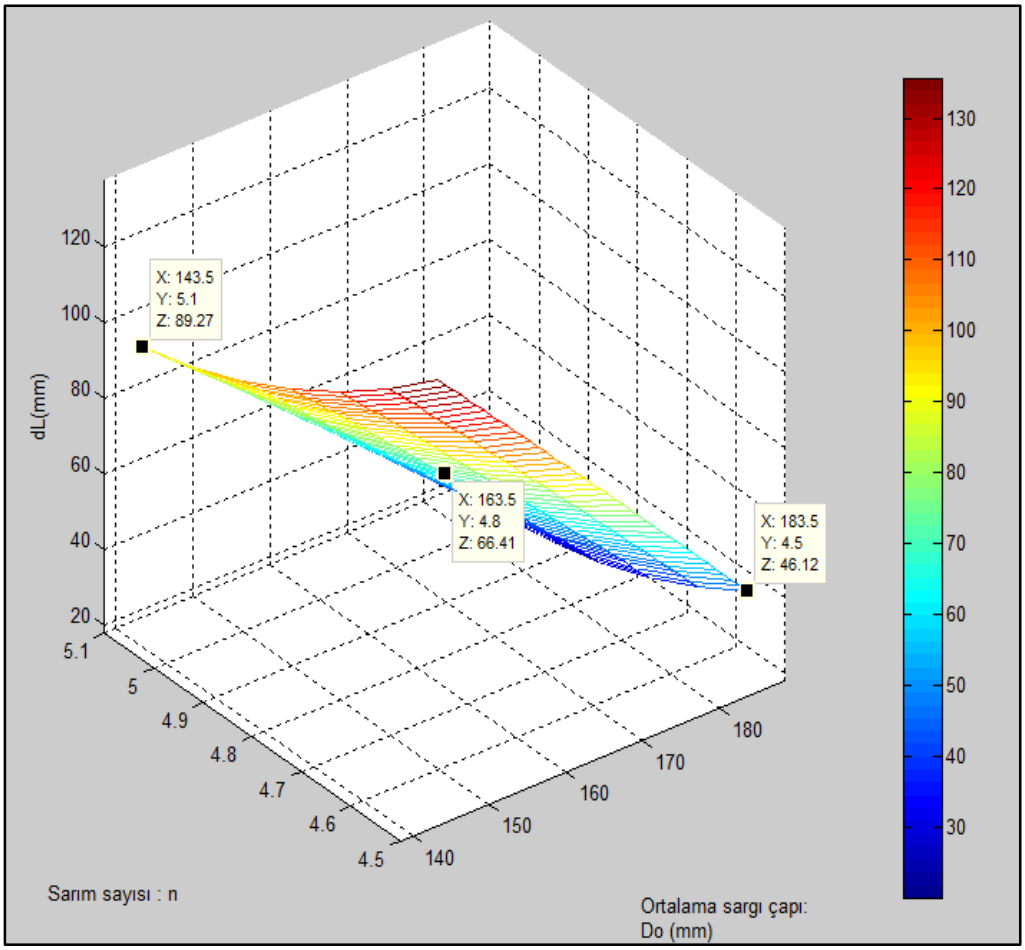


Şekil 4.11: F_1 fonksiyonunun grafiği.

Maksimum kuvvet için oluşturulan fonksiyon (F_2) 4.4 eşitliğindeki gibidir.

$$F2 = 55629{,}340212 - 215{,}789333 * Do - 47953{,}126667 * n - 0{,}183333 * Do^2 + 5{,}8 * Do * n + 277{,}333333 * n^2 \quad (4.4)$$

F_2 fonksiyonu için R^2 değeri, R^2 = 0,999457 olarak hesaplanmıştır. Bu değer de elde edilen fonksiyonun uyum kalitesinin çok iyi olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.12: F_2 fonksiyonunun grafiği.

F_1 ve F_2 fonksiyonları sayesinde hem Tablo 4.6' deki sarım sayısı ve çap değerleri arasında kalan değerlerdeki yay geometrilerinin F_{maks} ve ΔL değerleri hesaplanabilir hem de belirli bir F_{maks} ve ΔL değerlerini sağlayacak gerçeğe çok yaklaşık sarım sayısı ve çap değerlerinde yay geometrileri elde edilebilir.

4.5 Deney ile Sonlu Eleman Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Başlık 3.3.1'de bloklama deneyinin sonuçları yer alan ve de 4.2 ve 4.3 numaralı başlıklarında analiz sonuçları yer alan deney yayının F_{maks} ve ΔL değerleri Tablo 4.7' de yer almaktadır.

Tablo 4.7: F_{maks} ve ΔL değerlerinin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

	DENEY	ANALİZ	% FARK
Fmaks (N)	13139	10416	%20.7
ΔL (mm)	68	67	%1.5

Burada, ΔL yani plastik deformasyon miktarının deneysel ve analiz sonuçları farkı yaklaşık %1,5 olup, analizde deney sonucuna göre oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. F_{maks} değerinde ise yaklaşık %20'lik fark elde edilmiştir. Buradaki farklara, analizde yay sarımlarının birbiri üzerindeki temasının sürtünmesiz kabul edilmesi, yay üzerinde ısıl işlem sonucu oluşan tufalların kalması ve bu tufalların sürtünme oluşturması, sıcak yay sarımının doğası gereği yayın son sarımının yaklaşık yarısında baskı makarasının iz oluşturması, sarım malafasının yüzeyindeki aşınmalardan kaynaklı ve pratikte yayın sarım malafası yüzeyine tam olarak sarılamamasından kaynaklı yay dış çapında yaklaşık olarak ±1 mm tolerans içerisinde dalgalanma olması, ısıl işlem fırınlarından geçen yayların çaplarında yaklaşık olarak ± 0.5 mm toleransı içerisinde dalgalanmaların olması, bloklama esnasında bir miktar çapda genişleme ve burkulmadan dolayı oluşan burulma açılarının ihmal edilmesi, yay üzerinden manuel olarak mihengir ölçü aleti ile yükseklik ve çap ölçülerini ölçerken hata payının olması gibi faktörler neden olmuştur.

Analiz, yay sarımlarının temasının sürtünmesiz kabulu dışında farklı sürtünme katsayılarının olduğu sürtünmeli durumlar için de yapılmıştır. Tablo 4.8'deki görüldüğü gibi sürtünme katsayısı arttıkça maksimum kuvvet artmaktadır.

Tablo 4.8: Farklı sürtünme katsayıları durumları için maksimum kuvvet değerleri.

Sürtünme Katsayısı	Maksimum Kuvvet (N)
0	10416
0.1	10450
0.5	10483
0.9	10550

Yay ortalama sargı çapının, ölçüm ve imalat koşullarından kaynaklı ±1 mm tolerans içinde olması dolayısıyla, analizdeki 163,5 mm değerindeki yaya özdeş 164,5 ve 162,5 mm ortalama sargı çap değerlerinde yay katı modelleri oluşturulmuş

ve analiz edilmiştir. Analiz sonucu ortalama sargı çaplarına karşılık gelen maksimum kuvvet değerleri Tablo 4.9'daki gibidir.

Tablo 4.9: Farklı ortalama sargı çapı değerleri için maksimum kuvvet değerleri.

Ortalama Sargı Çapı (mm)	Maksimum Kuvvet (N)
162,5	10436
163,5	10416
164,5	10403

5. SONUÇLAR

Bu tezde otomobil helisel basma yaylarının bloklama operasyonu deneysel ve sonlu elemanlar modeli ile analiz edilip aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Helisel basma yayının oda sıcaklığındaki bloklama deneyindeki plastik deformasyon miktarı %1,5 hata ile sonlu elemanlar analizinde elde edilmiştir.
- Helisel basma yayının oda sıcaklığında bloklama deneyinde elde edilen maksimum kuvvet değeri, %20,7 hata ile sonlu elemanlar analizinde elde edilmiştir. Bu farkın nedenleri, yay imalatı ve yay ölçümü kaynaklıdır.
- Deney 100°C ve 200°C'de de yapılarak, aynı deney şartlarında sıcaklık arttıkça blok boyundaki maksimum kuvvet değerinin azaldığı ve plastik deformasyon miktarının arttığı incelenmiştir.
- Özdeş yaylar ile farklı sıcaklıklarda yapılan bloklama deneylerinde, 100°C'deki plastik deformasyon miktarı oda sıcaklığındaki deneye göre 12 mm daha fazla, 200°C'deki plastik deformasyon miktarı da oda sıcaklığındaki deneye göre 20 mm daha fazladır. Plastik deformasyon elde etmenin kısıtlı olduğu rijitlik katsayısı yüksek veya sarımlar arası mesafelerin düşük olduğu yaylarda, bloklama operasyonunun yüksek sıcaklıklarda yapılması önerilmektedir.
- Deney yayının sarım sayısının ±0,25 ve ortalama sargı çapının da ± 20 mm değerlerinin kombinasyonları ile 9 adet yay CAD modeli elde edilmiş ve bu modellere sonlu elemanlar metodu ile Ansys programında bloklama operasyonları uygulanmış, her bir yayın blok boyundaki maksimum kuvvet ve plastik deformasyonları hesaplanmıştır. Aynı sarım sayısında, ortalama sargı çapı arttıkça maksimum kuvvet ve plastik deformasyon miktarının azaldığı, aynı ortalama sargı çapında, sarım sayısı arttıkça yine maksimum kuvvet ve plastik deformasyon miktarının azaldığı hesaplanmıştır.
- Cevap yüzeyi metodu ile maksimum kuvvet ve plastik deformasyonun sarım sayısı ve ortalama sargı çapı parametreleri cinsinden ifade eden cevap yüzeyi modelleri elde edilmiştir. Bu cevap yüzeyi modelleri ile farklı sarım sayısı ve ortalama sargı çapı durumları için maksimum kuvvet ve plastik deformasyon değerleri deneye gerek kalmadan hesaplanabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] Estorff E., Wienand J., (1973), “Technische Daten Fahrzeugfedern Teil 1:Drehfedern’, Brüninghaus.

[2] Ulbricht J., Kindermann S., Vondracek H., (1973), “Warm Geformte Federn Leitfaden für Konstruktion und Fertigung’’, Hoesch Werke Brüninghaus.

[3] Jiang W.G., Henshall J.L., (2000), “A novel finite element model for helical springs”, Finite Elements in Analysis and Design, 35, 363-377.

[4] Prawot Y., Ikeda M., Manville S.K., Nishikawa A., (2008), “Design and failure modes of automotive suspension springs”, Engineering Failure Analysis, 15, 1155–1174.

[5] Youli Z., Wang Y., Huang Y., (2014), “Failure analysis of a helical compression spring for a heavy vehicle's suspension system”, Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2, 169–173.

[6] Matejicek J., Brand P.C., Drews A.R., Krause A., Lowe-Ma C., (2004), “Residual stresses in cold-coiled helical compression springs for automotive suspensions measured by neutron diffraction” Materials Science and Engineering, A 367, 306–311.

[7] Becker L.E., Cleghorn W.L., (1992), “On the buckling of helical compression springs”, International Journal of Mechanical Sciences, 34, 275-282.

[8] Berger C., Kaiser B., (2006), “Results of very high cycle fatigue tests on helical compression springs”, International Journal of Fatigue, 28, 1658-1663.

[9] Del Llano-Vizcaya L., Rubio-Gonzalez C., Mesmacque G., Cervantes-Hernandez T., (2006), “Multiaxial fatigue and failure analysis of helical compression springs”, Engineering Failure Analysis, 13, 1303–1313.

[10] Mohd Izaham Zainal Abidin, Jamaluddin Mahmud, Mohd Juzaila Abd Latif, Aidah Jumahat, (2013), “Experimental and Numerical Investigation of SUP12 Steel Coil Spring”, Procedia Engineering, 68, 251 – 257.

[11] Del Llano-Vizcaya L., Rubio-Gonzalez C., Mesmacque G., Banderas-Hernandez , (2007), “Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs”, Materials and Design, 28, 1130–1134.

[12] Kaiser B., Pyttel B., Berger C., (2011), “VHCF-behavior of helical compression springs made of different materials”, International Journal of Fatigue, 33, 23-32.

[13] Dammak F., Taktak M., Abid S., Dhieb A., Haddar M., (2005), “Finite element method for the stress analysis of isotropic cylindrical helical spring”, European Journal of Mechanics A/Solids, 24, 1068-1078.

[14] Gümüş F., (2006), “Bilgisayar Destekli Helisel Yay Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

[15] Deveciler E., (2010), “Bilgisayar Destekli Yay Tasarımı ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.

[16] Taktak M. , Omheni K., Aloui A. , Dammak F., Haddar M., (2014), “Dynamic optimization design of a cylindrical helical spring”, Applied Acoustics, 77, 178–183.

[17] Kumar B. R., Swapan K. D., Bhattacharya D.K., (2003), “Fatigue failure of helical compression springin coke oven batteries”, Engineering Failure Analysis, 10, 291–296.

[18] Web1, (2016), http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/S%C3%BCspansiyon%20Sistemleri.pdf, (Erişim Tarihi: 07/06/2016).

[19] Babalık F., (2008), “Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri’’, 3.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım.

[20] Web2, (2016), http://anibal.gyte.edu.tr/hebe/w/?/view/109/520/66500040/downloads, (Erişim Tarihi: 07/06/2016).

[21] Arslan M.A., (2014), “Hands On Applied Finite Element Analysis’’, 1.Baskı, Gebze Teknik Üniversitesi.

[22] Web3, (2016), http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/, (Erişim Tarihi: 07/06/2016).

[23] Uysal M., (2004), “Matlab ile Matematiksel Uygulamalar ve Mühendislik Uygulamaları’’, 1. Baskı, Beta Basın Yayım.

ÖZGEÇMİŞ

Erdem BÖREKÇİ 1987 yılında İstanbul'da doğdu. 2006 yılında lisans eğitimine başladığı Uludağ Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında başarıyla tamamlayarak, 2013 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2012 Şubat ayı – 2015 Haziran ayı tarihleri arasında Rözmaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasında Proses ve Tasarım Mühendisi olarak çalıştı ve 2015 Haziran ayından itibaren halen Konveyör Beyaz Eşya ve Otomotiv Yan Sanayi A.Ş. firmasına Ürün Geliştirme Sorumlusu olarak çalışmaktadır.