



**YAPRAK YAYLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TASARIMI
VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

Serdinç YAVUZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Serdinç YAVUZ

30/05/2022

YAPRAK YAYLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TASARIMI VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Serdinç YAVUZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2022

ÖZET

Yaprak yaylar ağır vasıta araçlarında kullanılan yol koşullarında kaynaklı oluşan yüklemeleri ve titreşimleri absorbe etmeye yarayan bir süspansiyon elemanıdır. Yaprak yaylar farklı tasarım parametrelerine göre değişkenlik gösteren birçok farklı model esas alınarak üretilebilmektedir. Yapılan çalışmada aktif olarak kullanılmakta olan yaprak yay modelleri ile yeni bir yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Bütün modeller 51CrV4 çeliği temel alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan yaprak yay modellerine ait gerekli tasarım ölçütleri bir üretici firma kataloğundan alınarak gerçek boyutlu yaprak yay modelleri hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada bir sonlu elemanlar programı ve yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak amaçlanan sonuçlara ulaşılmış ve elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Oluşturulan yaprak yay modelleri gerilme, gerinim ve yay sabiti gibi unsurlar göz alınarak değerlendirilmiştir. Yaprak yaylar ait tasarım parametrelerinde ki değişimin istenilen sonuçlara etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Aynı zamanda yaprak yaylar hakkında tasarım bilgileri ve üretim süreçleri hakkında detaylı olarak bilgi verilmiştir.

Bilim Kodu : 91406
Anahtar Kelimeler : Yaprak yay tasarımı, sonlu elemanlar analizi, yorulma, hasar analizi, yapay sinir ağları
Sayfa Adedi : 160
Danışman : Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN

DESIGN OF LEAF SPRING THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD AND
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELING

(M. Sc. Thesis)

Serdinç YAVUZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2022

ABSTRACT

Leaf spring is a suspension element, used in heavy vehicles to absorb loads and vibrations caused by road conditions. Leaf springs can be produced based on many different models that vary according to different design parameters. In the study, a new leaf spring model was created with the leaf spring models that are actively used. All models are based on 51CrV4 steel. The necessary design criteria for the leaf spring models created were taken from a manufacturer's catalog and life-size leaf springs models were prepared. In the study, the results were reached and the data obtained were compared by using a finite elements program and artificial neural networks method. The leaf spring models created were evaluated by taking into account elements such as stress, strain and spring constant. The effect of the change in leaf spring's design parameters on the desired results has been investigated in detail. At the same time, design information about leaf springs and detailed information about production processes are provided.

Science Code : 91406

Key Words : Design of leaf spring, finite element analysis, fatigue, damage analysis, artificial neural networks

Page Number : 160

Supervisor : Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında beni her yönden destekleyen ve gerek bilgisi gerek insanlığı ile her zaman bana bir yol gösterici olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat Tolga Özkan’a teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım. Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen Annem Mefkure YAVUZ, Babam Ömer YAVUZ ve Abime teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni destekleyen ve çalışmalarımda bana yardımcı olan Gül SEÇGİN’e teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	5
3. YAPRAK YAY	13
3.1. Parabolik Yaprak Yaylar	14
3.2. Z Tipi Yaprak Yay	15
3.3. Konvansiyonel Yaprak Yaylar	15
3.4. Yaprak Yay Bileşenlerinin Tanıtımı	17
3.4.1. Yay laması	17
3.4.2. Yaprak yay gözü	23
3.4.3. Burçlar	28
3.4.4. Küpeler	29
3.4.5. Merkezleme civatası	30
3.5.6. Kelepçeler	31
3.5. Yaprak Yay Üretim Adımları	32
3.5.1. Lama kesme işlemi	32
3.5.2. Delme işlemi	32

	Sayfa
3.5.3. Haddeleme	34
3.5.4. Yaprak yay göz üretimi	34
3.5.5. Su verme	35
3.5.6. Menevişleme	37
3.5.7. Bilyalı dövme işlemi	38
3.5.8. Boyama	40
3.5.9. Montaj	41
3.6. Yaprak Yay Üretiminde Kullanılan Malzemeler	41
3.6.1. Çelik	41
3.6.2. Kompozit malzeme	43
4. MALZEMELERDE MEKANİK ÖZELLİKLER	45
4.1. Deformasyon	45
4.2. Gerinim	47
4.3. Gerilme	50
4.4. Kırılma Hipotezleri	53
4.4.1. Sünek malzemeler için kırılma teorileri	54
4.4.2. Gevrek malzemeler için kırılma teorileri	55
4.5. Yaprak Yaylarda Gerilme	56
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	57
5.1. Sonlu Elemanlar Analizleri Sırasında Kullanılan Çelik	59
5.1.1. 51CrV4	59
5.2. Sonlu Elemanlar Analizi Tasarımların Oluşturulması	61
5.2.1. A modelinin hazırlanması	62
5.2.2. B modelinin hazırlanması	73

	Sayfa
5.2.3. C modelin hazırlanması	78
5.3. Model A, B ve C Ağ Yapısı	83
5.4. Model A, B ve C Bağlantı	85
5.5. Model A,B ve C Uygulanan Kuvvet ve Mesnet	88
5.6. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	90
5.6.1. Toplam deformasyon	95
5.6.2. Y yönünde deformasyon	100
5.6.3. Eş-değer gerilme	104
5.6.4. Normal gerilme	109
5.6.5. Eş-değer gerinim	113
5.6.6. Normal gerinim	117
5.7. Yay Sabiti	121
6. YAPAY SİNİR AĞLARI	127
6.1. Yapay Sinir Ağı Modelleme Sonuçları	129
6.2. Yaprak Yayların Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi ve Analizi	132
6.3. Yaprak Yayların Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi	135
6.4. Yaprak Yayların Yapay Sinir Ağları Sonuçları	142
6.5. Model A, B ve C Tipi Yaprak Yayların ANN Model Sonuçları	145
7. SONUÇLAR	149
7.1. Öneriler	151
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ	160

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Normal gerilme eşitlikleri	51
Çizelge 4.2. Kayma gerilme Eşitlikleri	52
Çizelge 5.1. 51CrV4 kimyasal bileşenleri	59
Çizelge 5.2. 51CrV4 çeliğinin mekanik özellikleri	61
Çizelge 5.3. A, B ve Model C'nin geometrik boyutlandırma parametreleri	62
Çizelge 5.4. Parametre açıklamaları	63
Çizelge 5.5. Düz alt model lama uzunlukları	66
Çizelge 5.6. Ters alt model lama uzunlukları	67
Çizelge 5.7. Çift alt model lama uzunlukları	68
Çizelge 5.8. Helisel yay uzunlukları	69
Çizelge 5.9. Model B çift alt model lama uzunlukları çizelgesi	76
Çizelge 5.10. Model C düz alt model lama uzunlukları çizelgesi	81
Çizelge 5.11. Model C çift alt model lama uzunlukları çizelgesi	82
Çizelge 5.12. Toplam deformasyon grafiklerinin tasarım parametreleri.....	95
Çizelge 5.13. Toplam deformasyon için grafiklerde kullanılan parametreler	98
Çizelge 5.14. Y yönünde deformasyon grafiklerinin tasarım parametreleri	100
Çizelge 5.15. Eş-değer gerilme grafiklerinin tasarım parametreleri	104
Çizelge 5.16. Normal gerilme grafiklerinin tasarım parametreleri	109
Çizelge 5.17. Eş-değer gerinim grafiklerinin tasarım parametreleri	113
Çizelge 5.18. Normal gerinim grafiklerinin tasarım parametreleri	117
Çizelge 5.19. Yay sabiti grafiklerinin tasarım parametreleri	123
Çizelge 6.1. Parametrik yaprak yay tasarım parametreleri	130
Çizelge 6.2. Model tipi ve katman sayısına bağlı yay lama uzunlukları	132

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 6.3. SEA- YSA modellerinin performanslarının istatistiksel mukayesesi	145
---	-----



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Yaprak yay görseli ve bileşenleri	13
Şekil 3.2. Parabolik yaprak yay görseli	15
Şekil 3.3. Z tipi yaprak yay	15
Şekil 3.4. Konvansiyonel yaprak yay görseli	16
Şekil 3.5. Yay laması parametreleri	18
Şekil 3.6. Yay laması kavisli eksen mesafesi gösterimi	19
Şekil 3.7. Kare uç	20
Şekil 3.8. Elmas tipi uç	21
Şekil 3.9. Konik uç	21
Şekil 3.10. Konik ve kesilmiş uç	21
Şekil 3.11. A kesit tipi	22
Şekil 3.12. B kesit tipi	23
Şekil 3.13. C kesit tipi	23
Şekil 3.14. Berlin tipi göz	24
Şekil 3.15. Oval tip göz	25
Şekil 3.16. Aşağı kıvrımlı göz	25
Şekil 3.17. Kaynaklanmış göz	26
Şekil 3.18. Askeri sarımlı göz	26
Şekil 3.19. Düz bağlantılı göz	27
Şekil 3.20. Yukarı kıvrımlı göz	27
Şekil 3.21. Berlin ve askeri tipte sarım	27
Şekil 3.22. Yaprak yay burcu örnek resmi	28
Şekil 3.23. Yaprak yay küpesi	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.24. Merkezleme civatası örnek görsel	30
Şekil 3.25. Hizalama kelepçeleri örnek görsel	31
Şekil 3.26. Giyotinle kesme işlemi	32
Şekil 3.27. Zımbalama işlemi görseli	33
Şekil 3.28. Göz unsuru üretim görseli	35
Şekil 3.29. Bilyalı dövme işlemi görseli	39
Şekil 3.30. Yay üretiminde kullanılan çeliklerin yüzdece bileşenleri	42
Şekil 3.31. Kompozit yaprak yay görseli	44
Şekil 4.1. Kirişlerin serbest cisim diyagramı	46
Şekil 4.2. Kirişlerde deformasyonun hesaplanması	46
Şekil 4.3. Normal gerinim	48
Şekil 4.4. Kayma gerinimi	48
Şekil 4.5. Çok eksenli yükleme	49
Şekil 4.6. Birleşik kayma gerinimleri	50
Şekil 4.7. Normal gerilme çeşitleri	51
Şekil 4.8. Kayma gerilmesi çeşitleri	52
Şekil 4.9. Düzlem gerilme dönüşümü	53
Şekil 4.10. Kırılma hipotezleri	55
Şekil 5.1. Sonlu elemanlar görseli	59
Şekil 5.2. Model A Tasarım değişkenlerinin yaprak yay modeli üzerinde gösterimi.....	63
Şekil 5.3. Ana lama tasarımı	65
Şekil 5.4. Katılama işlemi	65
Şekil 5.5. Düz model örnek görseli	66
Şekil 5.6. Döndürme düzlemi	67

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Ters model örnek gösterim	67
Şekil 5.8. Aynalama işlemi için tanımlanan unsurlar	68
Şekil 5.9. Çift model örnek görsel	69
Şekil 5.10. Hibrit model	70
Şekil 5.11. Helisel yay görseli	70
Şekil 5.12. Helisel yay katılaştırma işlemi	71
Şekil 5.13. Bağlantı elemanları görseli	72
Şekil 5.14. Model B teknik resim	74
Şekil 5.15. Düz alt model örnek görsel	74
Şekil 5.16. Ters alt model örnek görsel	75
Şekil 5.17. Aynalama düzlemi	75
Şekil 5.18. Çift alt modeli örnek görsel	76
Şekil 5.19. En dış lama görseli	77
Şekil 5.20. Hibrit model Örnek görseli	78
Şekil 5.21. Model C teknik resim	79
Şekil 5.22. Model C düz alt model ilk lamanın tasarımı	79
Şekil 5.23. Model C düz alt modeli örnek görseli	80
Şekil 5.24. Model C ters alt modeli örnek görseli	81
Şekil 5.25. Model C çift alt model tasarımı	82
Şekil 5.26. Model C hibrit alt model tasarımı	83
Şekil 5.27. Yaprak yay örnek ağ yapısı gösterimi	84
Şekil 5.28. Örnek ağ yapısı sıkılaştırma yüzeylerinin görseli	85
Şekil 5.29. Bağlantı tipi görseli	86
Şekil 5.30. Lamalar arasında bağlantı yüzeylerinin örnek gösterimi	87

Şekil	Sayfa
Şekil 5.31. Alt modeller kuvvet uygulanan bölgelerin örnek gösterimi	89
Şekil 5.32. Model C çift alt modelinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	91
Şekil 5.33. Model B düz alt modelinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	92
Şekil 5.34. Model B hibrit alt modelinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	93
Şekil 5.35. Model A ters alt modelinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	94
Şekil 5.36. Yaprak yay parametre değişimlerinin toplam deformasyona etkisi	97
Şekil 5.37. Model A, B ve C toplam deformasyon miktarına göre kıyaslanması	99
Şekil 5.38. Yaprak yay parametre değişimlerinin Y yönünde deformasyona etkisi	101
Şekil 5.39. Model A, B ve C Y yönünde deformasyon miktarına göre kıyaslanması	103
Şekil 5.40. Yaprak yay parametre değişimlerinin eş-değer gerilmeye etkisi	106
Şekil 5.41. Model A, B ve C eş-değer gerilme miktarına göre kıyaslanması	108
Şekil 5.42. Yaprak yay parametre değişimlerinin normal gerilmeye etkisi	110
Şekil 5.43. Model A, B ve C normal gerilme miktarına göre kıyaslanması	112
Şekil 5.44. Yaprak yay parametre değişimlerinin eş-değer gerinime etkisi	114
Şekil 5.45. Model A, B ve C eş-değer gerinime miktarına göre kıyaslanması	116
Şekil 5.46. Yaprak yay parametre değişimlerinin normal gerinime etkisi	118
Şekil 5.47. Model A, B ve C normal gerinime miktarına göre kıyaslanması	120
Şekil 5.48. Yaprak yay modelleri deformasyon belirteçlerinin yerleri	122
Şekil 5.49. Yaprak yay parametre değişimlerinin yay sabitine etkisi	124
Şekil 5.50. Model A, B ve C yay sabiti değerlerine göre kıyaslanması	126
Şekil 6.1. Yapay sinir ağı modeli örnek gösterimi	129
Şekil 6.2. Yaprak yay modelleri (Düz, Ters ve Çift (düz ve ters))	129
Şekil 6.3. Yaprak yay lama sayılarına bağlı parametrelerin gösterimi	131
Şekil 6.4. Düz alt model bağlantı, mesnet, ağ yapısı ve yükleme gösterimi	133

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. Ters alt model bağlantı, mesnet, ağ yapısı ve yükleme gösterimi	134
Şekil 6.6. Çift alt model bağlantı, mesnet, ağ yapısı ve yükleme gösterimi	135
Şekil 6.7. Model A yaprak yay (düz alt model) SEA sonuçları	139
Şekil 6.8. Model A yaprak yay (ters alt model) SEA sonuçları	140
Şekil 6.9. Model A yaprak yay (çift alt model) SEA sonuçları	141
Şekil 6.10. Model A ANN mimarisi	142
Şekil 6.11. ANN modelinin öğrenme performansı	142
Şekil 6.12. Model A yapay sinir ağı modelinin 30 bins error histogramı	143
Şekil 6.13. Model A yapay sinir ağı modelinin 20 bins error histogramı	143
Şekil 6.14. Model A YSA öğrenme, test ve doğrulama mukayesesi	144
Şekil 6.15. Model A YSA, test ve doğrulama performansları	144
Şekil 6.16. Model A, B ve C ANN mimarisi performansı	145
Şekil 6.17. Model A, B ve C ANN öğrenme	146
Şekil 6.18. Model A, B ve C yapay sinir ağı modelinin 30 bins error histogramı	146
Şekil 6.19. Model A, B ve C yapay sinir ağı modelinin 20 bins error histogramı	147
Şekil 6.20. Model A, B ve C YSA öğrenme, test ve doğrulama performansları	147
Şekil 6.21. Model A, B ve C öğrenme, test ve doğrulama mukayesesi	148
Şekil 6.22. Model A, B ve C ANN mimarisi [51 9 13 19 10]	148

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
b	Genişlik
C	Karbon
Cr	Krom
Dr	Göz unsuru dış çapı
dr	Göz unsuru iç çapı
[D]	Bilinmeyen değerler vektörü
E	Young modülü
F	Kuvvet
İ	İ' inci kat lama
I	Atalet momenti
K	Yay sabiti
Keş	Eşdeğer yay sabiti
[K]	Bilinen sabitler vektörü
L	Lamanın uzunluğu
M	Uygulanan eğilme kuvveti
m³	Lama genişliği
mm	Milimetre
Mn	Manganez
Mo	Molibden
Mpa	Megapaskal
N	Newton
n	Toplam lama katı sayısı
Ni	Nikel
[R]	Bilinen yük vektörü
S_b	Maksimum akma dayanımı
S_ç	Maksimum çekme dayanımı
t	Kalınlık

Simgeler**Açıklamalar**

ν	Poisson sabiti
Z	Kesit modülü
q	Kavis
q_{serbest}	Yüklemeye yapılmadan önceki kavis değeri
$q_{\text{yüklemeye}}$	Yüklemeye sonucu oluşan kavis değeri
W	Tungsten
X	Y yönünde deformasyon
δ	Yer değıştirme
ϵ	Gerinim
σ	Gerilme
σ_{ak}	Akma gerilmesi
τ	Kayma gerilmesi
τ_{max}	Maksimum kayma gerilmesi

1. GİRİŞ

Yaprak yayların bir çeşidi olan konvansiyonel yaprak yaylar, bir merkezleme civatası ile birbirine bağlanmış halde bulunan lamaların üst üste konmasıyla üretilen bir süspansiyon elemanıdır. Yol koşullarından kaynaklanan yük ve titreşimleri aşağı, yukarı yönlü yaptığı salınım hareketi sayesinde emerek aracın şasesini ve bileşenlerini korumaktadır. Bakım maliyetlerinin düşüklüğü ve dayanımlarının yüksek olması nedeni ile ağır vasıta araçlarında çokça tercih edilmektedir. Zorlu hava koşullarına direkt olarak maruz kalması ve çalışma koşullarının zorluğundan ötürü, yaprak yayın tasarımı önemli bir süreç oluşturmaktadır. Bu çalışmada yaprak yayın tasarım parametrelerinin sonlu elemanlar analizi ve yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak simülasyon edilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle yaprak yayın üretilmesi için gereken tasarım süreçlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda klasik yaprak yay modellerinden farklı olarak hibrit bir yaprak yay modeli oluşturulmuş ve bu modelde parametre edilerek yeni modelin sağlayacağı katlıların ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Yaprak yayın dayanım ve sönümlleme işlemlerine etki eden: Yay lamasının kalınlığı, lamanın uzunluğu, lamanın genişliği ve uygulanan yük değerleri gibi etmenler farklı değerler verilerek parametre edilmiş ve her değişkenin yaprak yay etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda toplam 2160 adet yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan her model için gerilme, gerinim ve yay sabiti gibi sonuçlar göz önünde bulundurularak bir kıyaslanma yapılmış ve her modele ait sonuçlar paylaşılmıştır. Aynı zamanda araştırmalar esnasında kullanılan sonlu elemanlar analizi ve yapay sinir ağları yöntemlerinden elde edilen sonuçların birbirlerine yakınlığı ölçülmüş ve iki yöntemden de elde edilen verilerin birbirine uyduğu sonucuna varıldığı saptanmıştır.

Problem durumu / Konunun tanımı

İlk yaprak yayların kullanımına günümüzden çok eski zamanlarda rastlanmaktadır. Gelişen teknoloji ile farklı materyal ve farklı tasarımlara sahip birçok yaprak yay tasarımı yapılmış aktif olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada bir yaprak yay üreticisi firmanın kataloğunda bulunan yaprak yay modelleri temel alınarak birçok farklı boyutlandırma ve tasarıma sahip yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan her model için gerilme, gerinim, deformasyon ve yay sabiti gibi yaprak yayın dayanımını ve verimliliği etkileşimler göz önüne alınarak tek tek incelenmiş ve farklı yöntemler kullanılarak elde edilen veriler

kıyaslanmıştır. Böylelikle yaprak yayı etkileyen geometrik parametreleri değişimlerinin etkisi saptanmış ve optimal yaprak yay tasarımı için gereken süreç ve doğru tasarım boyutlandırmaları araştırılmıştır.

Araştırmanın amacı

Farklı geometrik tasarımlara ve boyutlandırmalara sahip yaprak yayların sonlu elemanlar analizi ve yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak modellenmesi ile elde edilen sonuçların kıyaslanması, günümüzde yaprak yayların dayanımının hesaplamasını yapmak için çok sık kullanılan sonlu elemanlar analizine yeni bir yol kazandırarak yapay sinir ağları yönteminin doğruluğunun ispatlanması.

Araştırmanın önemi

Yaprak yaylar çalışma koşulları nedeni ile ağır yüklere maruz kalan bir süspansiyon elemanıdır. Bu nedenle yaprak yayların dayanımının hesaplanması için uzun süren tasarım ve hesaplama süreçleri gerekmektedir. Bu çalışmada yaprak yayın dayanımına etki eden değişkenler farklı boyutlandırma ölçütleri verilerek parametrik yaprak yay tasarımları oluşturulmuş ve böylelikle yaprak yayın dayanımına etki eden her bir boyutlandırma değişimlerinin etkisi ölçülmüştür. Aynı zamanda yeni bir hibrit yaprak yay modeli oluşturulmuş ve bu modelin dayanımı ve verimliliği aktif olarak kullanılan yaprak yay geometrileri ile kıyaslanması bu çalışmada incelenmiştir.

Varsayımlar / Sayıtlar

Yapılan çalışmada oluşturulan yaprak yay modellerinin gerekli boyutlandırmaları bir üretici firma kataloğundan alınmıştır. Katalogda bulunamayan bazı boyutlandırmalara yaprak yaylar hakkında yapılan bilimsel çalışmalar ve kitaplardan temin edilmiştir. Temin edilemeyen boyutlandırma unsurlarına farklı değerler verilerek parametrik hale getirilerek değişimlerinin etkisi ölçülmüştür.

Sınırlılıklar

Yapılan çalışmada yaprak yayların parametrik analizi hedeflendiği için farklı boyutlandırmalara sahip birçok yaprak yay modeli tasarlanmış ve simülasyon edilmiştir. Çok fazla miktarda yapılan yaprak yay tasarımları nedeni ile yaprak yay modelleri üretilmesi maliyet ve zaman açısından kısıtlamalar oluşturulmuştur. Bu kısıtlamaların çözümü içinde günümüzde yüksek doğruluğu ispatlanmış iki farklı simülasyon yöntemi kullanılarak parametrik tasarım için gerekli modeller oluşturulmuştur.

Tanımlar

Yapılan araştırma sırasında sıkça kullanılan bazı söz öbekleri kısaltılmıştır. Bunlar:

SEA: Sonlu elemanlar analizi

YSA: Yapay sinir ağları

2. LİTERATÜR

Sağlam vd. çalışmada Temel amaç olarak Isuzu Eurobus modelinde kullanılan yaprak yayın Solidworks programı kullanılarak nümerik statik analiz yapmak olarak belirlemiştir. Çalışmada ilk olarak aktif olarak kullanılan ve hasara uğrayan yaprak yay incelenmiş ve kırılma olayına neden olan sebepler incelenmiştir. İncelemenin ardından yaprak yay modeli oluşturulup belirli sınır şartları altında incelenmesi tamamlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda yaprak yaylarda oluşan hasarın en temel nedeninin yanlış malzeme seçimi olduğuna değinilmiş ve Oluşturulan yaprak yay modelinde malzeme olarak kompozit materyal seçilmesi durumunda yaprak yay daha iyi mekanik sonuçlar sağladığı saptanmıştır [1].

Çetinkaya ve Topaç yaprak yayların tasarlanmasının ardından oluşturulan tasarımın güvenliğini ölçmek için kullanılan ömür test standı tasarımı yapılmış ve standı oluşturan bileşenler ile gerçekleştirilen prototip uygulama hakkında incelemeler yapılmıştır. Yapılan test standında yol koşullarını simülasyon etmek için hidrolik pres kullanılarak yaprak yaya değişken yükler uygulanması amaçlanmıştır. Hidrolik sistemin güç uygulamasını sağlayan elektronik üniteler ve diğer bileşenlerde detaylı olarak tanıtılmıştır. Piyasada kullanılan 10 katlı bir yaprak yay modeli üretilen test standında birçok farklı yük uygulanarak test edilmiş ve 1 ton yük altında kullanımının güvenli olduğu saptanmıştır [2].

Bildik ve Işık çalışmalarında cam elyaf keçe, cam elyaf dokuma ve cam elyaf fitil malzemelerin farklı reçineler ile birleştirilmesi ile oluşturulan polimer kompozit yaprak yayların kıyaslanması amaçlamıştır. Çalışmada 5 farklı numune üretilmiştir. Üretilen numuneler ASTM D 2344 standartları çerçevesinde 3 nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Deney sonucu elde edilen veriler ile sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Deney verileri ve sonlu elmanlar yöntemine göre en düşük gerilme cam elyaf dokumadan üretilmiş olan modelde oluştuğu saptanmıştır. Fiber oranı yaprak yayda düştükçe yayda oluşan gerilmenin arttığı ve yayın dayanımını azalttığı saptanmıştır [3].

Tokgönül vd. 52CrMo4 çeliği kullanılması planlanarak tasarımı yapılan tek katlı bir parabolik yaprak yayın üretimi ve bu üretimden elde edilen numunenin doğrulanmasının

yapılmasını incelemiştir. 52CrMo4 çeliğinden üretilen lama ısıtma işlemi haddelendirme göz unsurunun oluşturulması gibi bir yaprak yay üretimi için gerekli olan adımlar izlenmiştir. Toplamda 5 farklı numune yapılmış ve üretim işlemlerinin ardından numuneler üzerine gerilim ölçerler yerleştirilmiş ve numunenin sanal ortamda simülasyon edilmesi ile ulaşılan bulgular kıyaslanmıştır. Üretilen numunenin ağırlık ve ömür döngüsünde konvansiyonel yaprak yaylara göre pozitif etkiler gösterdiği saptanmıştır [4].

Poyraz çalışmasında cam elyaf epoksiden üretilmiş ve 1'den 6'ya kadar lama sayısına sahip kompozit yaprak yay üretilmiş ve üretilen yaprak yay çekme, basma ve 3 nokta eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Yaprak yay aynı zamanda sonlu elemanlar analizi kullanılarak modellenmiş ve statik analize tabi tutulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda yaprak yayın kat sayısının artması yay sabiti ve deformasyon verilerinde olumlu sonuçlar sunduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda sonlu elemanlar ve deneysel yöntemler sonucu elde edilen verilerin uyduğu saptanmıştır [5].

Şener ve Maral hafif bir ticari aracın arka yaprak yayının, yorulma testleri için oluşturulmuş olan bozuk bir yoldan elde edilen yol karakteristik değerlerinin ölçülmesi ve test koşullarından kaynaklanan yük değerinin bulunarak yayın yorulma döngüsünün belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu doğrultuda yaprak yayın modeli oluşturulmuş ve bir Sonlu elemanlar programı kullanılarak yaprak yayın oluşturulan modeli statik analiz ve yorulma analizi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen veriler ile yaprak yayın çökme testinden elde edilen bulgular kıyaslanmıştır. İki farklı yöntemden elde edilen bulgular kıyaslandığında birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır [6].

Charde ve Bhope yaprak yayların ana lamasında oluşan gerilme değerlerini iki farklı model oluşturup, bu modelleri farklı yöntemler kullanarak ölçmeyi ve karşılaştırmayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda yarım boy uzunluğuna sahip iki yaprak yay modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar analizi ile incelemeye tabi tutulmuştur. Aynı zamanda deneye tabi tutulan yaprak yay modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller gerilim ölçer yardımı istenilen bulgulara ulaşılması sağlanmıştır. Elde edilen bulgular kıyaslandığında iki farklı yöntemin birbirine yakın sonuçlar verdiği saptanmış ancak Konsol giriş teorisi kullanılarak yay modelinin analitik incelenmesi yapıldığında doğru sonuçlar vermediği saptanmıştır. Oluşturulan model için en doğru sonuçların sonlu elemanlar analizi ve deneysel yöntemler ile elde edilmesiyle sağlandığı tespit edilmiştir [7].

Sunar ve Çevik çalışmalarında yaprak yay tasarımları ve üretimi için gereken zamanı indirebilmeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda 51CrV4 çeliğinden üretilmiş tek katlı bir parabolik yaprak yay modeli oluşturulmuş ve bir sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Aynı yaprak yay modeli deneysel yöntemler ile yorulma analizine tabi tutulmuştur. Analizler ve deneysel veriler ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Bu doğrultuda sonlu elemanlar analizi kullanılarak yaprak yayların tasarım aşamasındayken yayın kullanılabilirliği ispatlamıştır [8].

Manchanda vd. çelik ve kompozit malzemelerden üretilmiş olan yaprak yay tasarımı yapılmış ve yapılan tasarımlar bir sonlu elemanlar programı kullanılarak kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda 2 farklı kompozit malzemeden ve bir çelik malzemeden üretilmiş yaprak yay analiz edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda kompozit yaprak yay modelleri ile çelik yaprak yay modelinin; deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri açısından benzerlikler gösterdiği görülmüştür. Aynı zamanda kompozit yaprak yay kullanımı araçta ağırlık azalışına neden olduğu saptanmıştır [9].

Aher ve Sonawane hafif bir ticari araçta kullanılan 7 lamadan oluşan çelik bir yaprak yayın farklı yük değerleri altında deformasyon, ömür ve eğilme gerilmesi kriterleri esas alınarak analiz edilmiştir. Bu doğrultuda yaprak yayın modeli sanal ortamda oluşturulmuş ve simülasyon edilmiştir. Simülasyondan elde veriler ile analitik yöntemler ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda var olan yaprak yayın ömür döngüsü esas alındığında kritik sonuçlar vermediği saptanmıştır [10].

Ashok vd. çok katlı cam elyaf bileşenli bir kompozit yaprak yay ile 65Si7 çeliğinden üretilmiş bir yaprak yayı yük taşıma, yay sabiti ve ağırlık gibi kıstasları göz önüne alarak kıyaslamayı amaçlamıştır. Amaçlanan hedef doğrultusunda yaprak yay sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Aynı zamanda yaprak yaylar teorik hesaplama kriterleri göz önüne alınarak da 2 farklı malzeme belirlenen kıstaslara göre kıyaslanmıştır. Kompozit malzemeden üretilen yaprak yay belirlen kıstaslara göz önünde bulundurulduğunda çelik yaprak yaylara göre daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır [11].

Rajendran ve Vijayarangan çok katlı bir konvansiyonel yaprak yayı gerilme, deformasyon ve titreşim kriterleri esas olarak incelemiştir. Gerilme deformasyon analizleri için yaprak yayın bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar

analizinden alınan veriler ile teorik hesaplamalar ile elde edilen verileri ve deneysel sonuçlar ile elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda teorik hesaplamalar ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen verilerin neredeyse birebir uyuştğu deneysel verilerle kıyaslandığında ise büyük bir uyum içinde olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda oluşturulan yaprak yay modeli farklı frekans değerlerine göre titreşim analizine de tabi tutulmuştur [12].

Kumar ve Vijayarangan 7 lamadan oluşan, cam elyaf bileşenli kompozit bir yaprak yay ve çelik temelli bir yaprak yayı statik ve yorulma analizine tabi tutmuştur. Aynı zamanda iki farklı malzemeden üretilmiş yaprak yayı birbirleri ile kıyaslamıştır. Yapılan çalışmada yaprak yaylar sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen veriler deneysel veriler ile kıyaslanmış ve iki yöntemden elde edilen sonuçların uyuştğu gözlenmiştir. Kompozit yaprak yay ve çelik temelli yaprak yay kıyaslanması yapıldığında, kompozit yaprak yayın ömür ve ağırlık gibi parametrelere göre çelik yaprak yaydan daha fazla avantaj sağladığına ulaşılmıştır [13].

Kelebek vd. çalışmalarında bir ağır vasıta aracının ön süspansiyonunda kullanılan bir 3 lamalı bir yaprak yay yerine parabolik bir yaprak yay kullanımının araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak model analiz edilmiştir. Aynı zamanda yaprak yay yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan analizler sonucunda araçlarda konvansiyonel yaprak yay yerine parabolik yaprak yay kullanımının tasarım şartlarına bağlı olarak mümkün olduğu ispatlanmıştır. Aynı zamanda parabolik yaprak yay kullanımı ile araçta bağlı olduğu araçta önemli bir oranda ağırlık azalışına neden olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada parabolik yaprak yay modelinin avantajlarının yanında dezavantajlarına da değinilmiştir. Parabolik yaprak yaylar tek lamadan oluştuğu için konvansiyonel yaprak yaylara göre yay üzerinde oluşan gerilmenin belirli noktalarda odaklandığı ve parabolik yaprak yayın sönümleme işleminde daha etkisiz olduğu saptanmıştır [14].

Baviskar vd. çalışmalarında yaprak yay ana lamasını farklı tasarım parametrelerine göre modellenmiş ve statik yükleme koşulları altında bir sonlu elemanlar programı kullanılarak deformasyon ve gerilme kıstasları esas alınarak analiz edilmiştir. 3 farklı model tasarlanmış, en yüksek gerilme ve deformasyon değerlerine yaprak yayın göz unsurunun yakınlarında oluştuğu saptanmıştır [15].

Gowd ve Goud çalışmalarında hafif bir ticari araca ait yaprak yay sonlu elemanlar analizi kullanılarak, yaprak yayın güvenli yük miktarının bulunması amaçlanmıştır. Analizler için farklı yük değerlerine göre yaprak yay teorik ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak eş değer gerilme sonuçları bulunmuştur. Yapılan çalışmaya göre modellenen yaprak yay için güvenilir maksimum yük 7700 N olarak belirlenmiş ve maksimum gerilmenin ana lamada bulunan göz unsurlarının iç kısımlarında olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda teorik hesaplardan elde edilen eş değer gerilme değerleri ile sonlu elemanlar analizinde elde edilen eşdeğer gerilme değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır [16].

Raghavedra vd. tek katlı bir yaprak yayı 3 farklı kompozit malzeme kullanılarak modellenmesi ve modellenen 3 farklı kompozit yaprak yayın çelik esaslı yaprak yay ile gerilme ve deformasyon verileri esas alınarak kıyaslamıştır. Amaçlanan hedef doğrultusunda aktif olarak bir araçta kullanılan çelik yaprak yayın mekanik verileri elde edilmiş ve 3 farklı malzemeden üretilen yaprak yay modelleri çelik yaprak yay ile aynı geometrik boyutlandırma verileri kullanılarak modellenmiştir. Modellemeler bir sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Karbon/epoksi esaslı kompozit yaprak yay diğer kompozit yaprak yaylara ve çelik esaslı yaprak yaylara göre daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır [17].

Kumar ve Aggarwal çalışmalarında SUP9 malzemesinde üretilen 7 lamadan oluşan bir yaprak yay sonlu elemanlar analizi ve deneysel veriler ile analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı sonlu elemanlar analizi ile elde edilen bulguların doğruluğunu ölçülmesidir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen verilerin uyduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda tasarımı yapılan yaprak yay modelinin maksimum eşdeğer gerilme sonuçları akma noktasının altında olduğu saptanmış ve yapılan tasarımın güvenilir olduğu anlaşılmıştır [18].

Kumar ve Vijayarangan 7 lamadan oluşan çelik malzeme esaslı bir yaprak ile aynı tasarım geometrisine sahip bir cam elyaf-epoksi temelli kompozit yaprak yayı, yük taşıma kapasitesi, ağırlık, ömür, yay sabiti gibi parametrelere göre kıyaslamıştır. Kompozit yaprak yay tasarlanmış ve üretilerek deneye tabi tutulmuştur. Aynı zamanda kompozit yaprak yay bir sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda kompozit yaprak yayın daha iyi ömür, ağırlık, gerilme ve yolcu konforu sağladığı saptanmıştır [19].

Reddy vd. çalışmasında yaprak yay lamalarının geometrisini belirleyen unsurlardan olan; yay lamasının kalınlığı, lamanın genişliği ve lama uzunluğu gibi parametrelerin değişiminin yay sabitine, gerilmeye ve deformasyona olan etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Yapılan çalışmada bir sonlu elemanlar programında konvansiyonel yaprak yay modeli oluşturulmuş ve analize tabi tutulmuştur. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen veriler nümerik hesaplama ile elde edilen veriler ile kıyaslamaya tabi tutularak yapılan analizin doğruluğu ispatlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda lama kalınlığı ve genişliğinin artması; yay sabitini artırdığı, gerilme ve deformasyonu azalttığı bulgularına ulaşılmıştır [20].

Kumar ve Aggarwal çalışmalarında yaprak yayları malzeme ve yay tasarımı esas alarak yaprak yay modelleri oluşturup elde edilen sonuçları kıyaslamayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda bir parabolik yaprak yay ve 3 lamadan oluşan bir konvansiyonel yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Aynı zamanda oluşturulan yay modelleri için EN45A çeliği ve kompozit esaslı malzeme tanımlanarak yay malzemelerinin yaya olan etkileri de araştırılmıştır. Yapılan modeller bir sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda EN45A çeliğinden üretilmiş olan parabolik yaprak yayın gerilme ve ömür değerlerinin aynı malzeme esas alınarak tasarlanan konvansiyonel yaprak yaya kıyasla daha iyi olduğu saptanmıştır. Malzeme değişiminin etkisi incelendiğinde kompozit malzemenin EN45A çeliğinden üretilmiş yaprak yaylara kıyasla ömür ve gerilme sonuçları açısından daha iyi veriler sunduğu gözlenmiştir [21].

Patnaik vd. hafif bir araçta kullanılan tek katlı parabolik bir yaprak yayın; göz uzaklığı ve kavis değerlerindeki değişim esas alınarak gerilme ve deformasyon değerlerinin analizi hedeflenmiştir. Analizler için bir sonlu elemanlar modeli oluşturularak veriler elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kavis ölçüsünün artması yay üzerinde oluşan ortalama deformasyon değerlerini azalttığı, ortalama gerilme değerlerini ise artırdığı saptanmıştır. Göz uzaklığı artması ise hem ortalama gerilmeyi hem de ortalama deformasyon miktarını artırdığı saptanmıştır [22].

Refngah vd. 2 farklı çelik malzemeden üretilmiş parabolik ve konvansiyonel yaprak yayı sonlu elemanlar analizi kullanılarak analiz etmiştir. Çalışmanın temel amacı konvansiyonel yaprak yaylar yerine parabolik yaprak yayların kullanımının aynı yükleme ve sınır şartları altında test edilmesi ve kıyaslanmasıdır. Yapılan analizler sonucunda konvansiyonel yaprak yaylar için en kritik bölgenin merkezleme civatası için açılan deliğin çevresi olduğu

saptanmıştır. Parabolik yaprak yaylar için en kritik bölge ise yaprak yayın merkez noktası ile göz unsuru arasında kalan bölge olduğu anlaşılmıştır. Yapılan analizler sonucunda aynı zamanda her iki yaprak yay modelinin de üzerlerine uygulanan yük sonucu kritik bir hasar oluşmadığı gözlenmiştir [23].

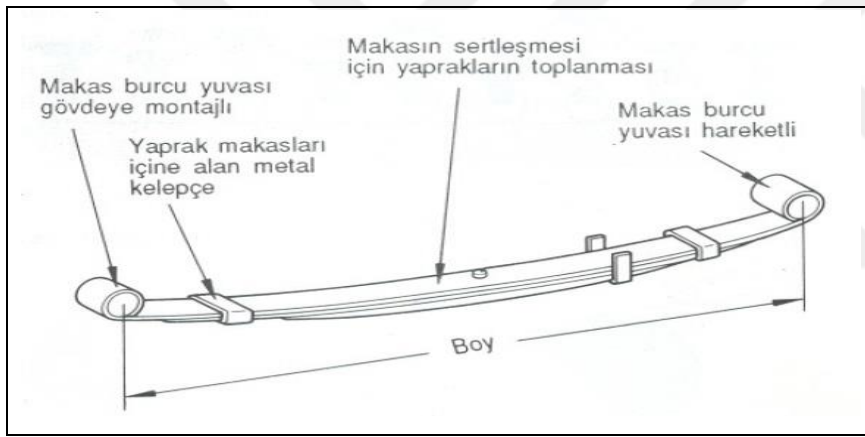
Jenarthanan vd. elle yatırma yöntemi ile üretilen hibrit bir kompozit yaprak yay modeli oluşturmuş ve üretmiştir. Oluşturulan yaprak yay modeli statik ve dinamik analize tabi tutularak hem deneysel yöntemler ile hem de bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı ile aynı zamanda çelik temelli bir yaprak yay oluşturulup aynı analizlere tabi tutulmuş ve kompozit yaprak yay ile kıyaslanmıştır. Yapılan analizler sonucunda kompozit yaprak yay kullanımı ağırlık ve sürüş verimliliği açısından avantajlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Kompozit yaprak yay kullanımı aynı zamanda yüksek deformasyon oluşumu ve yüksek aşınma oluşumu nedeni ile de olumsuz sonuçlar doğurduğu aktarılmıştır [24].

Aggarwal vd. EN45A çeliğinden üretilmiş olan yaprak yaylar için kumlama işleminin yayın yorulmasına etkisini araştırmıştır. Amaçlanan hedef doğrultusunda bir numune ve tam boyutlu bir yaprak yay üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Yorulma analizi için deneysel yöntemler kullanılmıştır. Deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile nümerik hesaplamalar kıyaslanmış ve bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Yapılan analiz doğrultusunda tam boyutlu yaprak yay ve üretilen numunenin yorulma değerlerinde farklılıklar olduğu gözlenmiş ve bu durumun temel nedeninin yaylar arası sürtünmeden dolayı oluşan fretting yorulmasında kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [25].



3. YAPRAK YAY

19. yüzyılın sonlarına doğru içten yanmalı motorların bulunması ile üretilen taşıtların ulaşabileceği hızlar artmış ve bozuk yol koşullarından ötürü araçların aldığı hasarlar da aynı oranda artmıştır böylelikle süspansiyon sistemlerinin de önemi artmıştır. Süspansiyon sistemlerinin temel görevleri aracın ağırlığını dengelemek, yol bozukluklarından dolayı oluşan etkileri şase ve araç bileşenlerinden korumak, hızlanma ve fren esnasında yol tutuşu sağlamaktır. Süspansiyon elemanları genel olarak amortisör, kollar, burçlar ve yaylardır. Bir süspansiyon sisteminin temel görevlerini yerine getiren esas eleman yaylardır. Burçlar, kollar ve amortisörlerin asıl görevi yayları desteklemek ve yay ile şasi arasındaki bağlantıyı sağlamaktır [26].



Şekil 3.1. Yaprak yay görseli ve bileşenleri

Süspansiyon elemanlarının temeli olan yayları tanımlamak gerekirse. Yaylar; üzerlerine bir yük uygulandığı zaman elastik olarak şekil değiştirebilme potansiyeline sahip makine elemanıdır. Çoğu makine elemanı da aynı şekilde elastik şekil değiştirebilme potansiyeline sahip olmasına karşın yayların en temel farkı kendi geometrisini korumadan şekil değiştirebilmesidir. Yaylar bu özelliği sonucunda üzerlerine uygulanan enerjiyi sönmülemeyebilme ve titreşim yalıtımı sağlamak gibi temel görevlerini yerine getirebilmektedir [27].

Yaprak yaylar araçların hareketi esnasında çukur ve tümsek gibi yol kusurlarından ortaya çıkan dikey kuvvetleri ve aracın frenleme esnasından oluşan kuvvetleri absorbe edip sürüş emniyeti ve konforu sağlayan bir süspansiyon elemanıdır. Yaprak yaylar ilk olarak orta

çağda at arabalarında tahtadan yapılarak kullanılmaya başlanmıştır. 2. Dünya savaşı sırasında tank teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte yaprak yaylar üzerine yapılan çalışmalar artmış, dayanıklı olması ve o günün şartlarına göre iyi bir sönümleyici olması nedeniyle taşıtlarda kullanılmaya başlanmıştır. Binek araçlarda kullanılması ise dünyanın farklı ülkelerinde 1970'lerden sonra başlamıştır. Sürüş konforunun düşük olması, düzenli bakım gerektirmesi gibi nedenlerden ötürü binek taşıtlarda kullanım süresi kısıtlı olmuştur. Günümüzde binek araçlar yerine kamyonet, iş makineleri, askeri araçlar ve kamyonlar gibi ağır taşıtların çoğunlukla arka süspansiyon elemanı olarak kullanılmaktadır [28, 29].

Yaprak yaylar temel olarak üzerine uygulanan yük sonucunda oluşan kinetik enerjiyi depolayıp geometrilerini değiştirip potansiyel enerji olarak içyapısında tutar ardından potansiyel enerjiyi salınım hareketi yaparak içyapısından atar ve eski geometrik yapılarına döner. Yaprak yaylar araca gelen darbeleri sönümleme işleminin yanında aksı destekleme görevi de görmektedir. Yaprak yaylar 3 farklı sınıfta toplanabilir. Bunlar; Konvansiyonel yaprak yaylar, parabolik yaprak yaylar ve havalı süspansiyon yaprak yaylarıdır [30].

3.1. Parabolik Yaprak Yaylar

Parabolik yaprak yaylar konvansiyonel yaprak yaylara göre daha az ağırlık taşıyabilen ve bu doğrultuda küçük kamyonetlerde kullanılan bir süspansiyon elemanıdır. İsmi yayı oluşturan lamaların şeklinden almaktadır. Parabolik yaprak yaylar bir veya daha fazla lamanın bükülüp parabolik bir forma sokulması ve bu lamaların bir merkez cıvata ile birleştirilmesi ile oluşturulur. Konvansiyonel yaprak yaylara göre daha az lamadan oluşması en temel farkıdır. Yay katmanlarının azalması ile katmalar arası sürtünme sorunu giderilir böylelikle yayın sürtünmeden dolayı oluşan aşınmadan yıpranması, sürtünmenin oluşturduğu ses düzeyi azalmaktadır. Parabolik yaprak yaylar sürtünmeden dolayı oluşan problemlerin giderilmesini sağlamanın yanında maliyet ve kullanıldıkları taşıtta ağırlığın azalması gibi avantajlar da sunmaktadır. Parabolik yaprak yayları 2 sınıfta toparlayabiliriz. Bunlar: tek kademeli yaprak yay ve çok kademeli yaprak yay çeşitleridir [4, 22, 31].



Şekil 3.2. Parabolik yaprak yay görseli

3.2. Z Tipi Yaprak Yay

Tek kademeli serbestlik derecesine sahip hibrit bir süspansiyon elemanıdır. Temel olarak darbeleri sönümleme işlemi hem mekanik hem de hava basıncı yardımı ile gerçekleştirilir. Genel olarak maliyetinin fazlalığı ve üretiminin zor olmasından kaynaklı olarak diğer yaprak yay türlerine göre daha az tercih edilir [32, 33].



Şekil 3.3. Z tipi yaprak yay

3.3. Konvansiyonel Yaprak Yaylar

Konvansiyonel yaprak yaylar bağlantıdan önce eğik bir form verilmiş farklı uzunluklara ve eşit kalınlıklara sahip birden fazla lamanın paralel olarak bir araya getirilmesi ile oluşturulur. En dıştaki yani diğer bir deyişle en uzun lama yaprak yay ile araç aksı arasındaki bağlantıyı sağlayan göz formunun verildiği lamadır. Ana lamanın üzerine diğer lamalar bir merkezleme

cıvatası ile bağlanır ve yaprak yayın üzerine yük uygulandığı zaman lamaların birbiri üzerinde kaymaması için kelepçeler ile lamalar birbirine bağlanır. Konvansiyonel yaprak yayların üzerlerine yük bindiği zaman en alt lamadan en üst lamaya doğru sırayla lamalar birbirlerine yükü eşit miktarda ileterek sönümlemeyi sağlar. Sönümleme işlemi sırasında yaprak yaylar birbirine temas ederek bir sürtünme kuvveti oluştururlar. Oluşan bu sürtünme kuvveti sönümleme için avantajlı bir durum oluşturmasının yanında malzemenin ömrüne de dezavantajlı bir durum da oluşturmaktadır. Birbirine sürtünen lamalar sonucunda malzemenin yüzeyinde korozyon oluşmakta ve malzemenin ömrünü kısaltmaktadır. Sürtünme kuvvetinin malzeme için kabul edilebilir bir düzeyde olması için lamaların arasına düzenli olarak gres yağı ile gerekli bakım işlemleri yapılarak malzemenin ömrü uzatılır [10, 34].



Şekil 3.4. Konvansiyonel yaprak yay görseli.

Konvansiyonel yaprak yaylar dizayn şekillerine göre 6 sınıfa ayrılmıştır. Bunlar; Tam elips, üç çeyrek elips, yarım elips, çeyrek elips, tersine birleştirilmiş yarım elips ve ankastre olarak birleştirilmiş yarım eliptik formlarıdır [35].

3.4. Yaprak Yay Bileşenlerinin Tanıtımı

3.4.1. Yay laması

Yay laması yaprak yayların en temel bileşenidir. Yay lamaları belirli bir genişlik ve kalınlık değerine sahip çelik veya kompozit malzemeden üretilmiş olan ve yaprak yayın üzerine gelen darbeleri süspansiyon etmesini sağlayan bileşendir. Yay lamasının tasarımı 6 farklı parametreye bağlıdır. Bunlar: lamanın uç şekli, lama genişliği, lama uzunluğu, lama kavis, Lama kalınlığı ve lamanın kesit profili gibi parametrelerdir.

Kavis

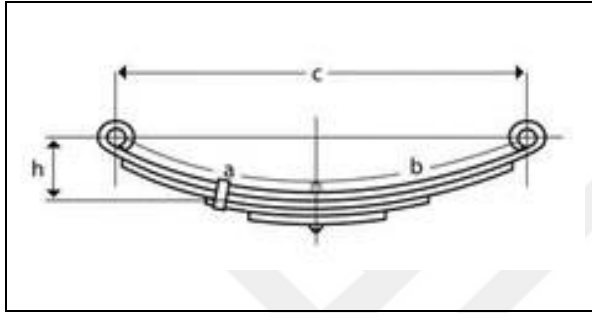
Yay kavis değeri yay lamalarında montaj esnasında oluşan gerilme durumunu azaltmak için uygulanır. Lamaların kavis değerini anlamak için öncelikle eksen çizgisinin bulunması gerekmektedir. Eksen çizgisi lamanın sağ ve sol uçlarında bulunan göz unsurlarının merkezlerinden geçen hayali bir eksenidir. Kavis değeri ise bu hayali eksen ile eksene en yakın olan lama arasındaki uzaklık tanımlanabilir. Eksen çizgisinin bulunması sonucunda ulaşılan kavis değerine serbest kavis değeri denir. Serbest kavis değeri yaprak yaya yük uygulanmamış hali üzerinden bulunur. Serbest kavis değeri ile yaprak yay uygulanan yük sonucu oluşan eğilme gerilmesinin oluşturduğu kavis değişiminin toplanması ile yaprak yayın üzerine yükleme yapıldığı zaman oluşan kavis değeri hesaplanabilir. “Eş. 3.1” gösterilmiştir [36].

$$q_{serbest} + q = q_{yükleme} \quad (3.1)$$

$$q = \frac{M}{E \cdot \sum I_n} \quad (3.2)$$

Kavis değeri yaprak yay lamalarında farklılıklar göstermektedir. Lamaların dizilim açısına göre pozitif veya negatif kavis değerleri alınabilir. Birbiri üstüne konularak birleştirilen katlar eğer pozitif kavis açısı değerine sahipse pozitif açı azalarak, eğer negatif kavis açısı değerine sahipse kavis açısı değerleri artarak lamalar tasarlanır. Pozitif kavis açısına sahip tasarımlarda lamaların konumu eksen çizgisinin üstünde kalacak şekildedir. Negatif kavis açısına sahip lama tasarımların lamaların konumu eksen çizgisinin altında kalacak

şekildedir. Kavis değerleri değişmesine rağmen yay lamalarının kavislerinin bir uyum içinde olması istenmektedir. Montaj veya yaprak yayın çalışması esnasında konumları açısından birbirlerinin altında veya üstünde olan yay lamalarının bütün yüzeyleri temas halinde olması yaprak yayın dayanımı ve yük sönümlemesi için daha iyi sonuçlar vermektedir. Lamalar birbirleri ile tüm yüzeyleri boyunca temas halinde olmaması durumunda yay lamalarının temas ettikleri bölgelerde noktasal basınç alanları oluşur ve durum yaprak yayın dayanımını etkilemektedir [36].



Şekil 3.5. Yay laması parametreleri

Genişlik

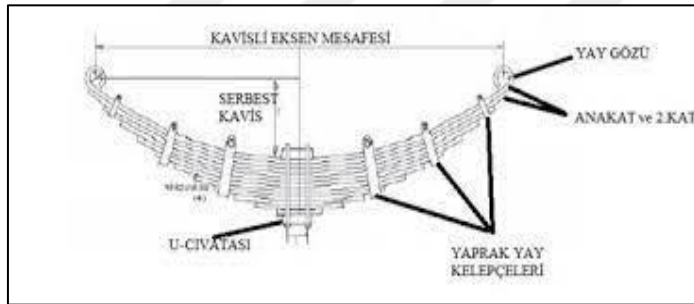
Yay lamasının genişliği yay dayanımını ve yol koşullarından kaynaklanan darbe ile titreşimleri emebilmesini etkileyen önemli bir parametredir. Yay lamasının genişliği minimum 50 mm ve maksimum 140 mm olarak tasarlanması önerilen lama genişliği parametresidir [37].

Uzunluk

Lama uzunluğu temel olarak bir yay lamasının merkezleme civatası ile sağ ve solda bulunan kenarları arasındaki uzaklıktır. En uzun lama göz unsurunun bulunduğu lama olup bu lamaya ana lama ismi verilir. Ana lamadan diğer lamaya doğru gidildikçe lamaların boylarının değişmektedir. Lama boyları arasında oluşan bu boyutsal değişim adım olarak isimlendirilir ve lamaların adımlarının yaprak yayın sönümleme görevi için önemli bir uzunluk parametresidir.

Merkezleme cıvatası ile yaprak yayın en sağında bulunan uzunluk ve en solunda bulunan uzunluk yay lamaları için eşitse yaprak yay simetrik konvansiyonel yaprak yay olarak isimlendirilir. Uzunluk değeri eşit değilse simetrik olmayan konvansiyonel yaprak yay olarak iki kategori altında gruplandırılabilir. Konvansiyonel yaprak yay simetrik ise lama uzunluğu merkezleme cıvatası ve lamanın bir kenarı arasındaki uzaklığın iki katı olarak hesaplanabilir. Konvansiyonel yaprak yay simetrik değilse lama uzunluğu her iki uç ile merkezleme cıvatası arasında bulunan uzunluğun toplanması ile elde edilir. Lama uzunluğu hesaplanırken dikkat edilecek bir diğer unsur ise kavis değerlerine göre uzunluğun belirlenmesidir. Lamaların merkezleme cıvatası ve 2 ucu arasındaki uzunluk değerinin tasarım için belirlenmesi veya ölçülmesi yayın kavisli yapısı göz önüne alınarak yapılmaktadır. Bir diğer değişle lamaların uzunlukları belirlenmesi kavisli yapıdaki lamanın iki ucu arasındaki yatay mesafedir. Yay lamasının boylarının ve adım değişiminin hesaplanması “Eş. 3.3” gösterilmiştir [20].

$$L_{i\ net} = i \frac{L}{n} \quad (3.3)$$



Şekil 3.6. Yay laması kavisli eksen mesafesi gösterimi

Kalınlık

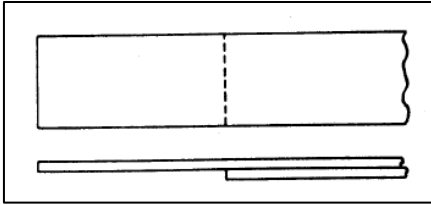
Yaprak yay lamalarında kalınlık, yay lamasının üretildiği malzemenin et kalınlığına gösteren bir parametredir. Kalınlık değeri yay sabiti, yay laması üzerinde oluşan gerilme ve gerilim gibi sonuç etmenlerini etkileyen bir parametredir. Yay lamasının belirlenen kalınlık değerleri aynı zamanda yayın montajı için gerekli olan alanı da etkilemektedir. Merkezleme cıvatasının bulunduğu bölgeden yay lamalarının toplam kalınlığına serbest kavis değerinin eklenmesi ile yaprak yayın yüksekliğini oluşturmaktadır. Yaprak yayın montajının sağlanacağı alanın minimum ölçüsü bu değerde olmalıdır.

Kalınlık değerleri genellikle aynı boyutlarda olmasına karşın farklı büyüklüklerde olabilmektedir. Araç üreticileri genellikle ana lamanın kalınlığını diğer lamanın kalınlıklarına kıyasla bir miktar büyük olmasını istemektedir. Bu durumun temel nedeni ana lamanın sağ ve sol kenarlarında bulunan göz unsurunun yakın kısımlarında oluşan gerilme yoğunluğuna karşı ana lamanın dayanımını artırmaktır. Kalınlık aynı zamanda yay tasarımı sırasında seçilen lama ucu geometrisine bağlı olarak da değişiklik göstermektedir.

Lama ucu çeşitleri

Kare

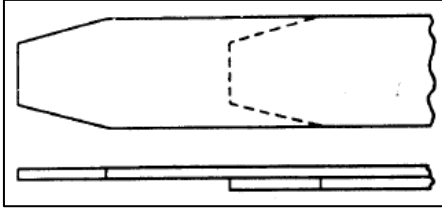
Kare uç tipine sahip yaprak yay lamaları temel olarak üretim kolaylığı nedeni ile tercih edilmektedir. Lamalar istenilen ölçüler doğrultusunda makaslama yöntemi ile kesilerek kare tipi uç elde edilir. Tek kesim işlemi uygulanmasından dolayı üretim maliyetleri düşüktür. Üretim maliyetlerinin düşük olmasına rağmen basınç yoğunluğu oluşturması nedeni ile kullanım için ideal sonuçlar sağlamamaktadır. Kare uç basınç yoğunluğu oluşturmasının yanında katlar arası sürtünmeyi de artırmaktadır. Artan sürtünme ile lamalar üzerinde fretting yorulmasının oluşmasına ortam hazırlanmaktadır [36].



Şekil 3.7. Kare uç [36]

Elmas tipi (mızrak)

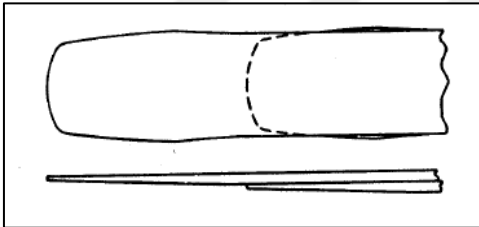
Elmas tipi uca sahip yaprak yay lamaları kare tip uca sahip lamalara kıyasla daha az bir gerilme yoğunluğuna sahiptir. Gerilme yoğunluğunun azalmasının nedeni kare uca bulunan keskin bölgelerin kesilerek atılması sonucunda yay laması üzerinde oluşan gerilme bir noktaya odaklanmak yerine daha eşit bir dağılım sağlamaktadır [36].



Şekil 3.8. Elmas tipi uç [36]

Konik

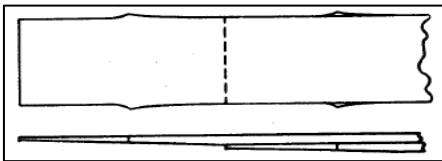
Konik kesimli uç en yay lamaları için en ideal uç tipidir. Konik uc şekline sahip lamalar uc şeklinin diğer şekillere farklılaşmasının yanında lama kalınlığının en uca doğru gidildikçe azalması ile durumu göz önünde bulundurularak üretilmektedir. Konik uca sahip modellerde keskin dönüşlerin veya yüzeylerin olmaması nedeni ile lama üzerinde oluşan gerilme yoğunluğu azalmakta bu durumda lama için en ideal uç tipi olmasını sağlamaktadır. Gerilme yoğunluğunun azalmasının yanında konik tipli uç aynı zamanda yay lamaları arasındaki sürtünmenin de en aza indirgenmesini sağlamaktadır [36].



Şekil 3.9. Konik uç [36]

Konik ve kesilmiş uç

Konik ve kesilmiş uç, yay lamaları arasında en fazla temas alanını sağlayan uç tipidir. Bu modelde uç kısımların kalınlığı merkez noktasından uzaklaştıkça azalmaktadır [36].



Şekil 3.10. Konik ve kesilmiş uç [36]

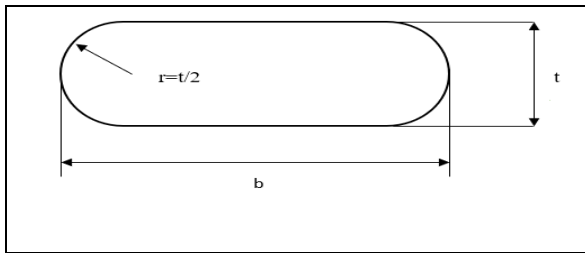
Yay Laması Kesit Alanı Çeşitleri

Yaprak yayların kesit alanı ve şekli hakkında ülkelerin bağlı olduğu standartlar doğrultusunda değişiklikler göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilen yaprak yaylar için 1990 yılında SAE (Society of Automotive Engineers) tarafından yazılan spring design manuel kaynağından yararlanılarak yaprak yay lamalarının kesit şeklinin tasarımı veya üretimi yapılabilir. Bu standarda göre: yay lamasının kesiti 2 düz düzlem ve bu iki düzlem arasındaki kenarların dış bükey kavisli olacak şekilde form verilmesi üretilmesi gerektiğini göstermektedir. Dış bükey kavisli kenarların kavis değerleri lama kalınlığının 65-85% arasında olmalıdır.

TSE'nin Ekim 2005 tarihinde çıkarmış olduğu TS EN 10092-1 numaralı (Sıcak haddelenmiş yay çeliğinden yapılan yassı çubuklar- Bölüm 1: Yassı çubuklar- Boyutlar, şekil ve boyut toleransları) standardına göre yay lamaları 3 farklı kesit şekline göre üretilebilir. Bu kesitler: kesit A, kesit B ve kesit C olarak isimlendirilmiştir. Bu kesit alanlarının şekli düz lamanın kenar şekline göre farklılaşmakta ve bu doğrultuda üretimi yapılabilir.

Kesit A

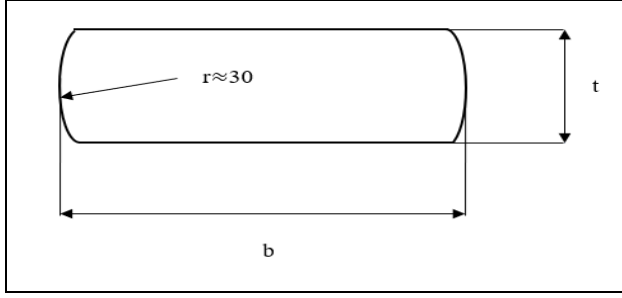
Kesit A'da düz lamanın kenarları, lama kalınlığının yarısı olacak şekilde kenarlara dış bükey kavisleme işlemi yapılır.



Şekil 3.11. A kesit tipi

Kesit B

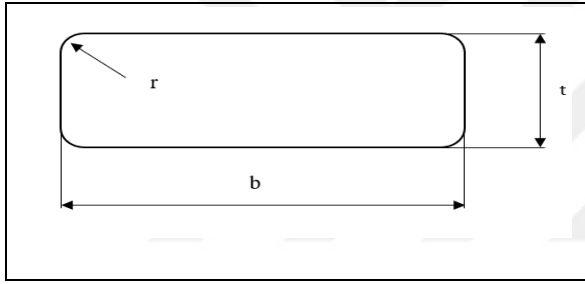
Kesit B'de düz lamanın kenarları, kavis değeri 30 mm olacak şekilde dış bükey kavis verilerek elde edilir.



Şekil 3.12. B kesit tipi

Kesit C

Kesit C’de düz lamanın 4 köşe noktası belirlenen ölçüler dahilinde yuvarlama işlemine tabi tutulur.



Şekil 3.13. C kesit tipi

3.4.2. Yaprak yay gözü

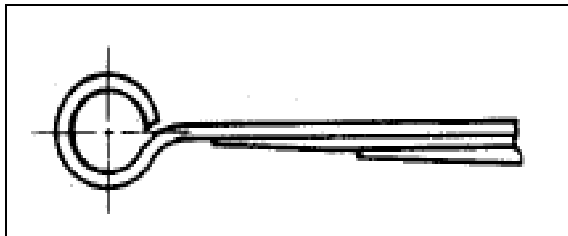
Yaprak yaylarda göz unsuru süspansiyon işlemini sağlayan yaprak yay ile aracın birleşmesini sağlayan bileşendir. Yaprak yaylar araçların şasisine bağlanarak araç üzerine uygulanan yükleri süspansiyon etmektedirler. Yaprak yaylar araç şasesi ile göz adı verilen unsurlar ile bağlantı kurulur. Göz unsurlarının ana lamada olması temel bir unsurken ana lamada haricinde diğer lamalara da yaprak yayın yanal yüklemelere dayanımı artırmak için göz unsuru oluşturulabilmektedir. Göz unsuru ana lamanın uç kısımlarına dairesel bir form verilmesi ile elde edilir. Göz unsuruna dairesel bir form verilmesinin nedeni yay üzerine uygulanan yük neticesinde oluşan hareketlere oluşturulan dairesel form ile izin verilebilmesidir. Yaprak yaylar elde edilen dairesel form ile bu dairesel form ile aynı geometrik şekle sahip şaside bulunan çıkıntıya monte edilir. Göz formu üretim şekillerine göre birbirinde farklı olacak şekilde geometrilere sahip olabilmektedir. Her farklı geometriye

sahip göz tasarımının kendine ait bir model ismi ve kendine ait özellikleri bulunmaktadır. Göz tipleri arasındaki temel fark göz unsurunun yönü ve göz unsurunu kaç tane lamanın dairesel form verilmesi ile elde edildiğine göre farklılık göstermektedir. Yaprak yayın tasarım aşamasında uygulanan yük doğrultusunda en uygun göz tipi seçilerek yaprak yayın ömrü dayanımını artırmak temel hedeftir. Yaprak yaylar göz kısımları için verilen dairesel form yaprak yayın geometrisinde bir süreksizlik oluşturmakta ve aynı zamanda yaprak yayın üzerine uygulanan yük sonucu oluşan gerilme göz unsuruna yaklaştıkça artmakta ve en yüksek gerilme değerleri göz çevresinde oluşmaktadır. Bu nedenle en uygun göz tipi yaprak yayın tasarım aşamasında iken belirlenmesi yaprak yayın tasarımı için doğru bir çözüm yöntemi olacaktır [37, 38].

SAE'ye göre toplam 8 farklı çeşitte yaprak yay göz tipi belirlenmiştir. Bunlar: yukarı kıvrımlı göz, askeri tipte sarım, aşağı kıvrımlı göz, Berlin tipi göz, Berlin ve askeri tipte sarım, kaynaklanmış göz, oval göz ve düz bağlantılı gözdür. Birçok farklı göz çeşidi olmasına rağmen Berlin tipi göz ve yukarı kıvrımlı göz en çok tercih edilen göz tiplerindendir.

Berlin göz

Berlin tipi göz unsurunun merkezi ana lamanın orta düzleminden geçmektedir. Böylelikle yay üzerine uygulanan kuvvetler sonucu göz unsurunun yapısının bozulması ile göz unsuru ve şase arasındaki bağlantının zayıflamasının önüne geçilmektedir [36].

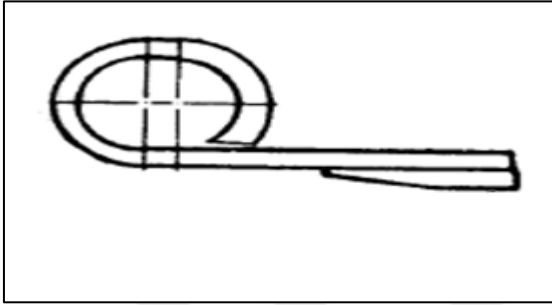


Şekil 3.14. Berlin tipi göz [36]

Oval göz

Oval göz formu diğer göz unsuru tiplerinden farklı olarak tam bir dairesel şekil oluşturmamaktadır. Oval göz formunun şekli yuva formuna benzemektedir. Bu göz unsuru

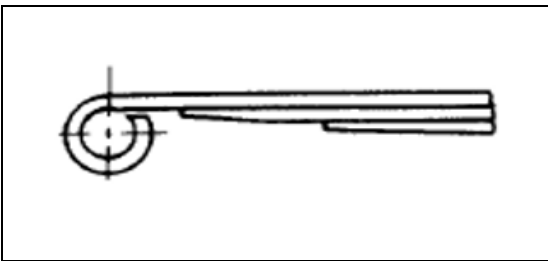
kauçuk burçların kullanılması için uygun geometrik şekli sağlamaktadır. Kullanılan kauçuk burçların yatay ve düşeyde bulunan sertlik dereceleri eşit olmadığı için oval form ile bu tarz burçların daha kolay göz unsurunun içine girmesini sağlamaktadır. Oval göz tip aynı zamanda yaprak yay üzerine uygulanan yatay kuvvetlerin absorbe edilebilmesine iyi oranda olanak sağlamaktadır [36].



Şekil 3.15. Oval tip göz [36]

Aşağı kıvrımlı göz

Bu göz unsuru diğer göz tipleri gibi ana lamaya bağlı olarak tasarlanmaktadır. Diğer göz unsurlarından farklı olarak Göz unsurunun bağlı olduğu lama en dışta olduğu için göz unsurunun dayanımını artırmak için gözü çevreleyen ek bir göz formu oluşturmaya uygun bir yapıda değildirler. Bu göz tasarımı araçta daha iyi bir sürüş kontrolü sağladığı için bu durumlar kullanımı tercih edilebilmektedir [36].

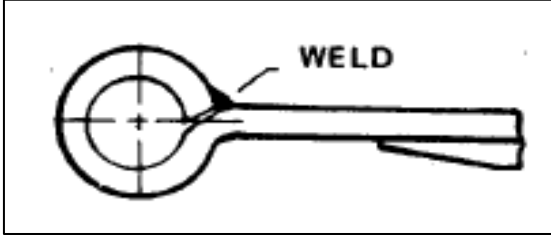


Şekil 3.16. Aşağı kıvrımlı göz [36]

Kaynaklanmış göz

Kaynaklanmış göz unsuru diğer göz unsurlarından farklı olarak ana lama ile göz unsurunun açık olan uç kısmının kaynaklanması ile edilen bir göz çeşididir. Yatay kuvvetlerin çok

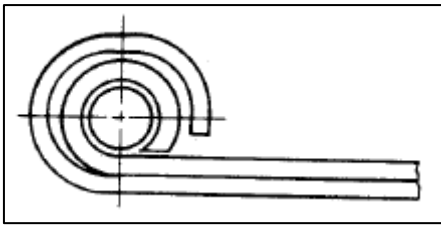
yüksek olduğu durumlardan dolayı oluşabilecek yapısal zararları önlemek için sıklıkla kullanılan bir göz tipidir. Kaynaklama işlemine başlamadan önce ısıtılma tabi tutularak bağlantının dayanımı artırılabilir [36].



Şekil 3.17. Kaynaklanmış göz [36]

Askeri sarımlı göz

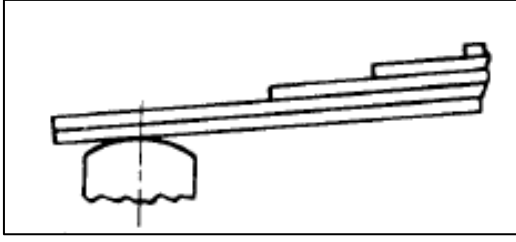
Askeri sarımlı göz unsuru tipi ismini aldığı askeri araçlar ve tarım araçlarında sıkça kullanılmaktadır. Askeri sarımlı göz unsuru tipi temel olarak yukarı kıvrımlı göz unsurunun etrafına onu çevreleyen bir altındaki lamaya göz formu verilmesi ile elde edilir. Oluşturulan ikinci göz unsuru ile göz unsurunda oluşan aşırı yükleme durumlarında yükün belirli bir oranda paylaşılmasını yani göz unsuruna bir destek oluşturma görevi sağlanmaktadır. Aynı zamanda göz unsurunun kırılması durumunda kısa süreli olarak yedek bir göz görevi sağlamaktadır [36].



Şekil 3.18. Askeri sarımlı göz [36]

Düz bağlantılı göz

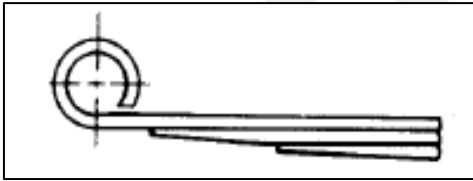
Düz bağlantılı göz tipinde yaprak yay ile aracın şasesinin bağlantısı için göz unsuruna dairesel bir form verilmez. Şase ile yaprak yayın bağlantısı yaprak yayın uç kısmına konulan bir kauçuk bir materyalin şaseye ve yaprak yay bağlanması sonucu elde edilir [36].



Şekil 3.19. Düz bağlantılı göz [36]

Yukarı kıvrımlı göz

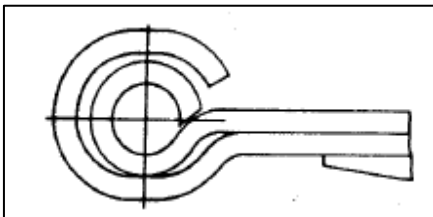
Yukarı kıvrımlı göz en çok kullanılan göz unsuru tipidir. Yukarı kıvrımlı göz unsuru kolay üretilmesi ve dayanımının yüksek olması nedeni ile en çok tercih edilen göz unsuru tipidir. Yukarı kıvrımlı göz unsurunun üretiminde göz unsuru en içte bulunan ana lamaya verilir. Ana lama en içte bulunduğu için gerekli görüldüğü takdirde ana lamanın etrafına ekstra bir göz unsuru yapısı oluşturulabilir [36,39].



Şekil 3.20. Yukarı kıvrımlı göz [36]

Berlin ve askeri tipte sarım

Askeri sarımlı göz unsuru tipinin farklılaştırılmış halidir. Berlin ve askeri tipte sarım göz unsurunu üretmek için öncelikle ana lamaya Berlin tipi göz unsuru oluşturulur ve oluşturulan bu göz unsurunu çevreleyen ikinci bir göz unsuru oluşturulur [36].



Şekil 3.21. Berlin ve askeri tipte sarım [36]

3.4.3. Burçlar

Burçlar yaprak yayın göz unsuru ile şase bağlantısı arasında kullanılan bir bağlayıcı eleman olarak tanımlanabilir. Burçlar yaprak yayın göz adı verilen unsurunun iç kısmına çakılarak monte edilir. Burçlar kullanıldıkları araç türüne göre farklı malzemeler kullanılarak üretilir. Ağır vasıta araçları için fosfat kaplamalı bronzdan üretilmiş burç kullanımı yaygındır. Hafif vasıta araçları içinse kauçuktan yapılan burçlar kullanılabilir. Yaprak yaylarda Burç kullanımının bağlayıcı eleman olma görevinin yanında birçok farklı görevde üstlenmektedir [40].

Yaprak yaylar açık havada çalışma koşulları nedeni ile paslanmaya karşı yatkın bir konumdadır. Burç kullanımı yaprak yayda oluşabilecek paslanmaya karşı bir önlem sağlamaktadır. Çeliklerin birbirlerinin yüzeylerine değerek oluşturdukları sürtünme kuvveti sonucunda sürtünme olayının olduğu yüzeylerde talaş kaldırma meydana gelmektedir. Oluşan sürtünme kuvveti sonucunda parçanın yüzeyini hava ile temastan koruyan kaplama veya boya gibi etmenler aşınma olayının başlaması ile yaprak yay yüzeyinde aşınarak kaybolur. Boya ve kaplamanın ardından yaprak yay temas eden yüzeylerinde aşınma başlar ve bu durumda hava ile temas eden yaprak yay göz unsuru ve şasi bağlantısı arasında korozyon oluşumu başlar. Göz unsuru gibi yaprak yaylar üzerinde gerilmenin fazla olduğu bölgelerde malzemelerin paslanması önlemek yay ömrü için kritik bir noktadır. Bu nedenle birbiri arasında temas eden hareketli yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin düşürülmesi iş parçasının ömür döngüsü için önemlidir [41].

Yaprak yaylar burç kullanımı ile aynı zamanda sürüş konforunu yükseltici etmenler sağlanmaktadır. Burç kullanımı ile yoldan kaynaklı meydana gelen yükleri sönümleme işlemi sırasında oluşan ses ve titreşim için bir yalıtım sağlamaktadır [36].



Şekil 3.22. Yaprak yay burcu örnek resim

3.4.4. Küpeler

Yaprak yaylar üzerlerine uygulanan yük sonucunda yay malzemesine veya yayın geometrisine bağlı olarak yaprak yayda deformasyon oluşur. Oluşan deformasyon ile yay üzerine uygulanan yükün araç  asesine aktarılmadan absorbe edilmesi sağlanmış olur. Yaprak yaylarda uygulanan yük sonucu eğilme gerilmesi oluşur ve oluşan eğilme gerilmesi sonucu yaprak yay tek yönlü esneme hareketi gerçekleşir. Hareket sadece aşağı ve yukarı yönlü olarak gerçekleşmektedir. Yaprak yaylarda kullanılan küpelerin görevi ise tek yönlü oluşan esneme olayın diğer yönlerde de ger ekle ebilmesini sağlamaktadır. Yaprak yaylarda küpe kullanımı ile birlikte taşıt  asesi yönünde oluşan esneme ile birlikte yaprak yay üzerinde sıkışma meydana gelmeyerek yayın daha rahat görevini yerine getirerek, yay karakteristiğini yarı yarıya etkilemektedir [14, 43].

Yaprak yaylarda küpeli bağlantılar yaprak yayın göz unsurların bir tanesine bağlantı yapılarak kullanılır. Küpeli bağlantı yapılan göz unsuru hareketli olmaktadır. Küpeli bağlantılı yaprak yaylarda üzerine yük uygulanması sonucu küpeli bağlantı rotasyon hareketi yaparak yayın rotasyon hareketinin yapıldığı y n boyunca hareketine izin verir. Küpe kullanılmayan diğer bağlantı ise göz unsuru ile  ase arasında bir burç yardımı ile gerçekleştirilir. Küpe bağlantılarının tek parça c tipi, tek parça y tipi, çift cıvatalı, perçinli cıvatalı ve konik pimli küpe olmak üzere 5 farklı çeşidi bulunmaktadır [36].



Şekil 3.23. Yaprak yay küpesi

3.4.5. Merkezleme Cıvatası

Merkezleme cıvatasının genel görevi ayrı ayrı katmalar halinde üretilen yay lamalarının tek bir merkez üzerinden birleştirilmesini sağlamaktır. Merkezleme cıvataları lamaları birleştirmek için lama üzerinde açılan delikli bölgeler kullanılır. Üretimde montaj işlemi sırasında açılan delikler hizalanarak merkezleme cıvatası bütün deliklerin içinden geçecek şekilde monte edilir ve en merkezleme cıvatasının alt ucundan bir somun takılarak yayların birleşik bir halde kalması sağlanır. Merkezleme cıvataları yay terimleri ve yaylar için gerekli tasarım ölçülerinin belirlenmesinde temel bir unsur görevi de görmektedir. Yaprak yayın türü (simetrik veya simetrik olmayan yaprak yay) gibi parametrelerin belirlenmesi merkezleme cıvatasının konumuna göre değişmektedir. Merkezleme cıvatasının bir diğer görevi de yaprak yayın araca montajı sırasında bir yayın konumun anlaşılmasını ve araç ile yay montajının bu konum ile gerçekleşmesini sağlamaktır. Merkezleme cıvatasının çapı yay lamalarında oluşturulan deliğe göre değişmektedir. Yay lamaları üzerinde delik oluşturulurken uygulanan zımbalama işlemi soğuk veya sıcak olarak gerçekleştirilmesine göre delik çapının boyutu da değişmektedir. Zımbalama işlemi soğuk olarak gerçekleştirilirse delik çapı yaprak yayın en ağır lamasının kalınlığına eşit veya fazla olmalıdır. Aynı zamanda soğuk zımbalama işlemi uygulanabilmesi için yay lamasının kalınlığının 14 mm'den az olması önerilmektedir. Zımbalama işlemi sıcak olarak gerçekleştirilirse delik çapı yay lamasının kalınlığından küçük olabilmektedir [36].



Şekil 3.24. Merkezleme cıvatası örnek görsel

3.4.6. Kelepçeler

Yaprak yaylarda kelepçeler farklı lamalardan oluşan parçaları gerekli görülen bölgelerden birleştirmeye yarayan unsurlardır. Yaprak yay lamaları, kelepçenin yay lamalarını muhafaza ettiği kanala konulması ve bu kanalın iki ucu bir cıvata veya peçin gibi bir elemanla birbirine tutturulur ve böylelikle kelepçe bağlantısı sağlanır. Yaprak yaylarda kullanılan kelepçeleri 2 ana grupta inceleyebilir. Bunlar: hizalama ve merkezleme kelepçeleridir.

Hizalama Kelepçeleri ana lama ile diğer lamaların birbirlerine paralel olarak kalmasını sağlayan bir birleştirme elamanıdır. Hizalama kelepçeleri 8 alt grupta incelenebilir. Bunlar: cıvatalı kelepçeler, perçinli kelepçeler, tek parçalı kutu kelepçe, çift parçalı kutu kelepçe, şerit kilitli kelepçe, ters kelepçe, şerit kilitli ve kabızlı kelepçe ve kayış kelepçedir. Her hizalama kelepçesi modelinin görevi aynı olmakla beraber kullanıldıkları araç, kelepçenin bağlantı farklılığı, yay lamasının geometrisine ve kelepçenin kanal tipinin farklılığına göre değişmektedir [36, 43].



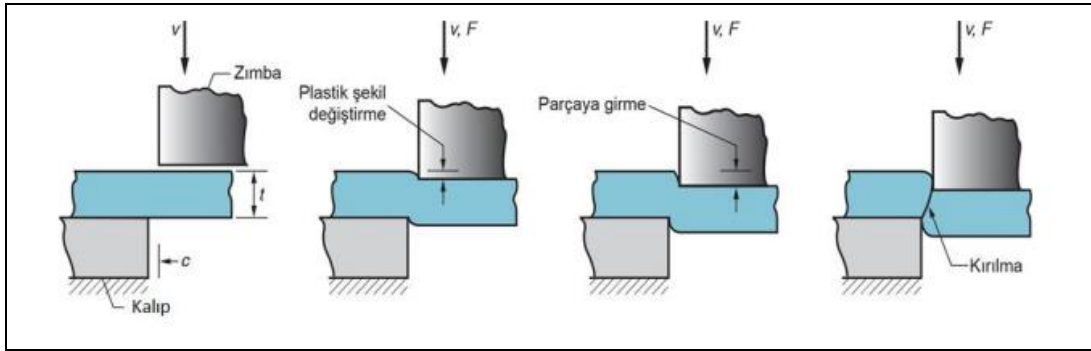
Şekil 3.25. Hizalama kelepçeleri örnek görsel

Merkezleme kelepçeleri yatay yükleme sonucu kırılmaya ve yaprak yayın birleştirici yapısını sağlayan merkezleme cıvataları üzerindeki yüklemeyi azaltıcı bir etki sağlamaktadır. Merkezleme kelepçelerinin bir diğer görevi ise yaprak yay ile aracın şasesi arasındaki bağlantı konumunu oluşturmaktır. Merkezleme kelepçeleri yay lamalarının orta bölgesinde yani merkezleme cıvatasının bulunduğu yerde konumlandırılır [36].

3.5. Yaprak Yay Üretim Adımları

3.5.1. Lama kesme işlemi

Kesme işlemi yaprak yay üretiminde ilk adımdır. Yaprak yaylarda kesme işlemi bir talaşsız kesme işlemidir. Kesme işlemi temel olarak yaprak yay lamalarının istenilen uzunluk ölçüleri doğrultusunda kesilme işlemidir. Kesme işlemi için hidrolik veya mekanik bir sistemden güç alan kesici ucun (giyotinin) kalıp üzerinde bulunan iş parçası üzerine uyguladığı kesme kuvveti sonucu iş parçasının 2 parçaya ayrılmasını sağlayan kesim yöntemidir. Bu kesim yöntemine makaslama yöntemi denmektedir. Kesme işlemi ile iş parçasında plastik deformasyon oluşur. Kuvvet uygulanmaya devam edilmesi ile iş parçası kopma oluşarak parça istenilen boyutlarda kesilir. Bu işlem malzemenin iç yapısına ve kalınlığına göre sıcak veya soğuk olarak yapılabilir. Malzeme sünek veya kalınlığı fazla değilse işlem soğuk olarak yapılabilir. Makaslama işleminde kesici uç ile kesim olayının gerçekleştiği kalıp kenarının arasındaki mesafe makaslama işleminin kalitesini etkileyen bir parametredir. Mesafenin kısa olması iş parçasının çift kıvrılmasına, mesafe fazla olursa iş parçasında çapak oluşumu meydana gelir. Boşluk mesafesi blok kalınlığının %4-%8 i kadar olması gerekmektedir [44].



Şekil 3.26. Giyotinle kesme işlemi

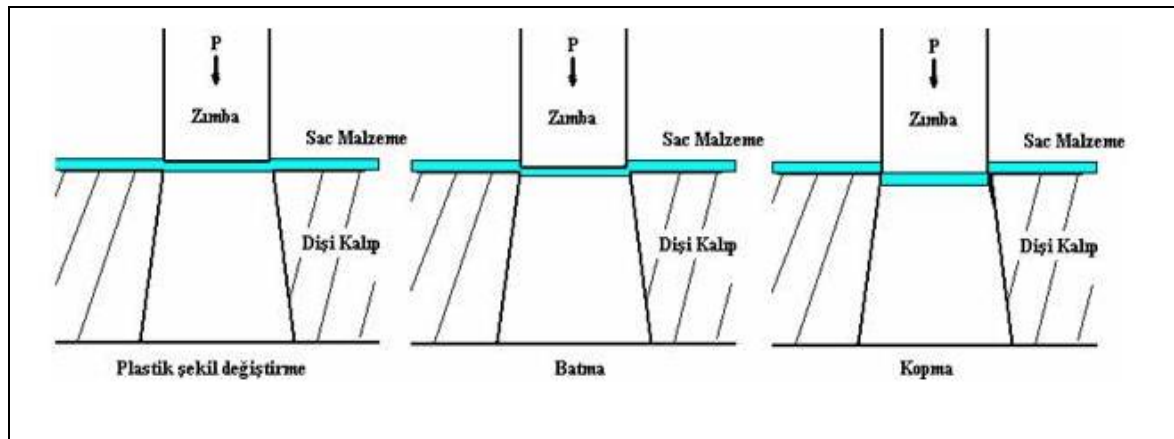
3.5.2. Delme işlemi

Delme işlemi yaprak yayın her lamasına uygulanan bir işlemdir. Delme işleminin amacı yaprak yay lamalarını bir arada tutmaya yarayan merkezleme civatası ve yay lamalarının bağlantısı için gerekli boşluğun oluşturulmasıdır. Yaprak yaylarda delme işlemi bir Talaşsız kesme operasyonu kullanılarak gerçekleştirilebilir. Delme işlemi temel olarak iş parçası

üzerine yük uygulanması sonucu iş parçası üzerinden atılmak istenilen bölgenin çıkarılması ile gerçekleşmektedir. Bu operasyon kalıpla kesme olarak adlandırılır. Yaprak yaylarda bu operasyon daha düzgün sonuçlar alabilmek ve işlemin daha rahat yapılabilmesi için delik delinecek bölgelerin ısıtılması ile gerçekleştirilir. Kalıpla kesme operasyonunda kesme işlemini yapan zımbanın belirli bir kuvvet ile iş parçasına doğru itilmesi bir dişi kalıp boyunca uygulanması sonucu gerçekleşir. 3 aşamadan oluşmaktadır. Delme işlemi temel olarak 3 safhadan oluşmaktadır. Bunlar: Plastik deformasyon, batma ve kopmadır. Plastik deformasyon aşamasında parçaya uygulanan yük sonucu parçanın elastik sınırı geçmesinin ardından oluşur bu noktada yük sonucu oluşan deformasyon kalıcı bir hal almaktadır. İkinci aşama batma aşamasıdır. Bu safha iş parçası üzerine kesici ucun $1/3$ 'ü kadar girmesi sonucu oluşur ve $1/2$ kalınlığına batmasına kadar bu aşama devam eder. Son aşama ise kopma aşamasıdır. Bu safhada iş parçası üzerine yük uygulanmaya devam edilmesinin ardından kesici uç iş parçasının $2/3$ katı kalınlığına kadar girmesi ile başlar ve iş parçasının istenilen ölçülerde kesilmesi ile sonuçlanır [44].

Delme işleminde iş parçası üzerine kuvveti uygulayan zımba ve dişi kalıp arasında ölçüsel olarak bir boşluk olmalıdır. Bu boşluğa kesme boşluğu ismi verilir. Kesme boşluğunun değeri sac kalınlığının $1/10$ ila $1/20$ si kadar olarak hesaplanabilir.

Delme işlemi için bir başka önemli unsur ise açılal boşluktur. Açılal boşluk değeri iş parçasının dişi kalıptan zarar görmeden çıkmasını için dişi kalıp üzerindeki boşlukta verilen bir eğim açısıdır. Açılal boşluk değeri $0,25$ ila $0,75$ derece arasındadır [44,45].



Şekil 3.27. Zımbalama işlemi görseli

3.5.3. Haddeleme

Yaprak yaylarda haddeleme işlemi yaprak yay ve yaprak yayların göz yapısı için önemli bir işlemdir. Haddeleme işlemi genel olarak aynı hızda ama farklı yönlerde dönen ve iş parçasının kalınlığından daha az açıklığa sahip iki merdanenin içinden iş parçasının geçirilmesi ile gerçekleşir. Haddeleme işlemi sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilebilir. Sıcak haddeleme işleminde malzeme rekristalizasyon sıcaklığına kadar ısıtılır. Rekristalizasyon sıcaklığı yaklaşık olarak çeliğin ergime sıcaklığının yarısı kadardır. Rekristalizasyon sıcaklığına ulaşılması ile iş parçasında var olan birbirine zıt yönlü dislokasyonlar ve malzemenin sertliği azalarak daha kolay bir işleme gerçekleştirilir. [46]

Yaprak yaylarda uygulanan haddeleme işlemi temel olarak sıcak haddeleme yoluyla gerçekleştirilir. Yay katmanının uç kısımları ısıtılır haddelenir. Haddeleme yaprak yayın uç kısmı belirlenen geometriye göre kalınlığı azaltılır. Ayrıca yaprağa göz unsuru gibi verilecek yeni geometrik şekiller daha kolay elde edilir [33].

3.5.4. Yaprak yay gözü üretimi

Yaprak yay göz formunun verilmesi işlemine göz kıvrma işlemi denilmektedir. Göz kıvrma işlemi için öncelikle yaprak yay lamasının uç kısmı ısıtılır. Isıtma işleminin sıcaklığı yay lamasının üretildiği çeliğin türüne göre farklılıklar göstermektedir. Isıtma işleminin temel amacı göz formunun kolayca verilebilmesini sağlamaktır. Göz formu için önceden belirlenmiş olan göz açıklığı büyüklüğü dikkate alınarak yay laması bu göz açıklığını verecek olan bir milin etrafına sarılması ile elde edilir. Bu işlem için uç kısımlarından ısıtılan yaprak yay laması bir mil ve yay lamasını sabit olmasını sağlayacak bir sabitleyici arasına sıkıştırılır. Yay lamasının uç kısmı ile milin temas ettiği yüzeye ters olacak şekilde bir pres yay lamasının uç kısmına yük uygulanır. Uygulanan yük sonucunda yay laması milin şeklini alır. Lamanın uç kısmının milin şeklini almasının ardından göz formunu veren mil belirlenen tur miktarı kadar döndürülmesi sonucu istenilen göz formuna ulaşılır. İstenilen göz formunun elde edilmesinin ardından sıcak olan yaprak yay uçları soğumaya bırakılır.



Şekil 3.28. Göz unsuru üretim görseli

3.5.5. Su Verme

Su verme işlemi genel olarak metal bir iş parçasının östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılıp, bir soğutma sıvısı yardımı ile ani bir şekilde soğutulması ile gerçekleşen bir üretim yöntemidir. Su verme işlemi temelde bir çeliğin atomik yapısını değiştirmektedir. Su verme işlemi ile çelik yüzey merkezli kübik yapıdan hacim merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Oluşan bu dönüşüm ile malzemeyi daha sert ve dayanımı yüksek bir hale getirmektedir.

Yaprak yayların üretiminde su verme işleminin kullanılmasının temelde 2 nedeni vardır. İlk olarak su verme ile yayın daha sert bir yapıya ulaşması ve ikinci olarak da yaprak yayın kavisli formunun verilmesidir. Bu iki işlemin ortak noktası östenitleme sıcaklığına çıkılmasıdır. Östenitleme sıcaklığına çıkılmasının ardından yaprak yay lamaları istenilen kavis açısı doğrultusunda hidrolik presler ile sıkıştırılarak elde edilir [46].

Su verme işleminde yaprak yaya uygulanacak sıcaklık miktarı çeliğin karbon ve alaşım elementlerine bağlıdır. Kullanılan çeliğin karbon oranı ötektoid noktanın altındaysa yani %0,8 in altındaysa yaprak yay laması Ac3 sıcaklığının 10-20 °C üstüne kadar ısıtılır. Ac3 sıcaklığının bulunmasına yarayan formül, “Eş. 3.4” de gösterilmiştir [49].

$$Ac3=910-203-15.2.(Ni).(Si)+104V+31.5.(Mo)+13.(W) \quad (3.4)$$

Lamanın Ac3 sıcaklığına ulaşmasının ardından su verme işleminde ikinci aşama olan bekleme aşamasına geçilir. Bu aşamada Yaprak yay laması sabit Ac3 sıcaklığında belirli bir süre bekletilir. Bu süre kabaca 20 dakika artı lamanın her yarım milimetre kalınlığı için 1 dakika olacak şekilde bekleme süresine eklenir. Bekleme işleminin asıl nedeni ısıtılan lamanın merkezi ile yüzeyinin aynı sıcaklığa ulaşmasını sağlayarak lamanın bütün katmanlarının ostenit faza geçmesini sağlamaktır, diğer bir deyişle lamanın sertleşebilirliğini artırmaktır. Sertleşebilirlik kavramı ile lamada kullanılan çeliğin yapısının yüzde ne kadarlık kısmının ani soğuma ile martenzit dönüşüme geçebileceği anlaşılır. Lamanın yüzde martenzit miktarı ne kadar artarsa sertliği de o kadar artmaktadır. Yapılan su verme işleminden sonra lamanın istenilen değerlere kadar sertleşip sertleşmediği jominy alın sertleştirme deneyi ölçülebilir [49].

Su verme işleminin en son adımında Ac3 sıcaklığına kadar ısıtılan lamalar su veya yağ ile dolu bir tanka lamanın bütün yüzeyleri temas edecek şekilde daldırılır. Bu işlemde asıl amaç ise lamanın ani bir soğutmaya tabi tutulmasıdır. Soğutma işleminin ani bir şekilde uygulanması ile lamada bulunan atomik yapı içinde difüzyon olmaz ve lamanın atomik yapısında perlit, ferrit, beynit veya artık ostenit fazı oluşmadan direk martenzit yapı oluşur. Martenzit yapıya dönüşümde lamanın sadece soğuk akışkana batırılması yeterli değildir. Aynı zamanda soğuma hızı da önemlidir. Soğuma hızı yaprak yay lamasında kullanılan çeliğin kritik soğuma hızından yüksek olması da gereklidir. Kritik soğuma hızı lama da kullanılan çeliğin içerdiği karbon miktarı, soğutmayı sağlayan akışkan ve çeliğin içindeki alaşım elementleri ile orantılı olarak değişmektedir [49].

Kritik soğutma hızı geçildikten sonra martenzit yapının oluşmaya başladığı sıcaklık ise Ms olarak adlandırılır ve Ms sıcaklığının bulunuşu “Eş. 3.5” gösterilmiştir [50].

$$Ms=539-432.(\%C-30.4).(\%Mn-17.7).(\%Ni-12.1).(\%Cr-7.5).(\%Mo) \quad (3.5)$$

Martenzit yapının oluşumun bittiği sıcaklık ise Mf sıcaklığı olarak adlandırılır ve Ms sıcaklığından yaklaşık olarak 165-245°C daha azdır [50].

Ms ve Mf sıcaklıkları arasında geçen soğuma işlemi 3 ana evreden oluşur. Bunlar; A, B ve C evreleri olarak isimlendirilir. A evresinde soğutma sıvısı ile sıcak iş parçasının teması sonrasında iş parçasının etrafında bir buhar filmi oluşmaktadır. Oluşan buhar katmanı ile iş

parçası ve soğutma sıvısının teması engellenmiş olur ve bu yüzden ısı geçişi sınırlı olur. B evresinde buhar katmanı ortadan kaybolur ve iş parçası ile soğutma sıvısının teması başlar. En iyi soğutma bu evrede görülmektedir. Son evre olan C evresi sıcak iş parçasının sıcaklığı ile soğutma sıvısının kaynama noktası sıcaklığı birbirine yaklaştığı noktada başlar. En az soğuma bu evrede gerçekleşir [48].

Soğutma işlemi için çok farklı akışkan kullanılabilir. Bunlar; Su, yağ, tuz, tuzlu su karışımı gibi akışkanlardır. Genellikle yaprak yay lamalarının soğutmasında yağ kullanılır. Yağlar suya kıyasla 1/3 kadar daha az soğutma gücüne sahip olmasına karşın yay lamalarının yağ ile soğutulması farklı avantajları beraberinde getirmektedir. Yağ ile soğutma yapılması sonucunda soğutma işlemi sırasında oluşan yüzey hasarlarının oluşumu azalmaktadır. Bu durumda yayın ömrünün uzamasını sağlamaktadır. Su verme işlemi sırasında yay lamalarına verilen eliptik form nedenine oluşan bekleme süresi dolayısıyla atomik yapıda oluşan difüzyon hızı azalmaktadır. Bu durumun normalleşmesini sağlamak için yaprak yay lamalarının soğutması sırasında yağ kullanımı önemli bir kıstastır [49].

3.5.6. Menevişleme

Yaprak yaylarda kullanılan malzemeler genel itibari ile dayanımı yüksek ve sünek malzemelerden seçilmesi yaprak yayın ömür döngüsü ve dayanımı için önemlidir. Yüksek dayanım ve süneklik temelde malzemenin mekanik özelliği açısından iki farklı kutup olarak nitelendirilebilir. Malzemenin dayanımının yüksek olması için yaprak yaylarda kullanılan çeliğin atomik yapısında bulunan kristal yapıların fazlaca kayma (dislokasyon) hareketi yapmaması gerekmektedir. Malzemede oluşan kayma hareketini azaltmak için; alaşım kullanımı, soğuk şekillendirme ile malzemede oluşan plastik deformasyonların artırılması ve tane sınırlarını küçültme yöntemleri izlenebilir. Yaprak yayların dayanımı artırmak için kullanılan çeliklerde hem alaşımla işlemi yapılması hem de tane sınırlarını küçültme işlemi yapılarak yaprak yayların dayanımını artırılmaktadır. Yaprak yaylarda kullanılan çelikler ostenit yapıdan hızla soğutularak martenzit yapı haline getirildiği takdirde yaprak yayın dayanımı için gerekli mukavemet şartları sağlanmış olur.

Yaprak yay çeliğinin martenzit yapı haline getirilerek dayanımını artırılırken malzemenin sünekliğini ve yaprak yayın tokluğunu azalmaktadır. Azalan tokluk ve süneklik değerlerini geri kazanmak için çeliğe menevişleme (temperleme) işlemi uygulanmaktadır.

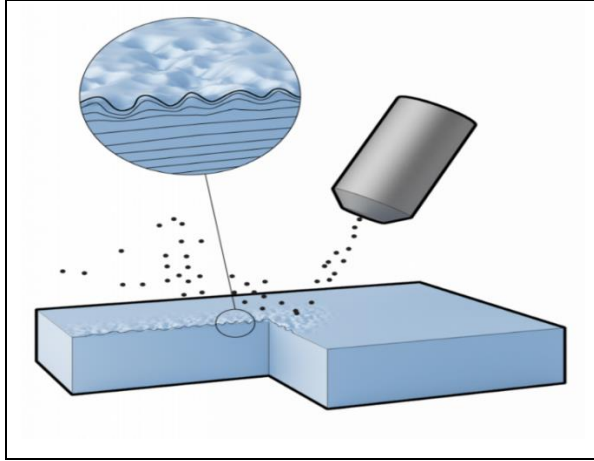
Menevişleme işlemi genel olarak martenzit yapıdaki çeliklerin atom kafesinin düzenlenmesine ve içyapısında oluşan gerilmelerin giderilmesini sağlayan bir işlemdir. Menevişleme işlemi malzemenin 100 ila 670 °C arasında ısıtılması ve ardından ısıtılan çeliğin soğutulması ile gerçekleştirilir. Yapılan menevişleme işlemi yay çeliğinin sertleştirilmesinin hemen ardından yapılmalıdır. Tavlama işleminden sonra menevişleme işlemine başlanması için çeliğin yaklaşık olarak 40 ila 50°C sıcaklığına soğumasından sonra işleme başlanılır [49].

Menevişleme işlemi esnasında bir çeliğin mekanik özelliklerinde ki değişimler genel olarak; menevişleme sıcaklığı, çeliğin içinde bulunan karbon ve alaşım oranları, ısıtma işlemi öncesinde çeliğin yapısal karakteri ve menevişleme sıcaklığında bekleme süresi gibi değişkenlere bağlıdır [49].

Menevişleme sıcaklığının ve süresinin artması ile birlikte çeliğin mikro yapısına bağlı olarak malzemede çekme ve akma dayanımı değerleri düşerken, süneklik ve tokluk değerleri artmaktadır. Bu nedenle yaprak yay yapımında kullanılan çeliğin menevişleme sıcaklığı malzemenin mekanik özellikleri etkilemektedir. Tasarım aşamasında kullanılacak yaprak yay çeliğinin ve menevişleme sıcaklığının belirlenmesi yaprak yay için önemli bir kriterdir. İdeal temperleme sıcaklığı ve süresi çeliklerin kimyasal bileşenlerine ve çeliğin kalınlığına göre farklılaşmakta olup 51CrV4 çeliği için önerilen temperleme süresi 1 saat, önerilen temperleme sıcaklığı ise 380 ila 680°C arasındadır [51, 52].

3.5.7. Bilyalı dövme işlemi

Bilyalı dövme işlemi yaprak yayların üretim aşamasında kullanılan ve son derece önemli bir işlemdir. Bilyalı dövme işleminin genel mantığının anlaşılması için öncelikle artık gerilmelerin açıklanması daha doğru olacaktır. Artık gerilmeler bir malzemede dış etkenlere tabi olunmadan oluşan elastik gerilmeler olarak tanımlayabiliriz. Artık gerilmelerin ulaşabileceği maksimum sınır malzemede en fazla akma gerilmesi değerine kadardır. Artık gerilmeler genel olarak malzemenin üretim yöntemlerine bağlı olarak oluşabilmenin yanında plastik deformasyona uğrayan malzemede uniform bir gerinme dağılımı oluşmadığı zamanlarda da oluşur [53].



Şekil 3.29. Bilyalı dövme işlemi görseli

Artık gerilmeler üretilecek malzemeye ve çalışacağı ortama bağlı olarak istenilen veya istenilmeyen bir durum olarak karşımıza çıkabilir. Genel olarak basma artık gerilmeleri malzemede oluşan yorulma çatlaklarının başlamasını engellemektedir. Yüzeyde oluşan yorulma çatlakların oluşumunu engellemek de malzemenin ömrünü uzatmaktadır.

Bilyalı dövme işleminde genel olarak yaprak yaylar ve diğer malzemeler için yüzey ve yüzey altı özellikleri geliştirmeye yarayan bir ılık ya da soğuk olarak uygulanan bir işleme metodudur. Bilyalı dövme işleminde temel mantık bir akışkanın oluşturduğu basınç ile püskürtülen malzemeler yardımı ile malzemenin yüzeyinde basma gerilmesi oluşturmaktır. Püskürtülen bilyalar malzemenin çarptıkları yüzeyinde tümsekler ve çukurlar oluştururlar. Bu çukur ve tümsekler aslında malzemenin yüzeyinde belirli bir oranda plastik deformasyon oluşturur. Malzemenin üst yüzeyinde kalıcı basma gerilmesi ve yüzeyden iç taraflarına inildikçe elastik deformasyona uğramış bölgelerde artık çekme gerilmesi oluşmaktadır. Yüzeyde oluşan artık basma gerilmesi ile dislokasyon oluşumu artar tane sınırları küçülerek malzemenin yüzeyinde yorulma çatlak başlangıcı ile gerilmeli korozyon başlangıcı gibi malzeme ömrünü etkileyen parametreler iyileşir [54, 55].

Bilyalı dövme işleminde dövme işlemi küçük boyutlara sahip küre şeklindeki cisimlerin malzemeye bir akışkanın sağladığı basınç ile hızlı bir şekilde püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Bu işlemde kullanılan küreler; paslanmaz çelik, kesme tel, cam, seramik ya da paslanmaz çelik gibi malzemeler kullanılabilir. İşlemde kullanılan bilyaların boyutları ve malzemenin yüzeyine çarpma hızları malzemenin dayanımını etkilemektedir. Bilyelerin

boyutunu ve hızını artırmak malzeme ömrünü pozitif olarak etkilemektedir. Ayrıca işlemin kalitesini uygulamanın yapılacağı malzemenin karakteristik özellikleri, püskürtmeyi sağlayan jetin açısı ve malzemeye olan uzaklığı, işleme maruz kalma süresi ve fırlatmayı sağlayan akışkanın basıncı gibi parametrelere bağlıdır [54, 56].

Yaprak yaylarda Bilyalı dövme işlemi yapılırken dikkat edilmesi gereken unsurların başında Almen yoğunluğu gelmektedir. Almen yoğunluğu Bilyalı dövme işleminin yoğunluğunu yani dövülme şiddetini gösteren bir faktördür. Almen şiddeti uygulanan malzemenin kalınlığına göre değişmektedir. Malzemeye uygulanan Bilyalı dövme işleminin yoğunluğu iyi ayarlanmazsa malzemede, dövmenin şiddeti ile aşırı bir konkavlık oluşur. Oluşan konkavlık derecesi yaprak yayların tasarımı için önemli bir parametre olup almen şiddeti Bilyalı dövme işleminde malzemeye göre iyi ayarlanmalıdır. Yaprak yayların Bilyalı dövme işleminde dikkat edilmesi gereken diğer unsurlar ise; Püskürtülen malzemelerin kırık olmaması, dövülen parçanın yüzey pürüzlülüğü, dövme işleminin yüzeyin ne kadarlık bir kısmına temas ettiği, bilyaların eşit bir hızda püskürtülmesi ve bilyaların püskürtülme açısıdır [57].

3.5.8. Boyama

Boyama işlemi yaprak yay üretiminde montajdan önce ki son adımdır. Boyama işlemi çelikten üretilmiş yaprak yayların dayanımı için önemli bir işlemdir. Çelikler malzeme bileşenleri doğrultusunda paslanmaya dayanıklı veya paslanmaya dayanıksız olarak sınıflandırılabilir. Paslanmaya karşı dayanıksız çeliklerde oluşan paslanma dış etmenlerden etkilenmektedir. Yaprak yaylarda kullanılan çelikler çalışma ortamları nedeni ile paslanma oluşumuna yani oksidasyona müsaittir. Yaprak yay lamalarının ayrıca birbirleri üzerine sürtünmesi sonucu oluşan fretting yorulması da yaprak yay lamasının yüzeyinden katman kaldırarak farklı bir türde korozyon oluşumu da görülmektedir. Yaprak yay lamalarının üzerine boya püskürtülmesi veya boya havuzuna daldırılması ile boya katmanı lama yüzeyini korozyon oluşumuna karşı koruma oluşturmaktadır. Lama yüzeylerinin korozyondan korunması için boyama işleminin yanında fosfat kaplama işlemi de yapılabilir. Fosfat kaplama 3 farklı şekilde yay laması koruması için kullanılabilir. Bunlar: Çinko fosfat, demir fosfat ve mangan fosfat şeklinde olabilir. Fosfat kaplama boyama işlemi sonucu oluşan korozyon direncinin yanında fretting oluşumuna karşıda yüzeyler arası sürtünme ile yay laması yüzeyinden katman kaldırılmasına karşıda koruma sağlamaktadır [16, 58].

3.5.9 Montaj İşlemi

Montaj işlemi yaprak yay üretimi için son adımdır. Montaj işleminde yaprak yayı oluşturan birleşenlerin bağlantısı yapılarak yaprak yayın son formu verilir. Yay lamaları üst üste konumlandırılır ardından lamaların birbirleri üzerindeki teması sağlamak amacıyla yay lamalarına yük uygulanarak yaprak yay formu verilir. Yay lamaları hidrolik pres ile verilen yaprak yay formunu korumak için lamaların orta noktalarında bulunan delikten merkezleme cıvatası ile birleştirilir. Merkezleme cıvatasının ardından yay lamalarının birbirleri üzerindeki konumunun kaymasını engelleyen kelepçeler yaprak yayın sağ ve sol uçlarına doğru yerleştirilerek bağlantı sağlanır. Montaj bağlantısının ardından yaprak yayların uygunluğu için teste sokulur. Bu testte yaprak yayın çalışma koşulları doğrultusunda teste tabi tutularak dayanımı ölçülür ve uygun veriler elde edildiği taktir de yaprak yayın üretim süreci tamamlanır.

3.6. Yaprak Yay Üretiminde Kullanılan Malzemeler

3.6.1. Çelik

Çelik tabiri basitçe demir cevherini az miktarlarda karbon takviyesi ile daha sağlam bir yapıya ulaşılması ile elde edilen bir malzeme olarak tanımlayabiliriz. Çelikler kimyasal bileşimlerine, kullanım alanları, mikro yapılarına, uygulanan ısıtım işlem türüne, üretim ve şekillendirme yöntemlerine göre sınıflandırılabilir. Bir demir karbon alaşımının çelik olarak isimlendirilebilmesi için malzemenin içinde yüzde en fazla %2 oranında karbon barındırması gerekmektedir. İçinde %2 oranından fazla karbon barındıran demir karbon alaşımları dökme demir olarak isimlendirilir. Çelikler içinde karbon dışında; Nikel, Krom, Bor, Molibden gibi birçok farklı element içerebilmektedir [59].

Çelikler genel olarak kullanılacakları ortama ve uygulanılacak yüke bağlı olarak kimyasal bileşimleri değiştirilerek farklı mekanik özelliklere sahip çelikler elde edilebilir. Kimyasal bileşimlerini değiştirmek için çelikleri alaşımlama yoluna gidilebilir. Alaşımla ile çeliğin atomik yapısı değiştirilerek akma dayanımı, çekme dayanımı, sünekliği ve tokluğu gibi özellikler istenilen değerlere ulaşılması sağlanır.

Yay çelikleri

Yay yapımında birçok farklı yöntem ile elde edilmiş çelik ve çelik alaşımları kullanılabilir. Yaylar için istenilen özelliklerin karşılanabilmesi için yaylar çoğunlukla çeliklerden üretilmektedir. Genel olarak yay için kullanılan çelikleri iki grupta incelenebilir. Bunlar; Martensitik ve Ostenitiktir. Yay çelikleri genel olarak farklı oranlarda Nikel, Molibden, Vanadyum, Silisyum ve Krom gibi elementlerden oluşan alaşımlardan oluşmaktadır. Yay çeliklerinin farklı alaşımlardan oluşabilmesine rağmen içerisinde, maksimum %65 ve minimum %50 karbon barındırması gerekmektedir [49, 60].

Yaylarda istenilen özellikler kullanım alanlarına göre farklılar göstermesine karşın temel olarak yeterli yüklenebilirlik ile birlikte iyi elastisite değerleridir. Yayın iyi yüklenebilirlik değerlerine ulaşması için elastik sınırının yüksek olması gerekmektedir. Diğer bir değişle yayın rezilyansı yani elastik bölgede şekil değiştirebilme kabiliyetinin yüksek olması gerekmektedir. Elastik sınırının yüksek olmasının yanında elastik sınırın üstüne çıkılan bir yükleme yapıldığı zaman belirli bir şekil değiştirme rezervinin de bulunması gerekmektedir. Genel olarak malzeme özellikleri olarak düşünüldüğü zaman yüksek akma değeri, yüksek rezilyansı ve tokluk değeri gerekmektedir [49].

Yay yapımında kullanılan çeliklerin yüzde bileşenleri ülkelere göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 5.5’de ISO standartlarına göre yay yapımında kullanılan çeliklerin yüzde bileşenleri gösterilmiştir.

(b) ISO 683-14 (1992-08-15) Spring steel		ISO 683-14:1973								(%)
No.	Steel Grade	Grade	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	
1	59 Si 7	5	0.55-0.63	1.60-2.00	0.60-1.00	0.030	0.030	—	—	
2	56 SiCr 7	—	0.52-0.59	1.60-2.00	0.70-1.00	0.030	0.030	0.20-0.40	—	
3	61 SiCr 7	7	0.57-0.65	1.60-2.00	0.70-1.00	0.030	0.030	0.20-0.40	—	
4	55 SiCr 63	—	0.51-0.59	1.20-1.60	0.50-0.80	0.030	0.030	0.55-0.85	—	
5	55 Cr 3	8	0.52-0.59	0.15-0.40	0.70-1.00	0.030	0.030	0.70-1.00	—	
6	60 CrMo 31	—	0.56-0.64	0.15-0.40	0.70-1.00	0.030	0.030	0.70-1.00	0.08-0.15	
7	60 CrB-3	10	0.56-0.64	0.15-0.40	0.70-1.00	0.030	0.030	0.60-0.90	—	B : 0.0008min
8	60 CrMo 33	12	0.56-0.64	0.15-0.40	0.70-1.00	0.030	0.030	0.70-1.00	0.25-0.35	—
9	51 CrV 4	13	0.47-0.55	0.10-0.40	0.60-1.00	0.030	0.030	0.80-1.10	—	V : 0.10-0.25
10	52 CrMoV 4	14	0.48-0.56	0.15-0.40	0.70-1.00	0.030	0.030	0.90-1.70	0.15-0.25	V : 0.07-0.15

Şekil 3.30. Yay üretiminde kullanılan çeliklerin yüzde bileşenleri [60]

3.6.2. Kompozit malzeme

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemeyi makro düzeyde bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzemelere verilen genel isimdir. Kompozit malzemeler ile farklı malzeme özelliklerini tek malzemede birleştirmek mümkündür. Kompozit malzemeler genel olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Kompozit temel yani esas malzeme matriks olarak adlandırılan bileşen ve takviye elemanından oluşur. Kompozit malzeme kullanımının artması ile geleneksel malzemeler ile üretilen parçalara göre bazı avantajlı durumlar oluşmuştur. Bunlar; Geleneksel malzemelere kıyasla daha az ağırlığa sahip parçaların üretilmesi, Yüksek hasar toleransı, Metallerde oluşan korozyon problemlerinin önlenmesi, Yüksek ısı dayanımı, tasarım esnekliği ve yüksek darbe direnci gibi özellikler sıralanabilir. Temel olarak 4 ana grupta toplanabilir [5, 61, 62].

- i. Fiber takviyeli kompozitler
- ii. Parçacık takviyeli kompozitler
- iii. Tabakalı kompozitler
- iv. Çok bileşenli kompozitler

Kompozit malzemelerin üretimi genel olarak 2 grupta incelenebilir. Bunlar; Açık kalıplama yöntemleri ve kapalı kalıplama yöntemleridir. Açık kalıplama yönteminde; üretim esnasında malzeme hava ile temas halindedir. Kapalı kalıplama yönteminde; Üretilen malzeme çift taraflı kalıplarda ya da vakum torbalarında yapılır [63].

Kompozit yaprak yaylar

Kompozit malzemeden üretilen yaprak yaylar ilerleyen yıllarda çelik malzemelerden üretilmiş yaprak yayların kullanımını azaltması olası bir durumdur. Kompozit yaprak yaylar elyaf sarma, pultrüzyon ve el yatırması gibi yöntemlerle üretilebilir. Bağlacı malzeme yani reçine olarak polyester, epoksi ve silikon gibi malzemeler kullanılırken takviye malzemesi olarak cam elyafı, Kevlar ve grafit kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yaprak yay üretiminde kullanılması konvansiyonel çelik yaprak yaylara göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Kompozit malzemeden üretilen yaprak yaylar çelik yaprak yaylara daha az ağırlığa sahip olması kullandıkları araçlarda büyük oranda hafifletme sağlamaktadır. Bu ağırlıkta ki azalma değeri çelikten üretilen yaprak yaylara göre yaklaşık olarak % 60 oranındadır. Kompozit yaprak yaylar genellikle tek katlı olarak üretilmesi ve çelik esaslı

olmamasından dolayı malzemede sürtünmeden kaynaklı hasar oluşumu gözlenmez. Yay katmanları birbirine sürtünmemesi aynı zamanda düzenli bakım gerekliliğini de ortadan kaldırır. Fiber takviyeli kompozitler hasar ve çatlak oluşumuna göre dayanıklıdır. Yorulma dayanımı konvansiyonel yaylara göre 5 kat fazladır. Kompozit yaprak yaylar temelde konvansiyonel yaprak yaylara daha avantajlı görünmesine rağmen üretim hızının düşüklüğü ve maliyetinin yüksekliği nedeni ile günümüzde çok fazla tercih edilmemektedir [64, 65].



Şekil 3.31. Kompozit yaprak yay görseli

4. MALZEMELERDE MEKANİK ÖZELLİKLER

4.1. Deformasyon

Deformasyon bir parçada uygulanan yük sonucu oluşan şekil değişimi olarak tanımlanabilir. Bir parçada oluşan deformasyonun belirlenmesi, parçada oluşan gerilmelerin gerilme durumlarının belirlenmesini de sağlamaktadır. Deformasyon oluşumu parçanın geometrisine, uygulanan yük büyüklüğüne veya büyüklüklerine, uygulanan yükü veya yüklerin doğrultusuna ve parçanın malzemesine bağlı olarak değişmektedir. “Eş. 4.4” bir parçada eksenel yükleme sonucu oluşan deformasyon miktarının değişiminin ölçülmesi gösterilmiştir.

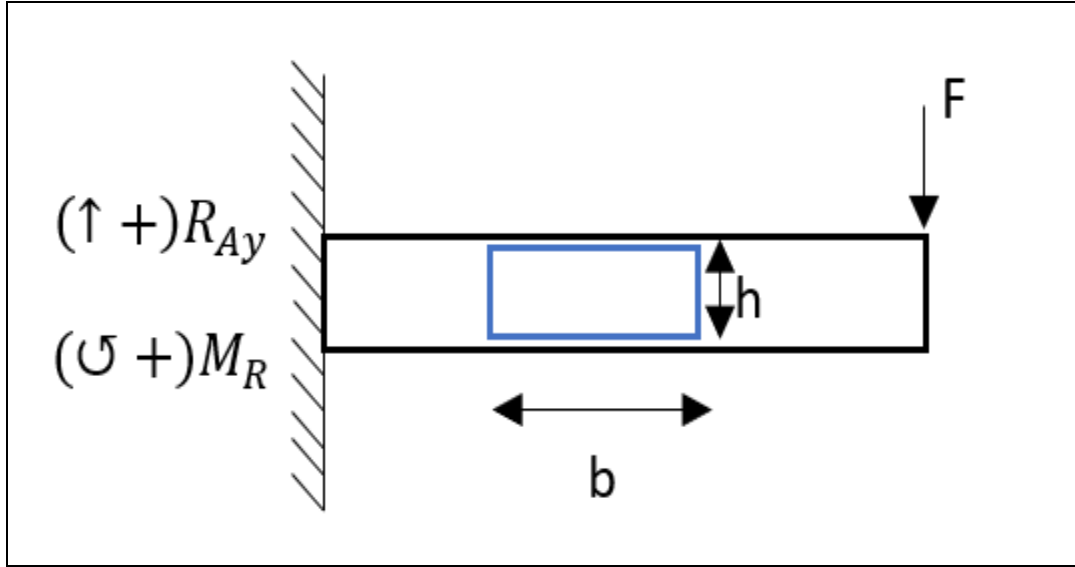
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4.1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{A \cdot E} \quad (4.2)$$

$$\delta = \epsilon \cdot L \quad (4.3)$$

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (4.4)$$

Yaprak yaylarda oluşan deformasyon miktarı kirişlerde oluşan deformasyon miktarının belirlenmesi ile aynı ilkelere dayanmaktadır. “Eş. 4.14” yaprak yaylarda oluşan deformasyon miktarının ölçülmesi gösterilmiştir.

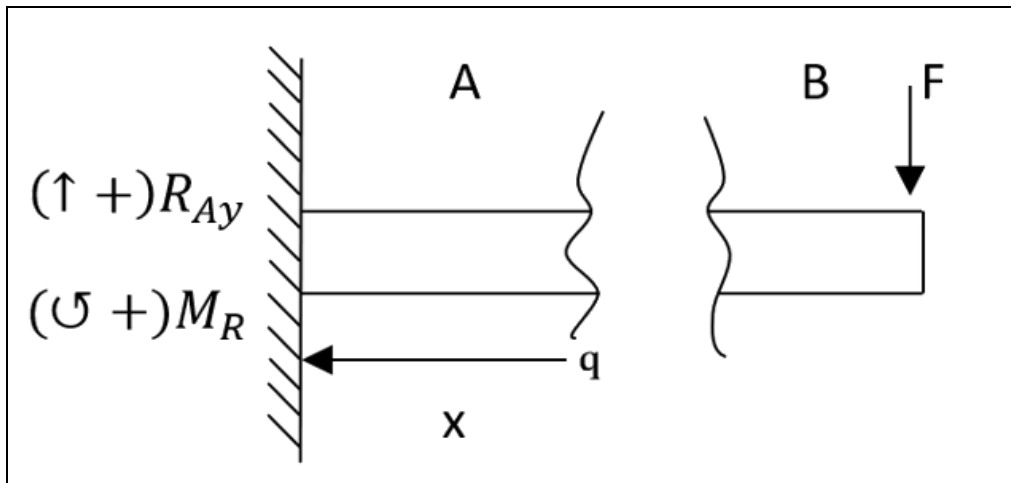


Şekil 4.1. Kirişlerin serbest cisim diyagramı

$$(\uparrow +) \sum F_y = 0 \rightarrow R_{Ay} - F = 0 \rightarrow R_{Ay} = F \quad (4.5)$$

$$(\curvearrowright +) \sum M_A = 0 \rightarrow M_R - F \cdot L = 0 \rightarrow M_R = F \cdot L \quad (4.6)$$

$$(\curvearrowright +) \sum M_q = 0 \rightarrow M_R - R_{Ay} \cdot x + M_{AB} = 0 \rightarrow M_{AB} = R_{Ay} \cdot x - M_R \quad (4.7)$$



Şekil 4.2. Kirişlerde deformasyonun hesaplanması

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.8)$$

$$y' = \frac{1}{E \cdot I} \int M \cdot dx \quad (4.9)$$

$$y' = \frac{1}{E \cdot I} \int (R_{Ay} \cdot x - M_R) dx \quad (4.10)$$

$$\text{Eğim} = y' = \frac{1}{E \cdot I} (R_{Ay} \cdot x^2 - M_R \cdot x + c_1) \quad (4.11)$$

$$y = \frac{1}{E \cdot I} \int \int M \cdot dx \cdot dx \quad (4.12)$$

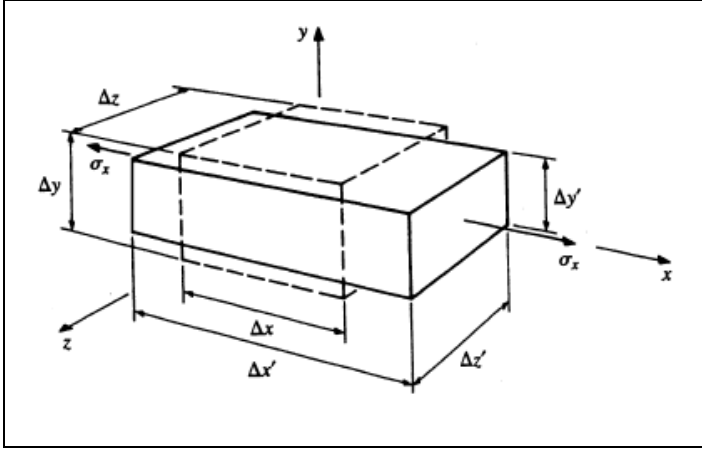
$$y = \frac{1}{E \cdot I} \int \int (R_{Ay} \cdot x - M_R) dx \cdot dx \quad (4.13)$$

$$\text{Sehim} = y = \frac{1}{E \cdot I} \left[(R_{Ay} \cdot \frac{x^3}{6} - M_R \cdot \frac{x^2}{2} + c_1 \cdot x + c_2) \right] \quad (4.14)$$

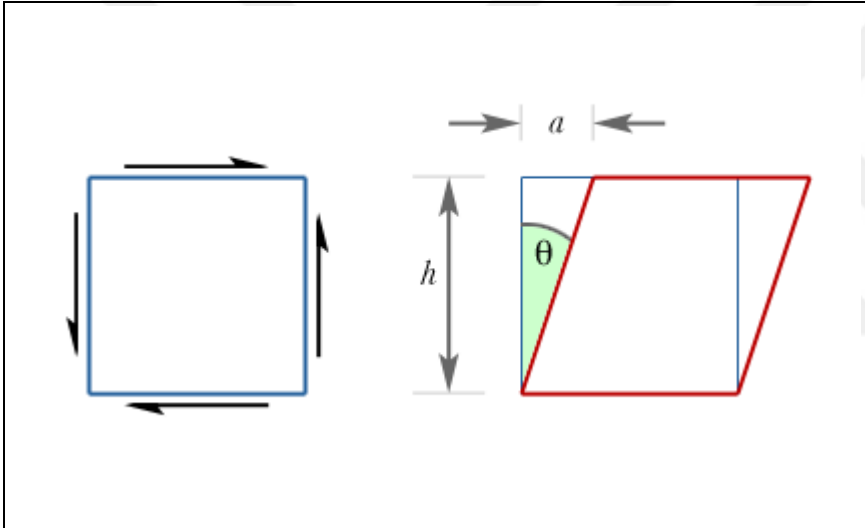
4.2 Gerinim

Gerinim bir parçanın uygulanan yük karşındaki, parçanın şekil değişiminin yük uygulanmadan önceki durumuna oranını gösteren bir belirteç olarak tanımlanabilir. Gerinim birim alandaki deformasyonu göstermektedir. Uygulanan yükleme tipine göre 2 farklı gerinim oluşabilir. Bunlar: Normal ve kesme gerinimidir. Normal gerinim ile ve kesme gerinimi ile gösterilir. Normal gerinim hesaplanması “Eş. 4.15” kayma geriniminin hesaplanması “Eş. 4.16” gösterilmiştir. Normal gerinim parçanın kesit alanına dik olarak uygulanan yükleme sonucu meydana gelir. Tek eksenenden uygulanan normal gerilme yüklemesi sonucu oluşan Normal gerinim Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Kayma gerinimi yüzeye paralel olarak uygulanan yük sonucu oluşur. Tek eksenenden uygulanan kesme yüklemesi sonucu oluşan Kayma gerinimi Şekil 4.4’de gösterilmiştir [68].

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (4.15)$$



Şekil 4.3. Normal gerinim [68]

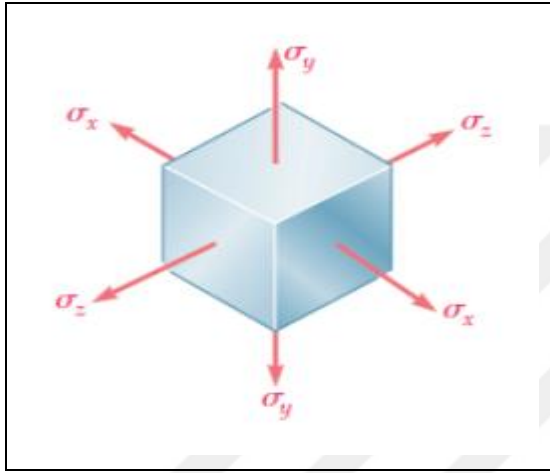


Şekil 4.4. Kayma gerinimi

$$\gamma = \tan\theta = \frac{a}{h} \quad (4.16)$$

İzotropik bir malzemede tek eksenli bir yükleme durumunda parçanın yüklem yapıldığı kesit alanı doğrultusunda parçanın boyu uygulanan basma veya çekme yüklemesine göre değişmektedir. Yükün uygulandığı yüzey haricindeki diğer yüzeylerde uygulanan yüke ters olacak şekilde minimal ölçülerde boy değişikliği oluşmaktadır. Oluşan boy değişikliği parça İzotropik bir yapıda ise yükün uygulandığı yüzey haricindeki diğer yüzeylerde boy değişimi eşit miktarlarda oluşmaktadır.

İzotropik bir malzemede normal gerilmeler altındaki çok eksenli bir yapının analizi için genelleştirilmiş Hooke kanunu kullanılmaktadır. Genelleştirilmiş Hooke kanununa göre bir parçada 3 eksenli gerilme durumunda her gerilme uygulandığı kesit alanı üzerinde bir boyut değişimi sağlarken diğer eksenlerde de oluşan bu boyut değişimin etkisi olduğunu göstermektedir. Her eksendeki yük için aynı durum geçerli olup oluşan boyut değişimlerinin hesaplanması gerekmektedir. Genelleştirilmiş Hooke kanunu “Eş. 4.17-4.19” gösterilmiştir. Çok eksenli yükleme Şekil 4.5’de gösterilmiştir [69,70].



Şekil 4.5. Çok eksenli yükleme [69]

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu \sigma_y}{E} - \frac{\nu \sigma_z}{E} \quad (4.17)$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu \sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu \sigma_z}{E} \quad (4.18)$$

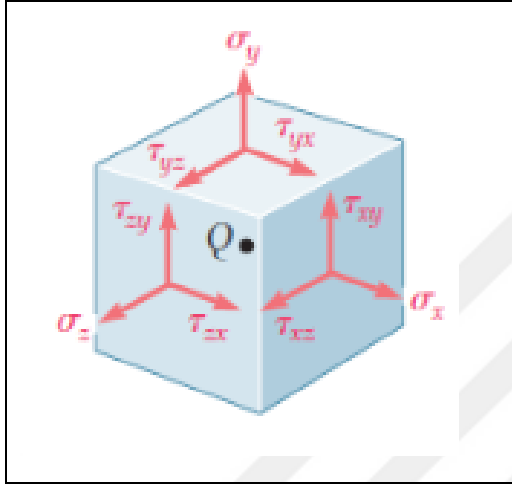
$$\epsilon_z = -\frac{\nu \sigma_x}{E} - \frac{\nu \sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (4.19)$$

Kesme gerilmeden ötürü oluşan kayma gerinimleri cismin şekil değişiminde normal gerilmeler kadar büyük bir değişim yaratmaz. Kesme gerinimleri daha çok parçanın üzerinde seçilen bir noktada eksenler arası bir kayma oluşturarak seçilen kübik elemanın geometrisini değiştirmektedir. Kayma gerinimleri seçilen kübik parçada radyal cinsinden bir eksen kayması oluşturarak kübik elemanın geometrisini bir paralelkenar formatına benzetmektedir. Kayma gerinimleri normal gerinimler gibi çok eksenli bir yapıda oluşabilir. Kayma gerinimleri “Eş. 4.20-4.22” gösterilmiştir. Birleşik kayma gerinimleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (4.20)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (4.21)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (4.22)$$

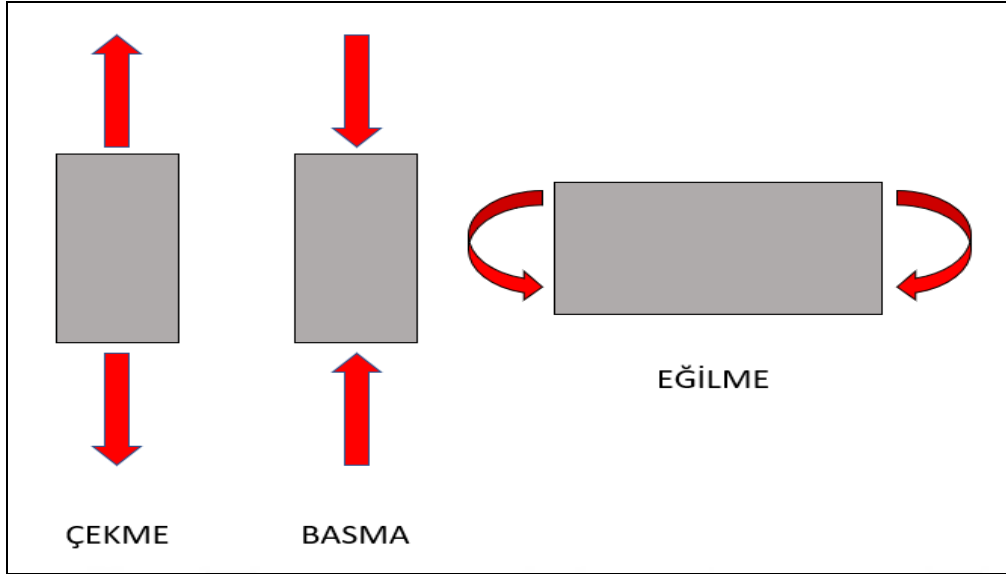


Şekil 4.6. Birleşik kayma gerinimleri [69]

4.3 Gerilme

Bir parça 4 farklı dış yükleme tipine maruz kalabilir. Bunlar; Statik yükleme, dinamik yükleme, şok etkisinde yükleme ve darbe şeklinde yüklemedir. Gerilme ise temel olarak bir parçaya uygulanan dış yük veya yüklemeler sonucunda oluşan iç kuvvetlerdir. Parça üzerine uygulanan yük değeri, kesit alanının yeri, kesit kalınlığı ile değişmektedir. Gerilme σ ile gösterilir birimi N/Pa dır. Bir parçada oluşan gerilme iki farklı temel tiptedir. Bunlar; Normal gerilme ve kayma gerilmesidir.

Normal gerilme bir parçaya 3 farklı şekilde tesit edebilir. Bunlar; Çekme, basma ve eğilme şeklindedir. Seçilen kesit yüzeyleri birbirinden uzaklaşma hareketi yapmaktadır. Normal gerilmeleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

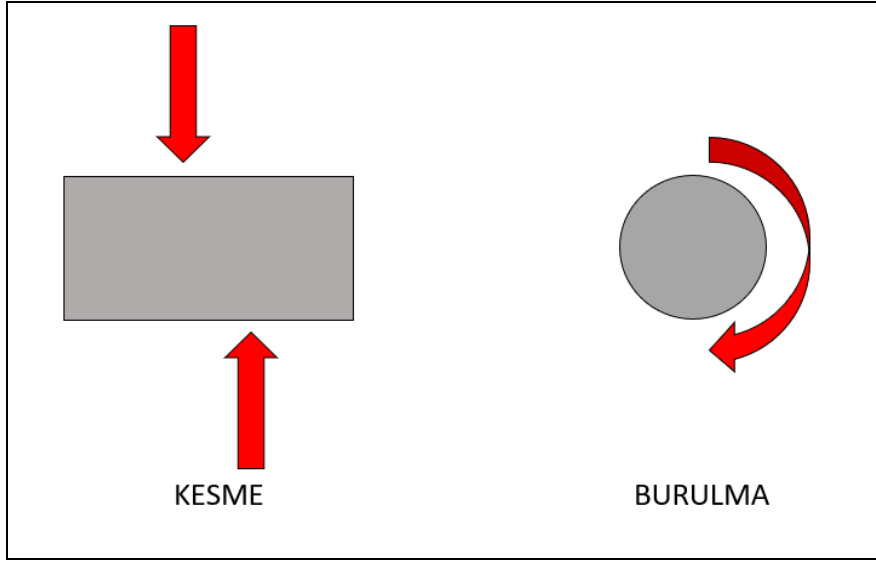


Şekil 4.7. Normal gerilme çeşitleri

Çizelge 4.1. Normal gerilme eşitlikleri

Gerilme Türü	Gösterim	Eşitlik
Çekme	$\sigma_{\text{Ç}}$	$\frac{P}{A}$
Basma	σ_B	$-\frac{P}{A}$
Eğilme	σ_E	$\frac{M \cdot c}{I}$

Kayma gerilmesi bir parçaya 2 farklı şekilde tesir edebilir. Bunlar; Kayma ve burulma şeklindedir. Kayma gerilmesi ile parça üzerinde seçilen kesit yüzeyleri birbirini üzerinde kayma hareketi yapar. Kayma gerilmeleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kayma gerilmesi çeşitleri

Çizelge 4.2. Kayma gerilme Eşitlikleri

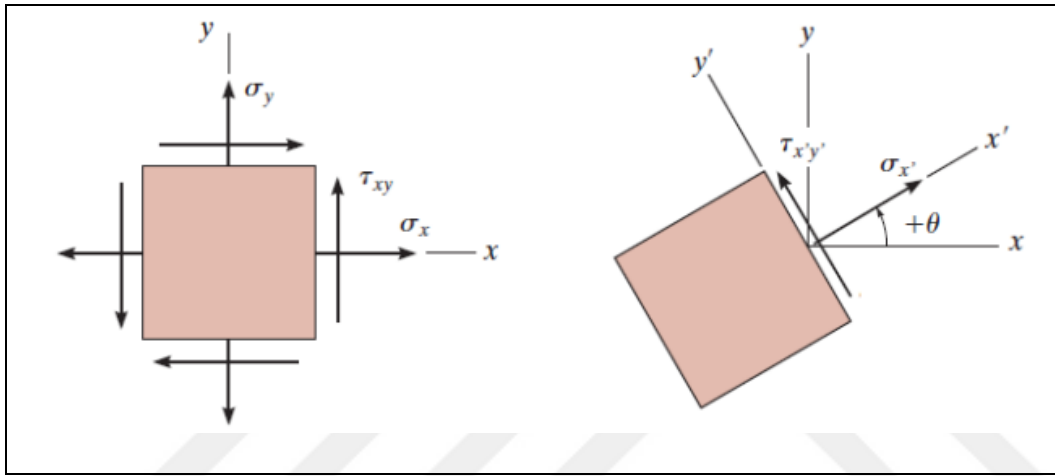
Gerilme Türü	Gösterim	Eşitlik
Kesme	τ_K	$\frac{P}{A}$
Burulma	τ_B	$\frac{T \cdot c}{J}$

Parça üzerine uygulanan yükler sonucu birleşik veya tek olacak şekilde gerilme oluşturabilir. Tek (basit) gerilmeler bir parça üzerinde tek tip yükleme sonucu oluşur. Birleşik (eşdeğer) gerilmeler ise bir parça üzerine normal ya da kayma gerilmelerinden en az iki tanesinin aynı anda uygulanması sonucu oluşur. Birleşik gerilmeler eğer aynı türde (normal + normal ya da kesme + kesme) ise oluşan gerilmeler toplanılarak parça üzerindeki etkisi bulunabilir. Uygulanan yükleme tipi eğer birbirinden farklı ise kırılma hipotezleri kullanılarak yaklaşık sonuçlar elde edilerek bulunabilir. Kırılma hipotezlerinin parça üzerinde bulunan bir noktanın analizinde kullanmak için öncelikle asal gerilmelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Asal gerilmeler belirlenmesi için bir parça üzerinde 3 eksenli gerilmeye maruz kalan bir nokta seçilir ve bu eksenlerin oluşturduğu asal gerilmeler hesaplanır. Genel olarak parçalara uygulanan kuvvetler sonucu 2 eksenli gerilme durumları oluşur. 2 eksenli gerilme durumları için düzlem gerilme dönüşümü ideal bir çözümdür. Düzlem gerilim dönüşümünde parça üzerine uygulanan 2 farklı eksen den kaynaklanan gerilme durumlarını analiz etmek için

kullanılır. Bu dönüşümde temel amaç parça üzerinde seçilen düzlemin hangi açı ile yerleştirildiğinde normal gerilmelerinin maksimum ve kayma gerilmesinin minimum değerlere ulaşılacağına bulunması ve elde edilen değerler ile parçanın dayanımının hesaplanmasıdır. Düzlem gerilim dönüştürme Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Asal gerilme dönüşümleri “Eş. 4.23” gösterilmiştir [69].

$$\sigma_{1,2} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.23)$$



Şekil 4.9. Düzlem gerilme dönüşümü [82]

4.4. Kırılma Hipotezleri

Temel olarak malzemenin alacağı hasarı değerlerini teorik yaklaşımlar ile bulmayı sağlayan hipotezlerdir. Kırılma teorilerinin seçimi, teorinin uygulanacağı parçanın atomik yapısına göre, parçanın durumuna ve zaman olarak en hızlı sonuç verme durumlarına göre en uygun olan yöntem belirlenerek kullanılmasına dayanmaktadır. Kırılma teorileri birçok farklı esasa dayanarak oluşturulmuştur. Her teorinin farklı bir durumu ele alması ve deneysel yöntemler ile elde edilen veriler ile parçanın üzerinde oluşan gerilme durumlarının kıyaslanması temeldir. Birçok farklı yöntem ve gözlem sonucu hipotezler oluşturulmuştur. Temel olarak kırılma hipotezlerindeki ayırım parçanın sünek veya gevrek olması durumuna göre teoriler 2 farklı grupta toplanabilir.

4.4.1. Sünek malzemeler için kırılma teorileri

Maksimum kayma-gerilme teorisi (Tresca)

Maksimum kayma- gerilme teorisine göre; bir parça da akma oluşabilmesi için parçada oluşan kayma gerilmesi değerinin, aynı malzemeden üretilmiş test numunesinin çekme testine tabi tutularak elde edilen maksimum kesme gerilmesi değerine eşit olduğu veya aştığı durumlarda gerçekleşeceğini esas alır. Akma şartı “Eş. 4.24” gösterilmiştir [70].

$$\tau_{max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{\sigma_{ak}}{2} \quad (4.24)$$

Çarpılma enerji teorisi (Von-Mises)

Çarpılma enerjisi teorisinde bir parçada yükleme sonucu oluşan bir bölgedeki birim elemanın hacmindeki çarpılma şekil değiştirme enerjisinin ölçülmesi ile parçadaki akma durumuna karar verilir. Parçadaki çarpılma şekil değiştirme enerjisi eğer aynı malzemeden üretilmiş bir numunenin çekme testi sonucu elde edilen akma çarpılma Şekil değiştirme enerjisinden büyük veya eşit olması durumunda akma oluşacağını önermektedir. Akma şartı “Eş. 4.25” gösterilmiştir. Von-mises ve Tresca teorileri için güvenli bölge Şekil 4.10’da gösterilmiştir [70].

$$\sigma_{ak} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (4.25)$$

Sünek malzemeler için Coulomb-Mohr teorisi (iç sürtünme teorisi)

Coulomb-Mohr teorisi temel olarak bir parça üzerinde bulunan seçilen bir noktada oluşan asal gerilme değerlerinin, aynı malzemeden üretilmiş test numunesinin çekme ve basma mukavemetlerine göre akmanın olacağını öngörmektedir. Akma kriteri “Eş. 4.26” gösterilmiştir [70].

$$\frac{\sigma_1}{S_c} - \frac{\sigma_3}{S_b} = 1 \quad (4.26)$$

4.4.2. Gevrek malzemeler için kırılma teorileri

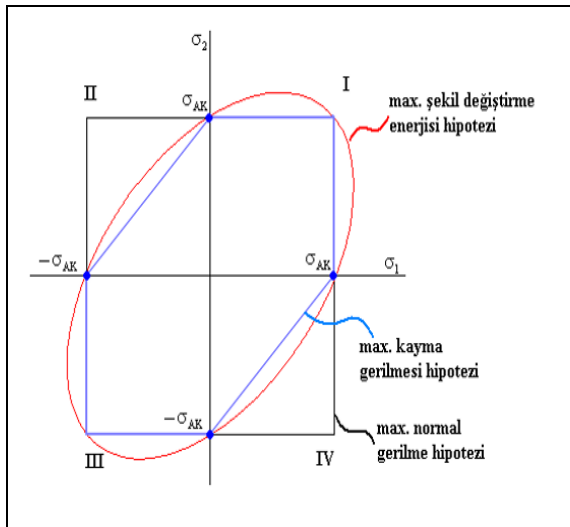
Maksimum normal gerilme teorisi

Maksimum normal gerilme teorisine göre; bir parçada hasar oluşması için parça üzerinde bulunan bir noktada ki üç asal gerilme değerinden birinin malzemenin maksimum çekme veya basma değerlerini aşması durumunda oluşacağı öngörülmektedir. Parça üzerindeki asal gerilme durumların maksimum ve minimum asal gerilme değerlerine bakılarak parçada oluşacak hasar durumu öngörülür. Bu doğrultuda parçada oluşabilecek hasar için $\sigma_1 \geq S_c$ veya $\sigma_3 \geq -S_b$ durumlarından biri oluştuğunda parçada hasar oluşacağını önermektedir [70].

Değiştirilmiş Mohr ve Kırılgan Coulomb Mohr kriteri

Değiştirilmiş Mohr ve kırılğan Coulomb teorileri temel olarak mohr teorisinin değiştirilmiş iki formudur. Kırılgan malzemeler için kullanılır. Mohr teorisi 3 teste dayanır (çekme, basma ve kaymadır). Değiştirilmiş Mohr ve Kırılgan Coulomb teorileri asal gerilme durumlarına göre kullanılarak hasar tahmini yapılır [70].

Von-mises, Tresca ve Maksimum Normal gerilme teorileri için güvenli bölge Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kırılma hipotezleri

4.5.3. Yaprak Yaylarda Gerilme

Yaprak yaylar temel olarak 2 uç tarafından mesnetler ile bağlanmış kirişler ve orta noktasından yüklemeye tabi tutulmuş birçok lamanın üst üste birleştirilmesi ile oluşan bir süspansiyon elemanıdır. Orta noktadan uygulanan kuvvetler yaprak yay üzerinde bir eğilme gerilmesi oluşturmaktadır. Oluşan eğilme gerilmesi ve yer değiştirme “Eş. 4.27-4.30” arasında gösterilmiştir. Yaprak yaylarda oluşan maksimum gerilme yayın araç şasesi ile teması sırasında gerçekleşir bu nedenle araç şasesi ve yayın şekil değiştirme miktarı hesabı kritiktir [37, 71].

$$M = F.L \quad (4.27)$$

$$Z = \frac{I}{y} = \frac{\frac{b.t^3}{12}}{\frac{t}{2}} = \frac{b.t^2}{6} \quad (4.28)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{F.L}{\frac{1}{6}b.t^2} = \frac{6.F.L}{b.t^2} \quad (4.29)$$

$$\delta = \frac{F.L^3}{3.E.I} = \frac{F.L^3}{3.E.\frac{b.t^3}{12}} = \frac{4.F.L^3}{E.b.t^3} = \frac{2.\sigma.L^2}{3.E.t} \quad (4.30)$$

Yaprak yaylar için önemli bir diğer parametre ise yay sabitidir. Yay sabiti temel olarak yaya uygulanan kuvvet neticesinde oluşan şekil değişimi ile çarpılması sonucu elde edilir. Yay sabiti “Eş. 4.31” gösterilmiştir. Yay sabiti yaprak yaylarda her lama için ayrı ayrı bulunur. Bütün yaprak yay tasarımının yay sabiti ise tek tek bulunan yay sabitlerinin bileşkesinin alınması ile hesaplanır. Yay sabitinin bileşkesi “Eş. 4.32” gösterilmiştir.

$$F = k.x \quad (4.31)$$

$$\frac{1}{K_{eş}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} \quad (4.32)$$

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi temel olarak karmaşık yapıda bulunan parçalarının analizini daha basit yapılara dönüştürerek yüksek oranda doğruluk payı ile bulunmasını sağlamaktır. Sonlu elemanlar analizi ile incelenmek istenilen parçayı küçük bölümlere ayrılması ve bu küçük bölümlerin her biri için istenilen sonuçlara ulaşılması sağlanır. Bu küçük parçalara sonlu eleman ismi verilmekte ve yöntemin adı da bu küçük parçalara verilen isimden gelmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliği için kullanılmıştır. Yöntemin kullanılma amacı uçuklar üzerinde gerilme analizinin yapılmasıdır. Yöntemi ilk kullanan firmalar: Boeing, Bell aerospace ve Rolls Royce firmasıdır. Yöntem ilk olarak 1950 yılında kullanılmasına rağmen yonteme ait ilk fikirlere 1906 yılında geliştirilen kafes analiz yöntemi ile temel fikirler oluşmaya başlamıştır. Yöntem hakkında ilk akademik araştırma 1956 yılında yapılmıştır. 1970'li yıllar da yöntemin kullanılması günümüze kadar artmış ve artmaya devam etmektedir. Artan teknoloji ile sonlu elemanlar analizini kullanan çok sayıda program geliştirilmiştir. Bu programlar ile yöntemin daha hızlı ve doğruluğu yüksek olarak kullanılması sağlanmıştır [72, 73].

Sonlu elemanlar analizi günümüzde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile başlıca olarak: Uçak parçaları ve bileşenleri, makine parçaları ve bileşenleri, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar analizi ve tıbbi alanlar için çokça kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi uygulanan bir parça küçük parçalara bölünmesi ve parçaların her birinin istenilen sonuçlar doğrultusunda analiz edilmesi ile uygulanılır. Analiz sonuçları için temel olarak bir yaklaşım uygulanılır bu yaklaşım doğrultusunda elde edilen sonuçların doğruluğu parçanın ayrılma şekline bağlıdır. Parçanın küçük parçalara bölünmesi sonucunda elde edilen küçük parçaların birleşim noktalarına düğüm noktaları denilir. Sonlu eleman parçaları birbirlerine bu düğüm noktaları üzerinden bağlantı kurulur. Düğüm noktasındaki sonuçların birleşimi bütün sistem için istenilen sonuçların elde edilmesini sağlar yani parçadan bütüne gidilerek istenilen sonuçlar elde edilir.

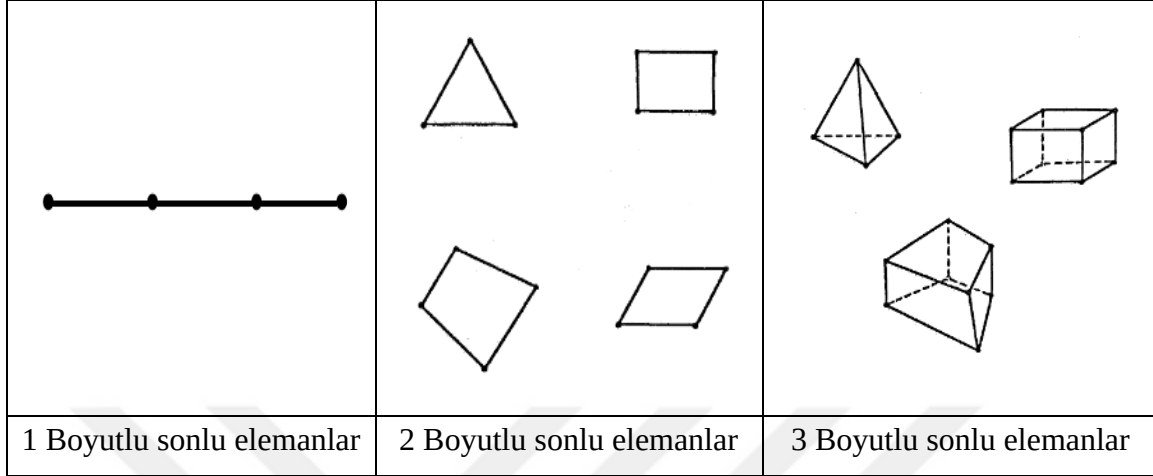
Sonlu elemanlar analiz yönteminde istenilen sonuçları elde etmek için düğüm noktaları üzerinde oluşturulan matris sistemlerinin hepsi için çözüm oluşturulmaktadır. Düğüm noktalarında bulunan matris sistemleri için temel olarak 3 değişken içermektedir. Bunlar: K (bilinen sabitler vektörü), D (bilinmeyen değerler vektörü) ve R (bilinen yük vektörü). Matris sistemi “Eş. 5.1” gösterilmiştir. Genel anlamda vektörleri tanımlamak gerekirse: K vektörü düğüm noktası için gerekli fiziksel özellikleri tanımlar. D vektörü düğüm noktası için aranan çözüm değerlerini tanımlar. R vektörü düğüm noktası için dış etkenleri tanımlamaktadır [74].

$$[K].[D]=[R] \quad (5.1)$$

Düğüm noktaları sonlu eleman parçasının uç noktalarında veya elemanın orta noktalarında bulunabilir. Sonlu elemanlar düğüm noktasının yerleşime göre 2 farklı kategoride isimlendirilebilir. Sonlu elemanlar birbirlerine kenarlarında bulunan düğüm noktalarında bağlanırsa lineer olarak adlandırılır. Sonlu elemanlarda bulunan düğüm noktaları birbirlerine hem köşe noktaları üzerinden hem de orta noktalarında bulunan düğüm noktalarında birleştirilirse parabolik eleman olarak adlandırılabilirler. Düğüm noktalarının analizi sırasında parçaların serbestlik derecesi sonuçların elde edilmesi için önemlidir. Düğüm noktalarının serbestlik derecesi seçilen sonlu eleman modeline göre değişmektedir [73].

Sonlu elemanlar modelleri temel olarak elemanın boyutlandırılmasına göre değişmektedir. Bunlar: Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlardır. Analiz edilmek istenilen parçaya göre en uygun model seçilmesi önemlidir. Bir boyutlu sonlu elemanlar sadece düğüm noktasından oluşmaktadır. İki boyutlu sonlu elemanlar farklı boyutlarda ve şekillerde oluşabilir. İki boyutlu sonlu elemanlarda derinlik olmaz sadece uzunluk ve genişlik boyutlandırmalarına göre parçada oluşturulur. İki boyutlu sonlu elemanlarda, elemanların ayrılma biçimi analizin yapılacağı parçanın geometrisine bağlıdır. Eğri parçalar için üçgen ve eşkenar olmayan dörtgen elemanlar optimal sonuçları vermektedir. Düz parçalar için en iyi sonuçlar dikdörtgen elemanlar ile elde edilir. Üç boyutlu sonlu elemanlar cismi belirlenen şekiller doğrultusunda hacmi olan parçalara bölünmesi sonucu elde edilir. Parçanın 3 boyutlu sonlu elemanlara bölünmesinde tek sonlu eleman modeli kullanmak yerine değişken geometrilere sahip modeller kullanmak genel olarak iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. En optimal sonuçlar için 4 yüze sahip üçgen prizma elemanlarının

kullanılması sonuçların doğruluğunu arttırmaktadır. Örnek sonlu eleman modelleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir [75].



Şekil 5.1. Sonlu elemanlar görseli

5.1. Sonlu Elemanlar Analizleri Sırasında Kullanılan Çelik

5.1.1. 51CrV4

Çalışmada yapılan simülasyonlar için malzeme olarak 51CrV4 çeliği seçilmiş ve bütün yaprak yay modelleri için bu çelik kullanılarak analizler yapılmıştır. 51CrV4 çeliği düşük alaşımlı ve orta karbonlu bir çeliktir. Genel olarak 51CrV4 çeliği yüksek yorulma ömrü, yüksek plastik deformasyona dayanım, yüksek darbe dayanımı gibi özelliklerinden dolayı birçok makine elemanında kullanılmaktadır. Yaprak yaylarda da sıkça kullanılan bir çelik türüdür. Krom ve Vanadyum esaslı bir çeliktir. Karbon Krom ve vanadyum haricinde birçok farklı elementte içermektedir. Bunlar; Silisyum, Manganez, Fosfor ve Kükürttür. Yüzdece içerdiği elementler Çizelge 5.1’de gösterilmiştir [66].

Çizelge 5.1. 51CrV4 kimyasal bileşenleri

	Elementler						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Minimum	0,47	0	0,7	0	0	0,9	0,1
Maksimum	0,55	0,4	1,10	0,025	0,025	1,20	0,25

Çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için ısıtıl işlem veya karbon haricinde farklı elementlerin kullanılması ile alaşımlama yolları izlenebilir. 51CrV4 çeliğinin yaprak yaylarda kullanılması için bu iki yolda izlenebilmektedir. Alaşımlama için kullanılan elementlerin çeliğe kattığı özellikleri miktarlarına göre ve aynı zamanda hangi elementler ile birlikte kullanıldığına göre değişmektedir. 51CrV4 çeliğinde kullanılan elementlerin genel olarak kattığı özellikler:

Karbon

Karbon çeliklerin en temel alaşım elementidir. Çelikte bulunan karbon miktarının artırılması çeliğe sertlik ve dayanım kazandırmaktadır. Aynı zamanda çelikte bulunan karbon miktarı arttıkça çeliğin akma dayanımı ve çekme dayanımını da artmaktadır [67].

Krom

Kromun çeliklerde bir alaşım elementi olarak kullanılması ile çeliğin oksidasyona, korozyona karşı dayanımı, aşınma mukavemetini arttırmaktadır. Krom miktarının artması ile oluşan negatif etkileri azaltmak ve çeliğin yapısına nikel ve vanadyum katılmaktadır. Krom ve vanadyumun ortak kullanılması ile aynı zamanda çeliğin menevişleme işlemi sırasında oluşan kırılabilirliği da gidermektedir [49, 67].

Vanadyum

Vanadyum krom ile birlikte kullanıldığında çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını, akma sınırını ve çeliğin sünekliğini arttıran bir elementtir. Vanadyum aynı zamanda çeliğin tanecik yapısını da küçülterek çentik dayanımını da arttırmaktadır [49, 67].

Silisyum

Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılırlar. Yay çelikleri %2 ye kadar silisyum içerirler. Silisyum miktarı arttıkça çeliğin tanecik yapısı büyümektedir. Tane yapısının büyümesi ile çeliğin dayanımını artırır ama sünekliğini düşürür. Krom ile birlikte kullanılması ile çeliğin sertliğini arttırmaktadır [49].

Manganez

Çeliklerde mangan kullanılması, çeliğin akma dayanımını artırmaktadır. Mangan kullanımı ile akma dayanımının, korozyon direnci ve sertleşebilirliği artırmaktadır [67].

Nikel

Çeliğin dayanımını artırır. Dayanım artışı silisyum ve mangan kadar fazla değildir. Dayanım artışının yanında çeliğin sünekliğinde önemli bir azalış gerçekleşmez. Çeliğin aynı zamanda sertleşebilirliğini artırır [67].

51CrV4 çeliğine ait mekanik özellikler Çizelge 5.2’de verilmiştir. Verilen mekanik özellik değerleri çeliğe uygulanan işlemlere göre farklılıklar göstermektedir.

Çizelge 5.2. 51 CrV4 çeliğinin mekanik özellikleri

51 CrV4	
Poisson Oranı	0,3
Young Modülü	210(Gpa)
Kesme Modülü	80(Gpa)
Yoğunluk	7800(kg/m ³)
Çekme mukavemeti	1050(Mpa)
Akma Mukavemeti	850(Mpa)

5.2. Sonlu Elemanlar Analizi Tasarımların Oluşturulması

Statik yükleme koşulları altında sonlu elemanlar analizi Ansys 17.2 programında gerçekleştirilmiş olup toplamda 3 ana konvansiyonel yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 3 ana modelin her biri 16 alt model içermektedir. Her alt model de yaprak yayı oluşturan geometrik boyutlandırmalar parametrik hale getirilmiş ve her alt model 45 adet farklı geometrik boyutlandırmalara sahip yaprak yay modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi için toplamda 2160 adet yaprak yay modeli hazırlanmıştır.

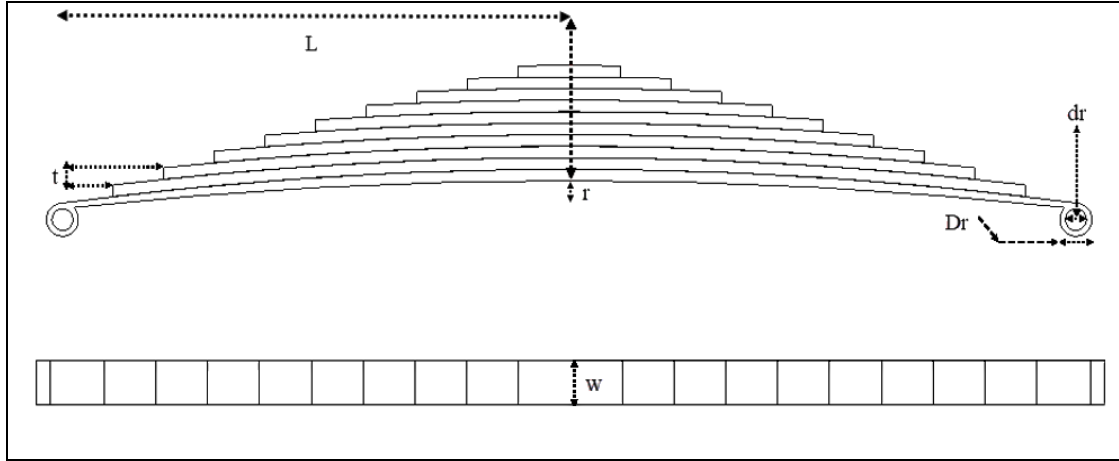
Bütün yaprak yay tasarımları Ansys 17.2 versiyonunda bulunan Design Modeler ortamında oluşturulmuştur. Oluşturulan 2160 model birbirinden farklı tasarım parametrelerine göre ayrılmaktadır. Bu tasarım parametreleri ise: Tasarım farklılıkları, kavis uzunluğu, Kat sayısı, Lama genişliği, Lama kalınlığı, Uygulanan yük değeri ve lama uzunluğudur. Bu parametre değerleri Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. A, B ve Model C’nin geometrik boyutlandırma parametreleri

Model tipleri	Alt model tipleri	Lama kat sayısı	Lama uzunluğu (mm)	Lama kalınlığı (mm)	Lama genişliği (mm)	Lama kavis yarı çapları (mm)	Uygulanan kuvvet (N)
Model A	1-Düz	1-2	72,5-145	6 10 15	60 80 120	76-82-85-88-90-94-100-106-110-112-115-118-120-124-130-140-150-145-160-175-190-205	100 2500 7500 10000 25000
	2-Ters	4-6	217,5-290				
	3-Çift	8-10	362,5-435				
	4-Hibrit	12-20	507,5-580				
			652,5-725				
Model B	1-Düz	1-2	72,5-145	6 10 15	60 80 120	97-101-103-106-109-111-115-121-127-131-133-139-141-145-151-161-166-171-181-191-196-211-226-241	100 2500 7500 10000 25000
	2-Ters	4-6	217,5-290				
	3-Çift	8-10	362,5-435				
	4-Hibrit	12-20	507,5-580				
			652,5-725				
Model C	1-Düz	1-2	435-507,5 580-652,5 725	6 10 15	60 80 120	91-97-101-103-106-109-111-121-127-133-136-139-141-151-161-166-171-181-196-211	100 2500 7500 10000 25000
	2-Ters	3-5					
	3-Çift	6-9					
	4-Hibrit	10-18					

5.2.1. A modelinin hazırlanması

A modeli 4 farklı tasarıma göre oluşturulmuştur. Bunlar; Düz, ters, çift (düz ve ters) ve hibrit (yaprak yay ve helisel yay birleştirilmesi) yaydır. Tasarımlar dizayn parametrelerine göre harflendirilmiş ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Parametrelerin açıklaması Çizelge 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Model A tasarım değişkenlerinin yaprak yay üzerinde gösterimi

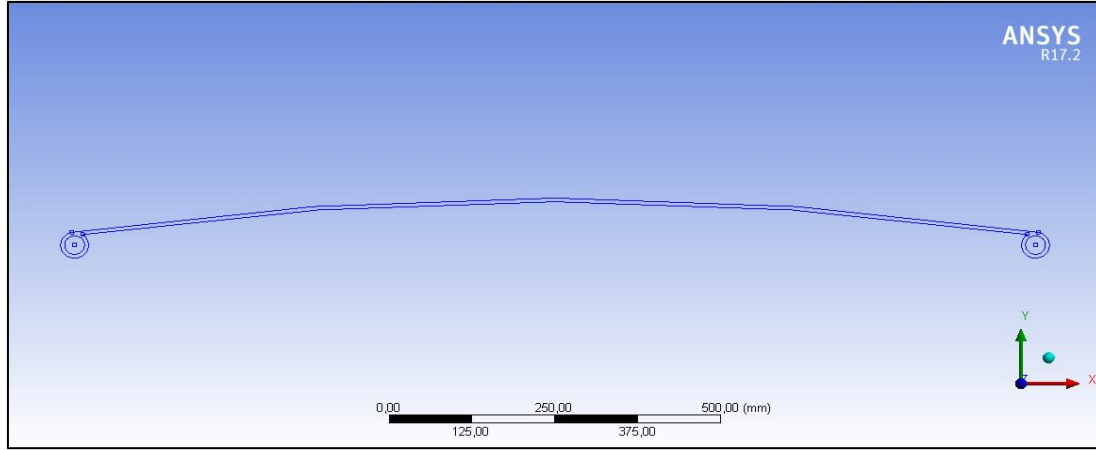
Çizelge 5.4. Parametre açıklamaları

Gösterim	Parametre	Açıklama	Birim
L	Ana lamanın uzunluğu	Göz merkezi ve yaprak yayın orta noktası arasındaki uzaklık	Milimetre
r	Kavis uzunluğu	Göz merkezi ve ana lamanın alt yüzeyi arasındaki uzunluk	Milimetre
Dr	Göz unsuru dış çapı	Göz unsuru dış çap değeri	Milimetre
dr	Göz unsuru iç çapı	Göz unsuru iç çap değeri	Milimetre
t	Kalınlık	Lama dış yüzeyi ve iç yüzeyi arasındaki uzunluk	Milimetre
w	Genişlik	Lama genişliği	Milimetre

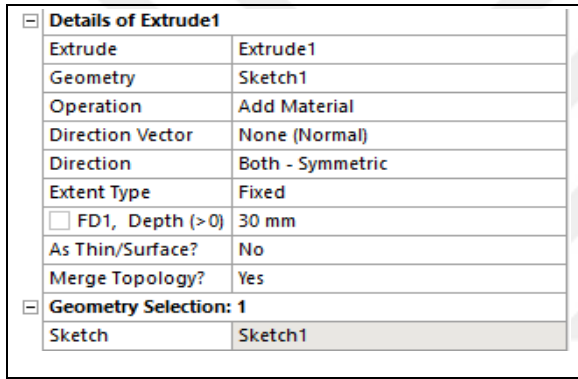
Düz (alt) model

Düz alt modeli oluşturmak için oluşturmak için öncelikle yaprak yayın şase ile bağlantısını sağlayan göz adı verilen parçalar çizilmiştir. Göz bileşeni oluşturmak için öncelikle XY düzlemi üzerinde bulunan düzlem seçilmiştir. Düzlemin seçilmesinin ardından göz iç çapı için bir daire çizilmiştir. Göz iç çapının değeri her model için aynı boyutta olup bu değer üretici kataloğundan alınmıştır. Göz bileşenini oluşturmak için 2. Adım olarak göz iç çapı ile aynı merkeze sahip bir daire daha oluşturulmuştur. Bu dairenin çapı lama kalınlığına göre değişmekte ve aldığı değerler Çizelge 5.3'de gösterilmiştir. Göz bileşenlerinin oluşturulmasının ardından bu bileşenler belirlenen ana lamanın uzunluğu kadar X ekseninde ötelenmiştir. Ötelenmenin ardından göz bileşeni Y eksenine göre aynalanmış ve iki tane göz bileşeni oluşturulmuştur.

Göz bileşenin oluşturulmasından sonra gözleri birbirine bağlayan yaprak yay lama tasarımı gerçekleştirmek için; öncelikle lamanın kavis uzunluğu belirlenmiştir Kavis uzunluğu lamanın dış bükey kısmı ile göz bileşenin merkezi arasında ki uzaklıktır. Bu değer de üretici kataloğundan alınmıştır. Kavis uzunluğu ve göz çapının belirlenmesinin ardından bu iki unsuru birleştiren bir daire çizilmiştir. Çizilen daire ile göz bileşenin dış çapı ve kavis uzunluğu için belirlenen nokta teğet hale getirilmiştir. Yapılan işlem ile lamanın dış yüzeyi oluşturulmuştur. Lamanın iç yüzeyi için bir daire oluşturulmuştur ve bu daire göz iç kısmı ile teğet hale getirilmiştir. Oluşturulan yeni dairenin çapı lamanın dış yüzeyi için yapılan daire ile eş güdümlü olup lama kalınlığına göre çap değeri de değişmektedir. Oluşturulan ana lamanın çizimi Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Ana lama tasarımı yapıldıktan sonra katı hale getirilmiştir. Katı hale getirme işlemi Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Ana lama tasarımı

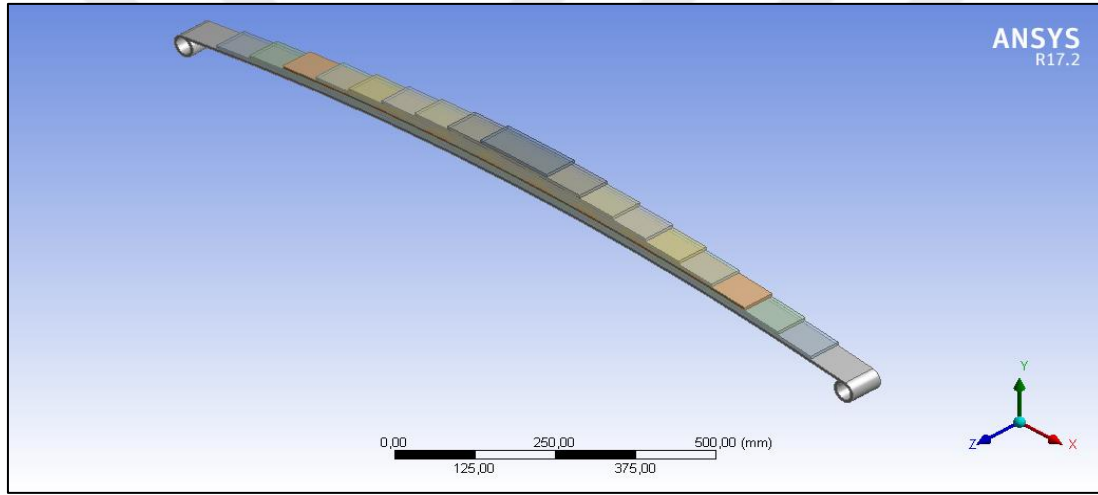


Şekil 5.4. katılama işlemi

Ana lamanın oluşturulmasının ardından bir üstte bulunan lama oluşturulmuştur. Bu lama için öncelikle XY düzlemine yeni bir düzlem atılmış ardından lamanın alt yüzeyini oluşturan daire çizilmiştir. Bu dairenin çapı bir altta bulunan lamanın dış yüzeyi ile aynı uzunluktadır. Lamanın dış yüzeyini oluşturan dairenin çapı da lama kalınlık değerine göre değişmekte ve lama kalınlık değeri kadar çap uzunluğuna eklenerek bulunmaktadır. Çizilen dairelerin ardından (Charde ve Bhope, 2012) yazılan makalede bulunan eşitliğe göre lama uzunlukları belirlenmiş ve bu değerlere göre oluşturulmuştur. Lama uzunluk değerleri Çizelge 5.5’de gösterilmiştir. İkinci kat lamanın katı hale getirme işlemi Operation bölümünde yer alan Add Material komutu yerine Add Frozen komutu ile gerçekleştirilmiştir. Diğer Yay lamaları aynı tasarım şekli izlenerek oluşturulmuştur. Düz model için örnek resim Şekil 5.5’de gösterilmiştir [7].

Çizelge 5.5. Düz alt model lama uzunlukları

Kat numarası	Lama uzunluğu (mm)
1	725
2	652,5
3	580
4	507,5
5	435
6	362,5
7	290
8	217,5
9	145
10	72,5



Şekil 5.5. Düz model örnek görseli

Ters (alt) model

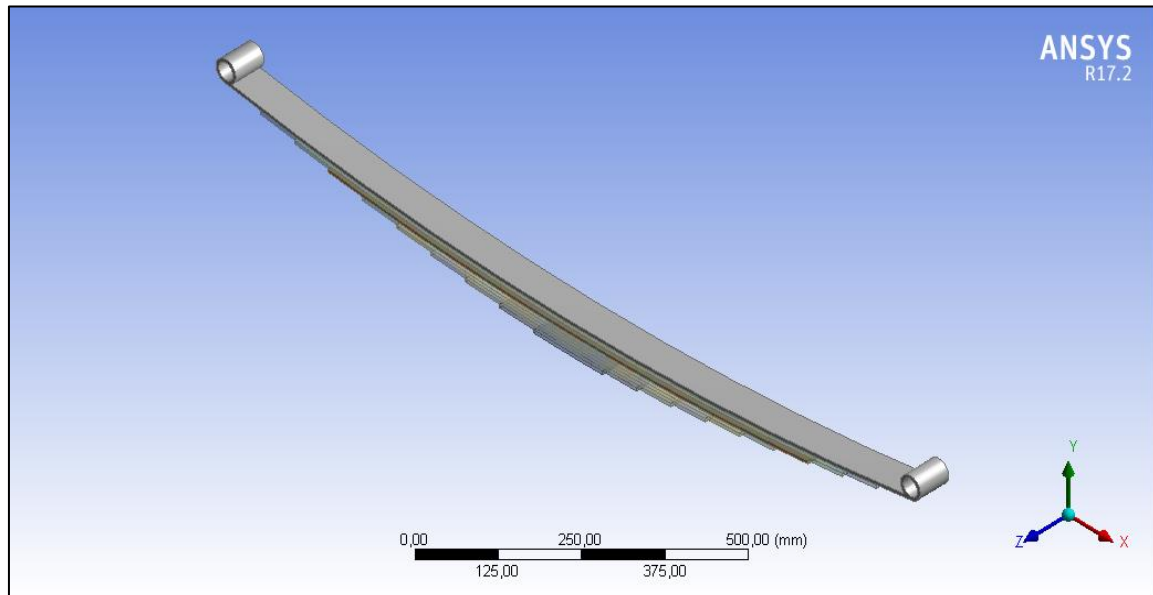
Ters alt modeli 10 kat lamadan oluşan düz model oluşturulduktan sonra elde edilen bütün yay lamalarının YZ düzlemi etrafında 180 derecelik açı ile döndürülmesi sonucunda oluşturmuştur. Analizler için gerekli kat sayısına sahip diğer modeller (1,4,6), 10 katlı lamadan oluşan model üzerinden lamaların sırayla silinmesi ile elde edilmiştir. Döndürülme işlemi Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Ters alt modelinin lama uzunlukları Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Ters modelin örnek gösterimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Details of Rotate1	
Rotate	Rotate1
Preserve Bodies?	No
Bodies	10
Axis Definition	Selection
Axis Selection	Plane Normal
☐ FD9, Angle	180 °

Şekil 5.6. Döndürme düzlemi.

Çizelge 5.6. Ters alt model lama uzunlukları

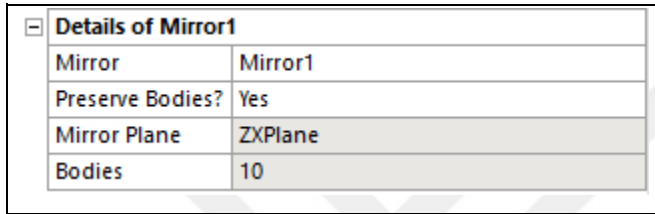
Kat numarası	Lama uzunluğu (mm)
1	72,5
2	145
3	217,5
4	290
5	362,5
6	435
7	507,5
8	580
9	652,5
10	725



Şekil 5.7. Ters model örnek gösterim

Çift (düz ve ters) alt model

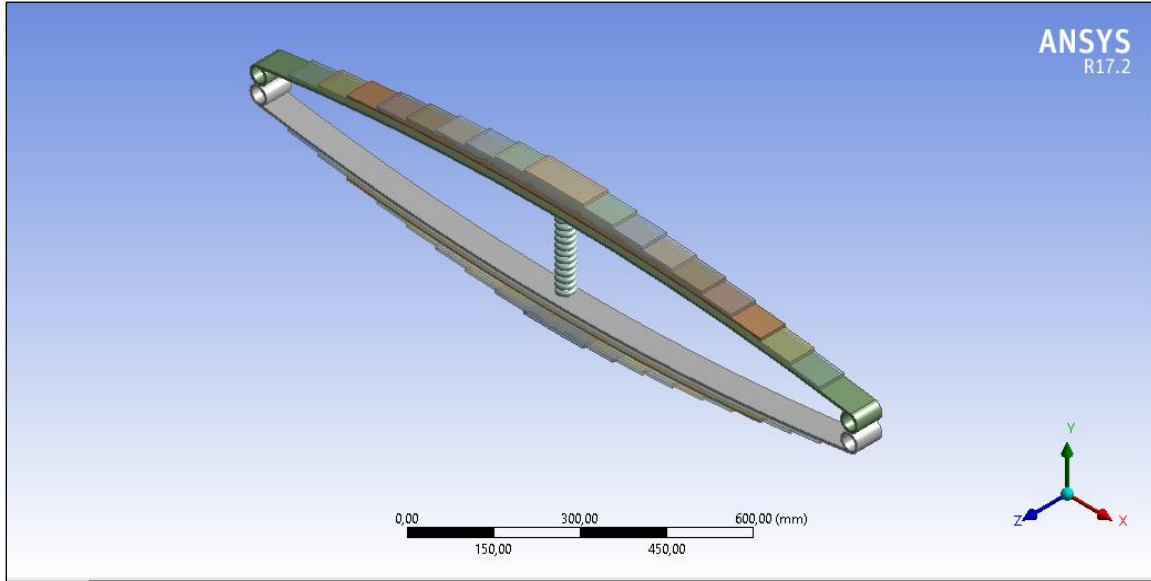
Çift (düz ve ters) alt modeli düz model oluşturulduktan sonra elde edilen bütün yay lamalarının ZX eksenini etrafında aynalanması ile elde edilmiştir. Aynalama işlemi Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Çift (düz ve ters) alt modelin lama uzunlukları Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. Çift (düz ve ters) model için gerekli kat sayıları (2,8,12,20) katlı model oluşturulduktan sonra lamaların silinmesi ile elde edilmiştir. Çift modelin örnek gösterimi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Aynalama işlemini için tanımlanan unsurlar

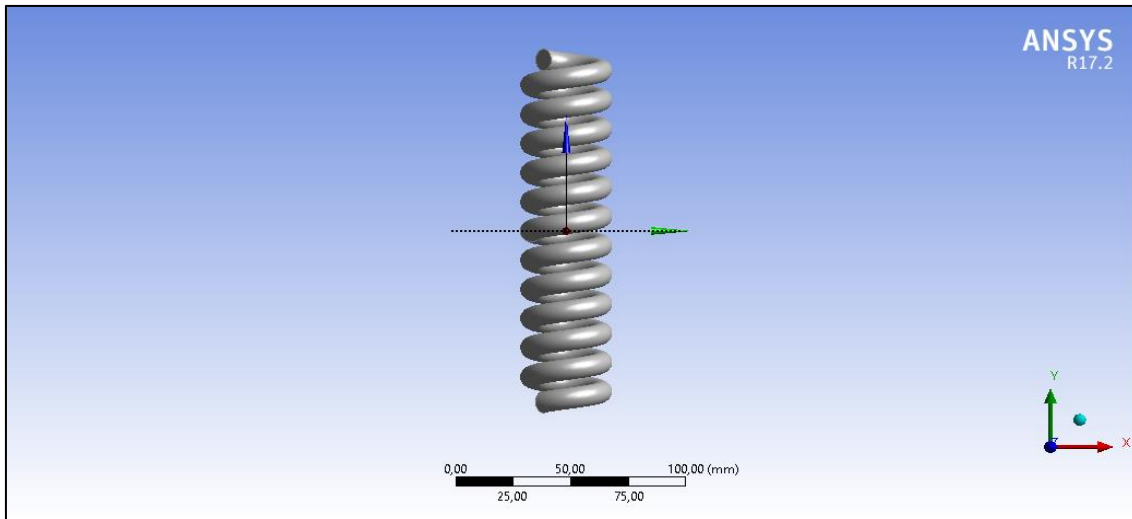
Çizelge 5.7. Çift alt model lama uzunlukları

Kat numarası	Lama uzunluğu (mm)	Lama uzunluğu (mm)
1	72,5	725
2	145	652,5
3	217,5	580
4	290	507,5
5	362,5	435
6	435	362,5
7	507,5	290
8	580	217,5
9	652,5	145
10	725	72,5



Şekil 5.10. Hibrit model

Yaprak yay tasarımı çift alt model bire bir olarak aynı olup bu modelin XY düzlemindeki orta noktasında helisel yay çizilerek model oluşturulmuştur. Helisel yay tasarımı için öncelikle 1 adet helisel yay çizilmiştir ve çizilen helisel yay döndürülerek katı hale getirilmiştir. Çizilen helisel yay Şekil 5.11’de ve Helisel yayın döndürerek katılaştırma işlemi ise Şekil 5.12’de gösterilmiştir.

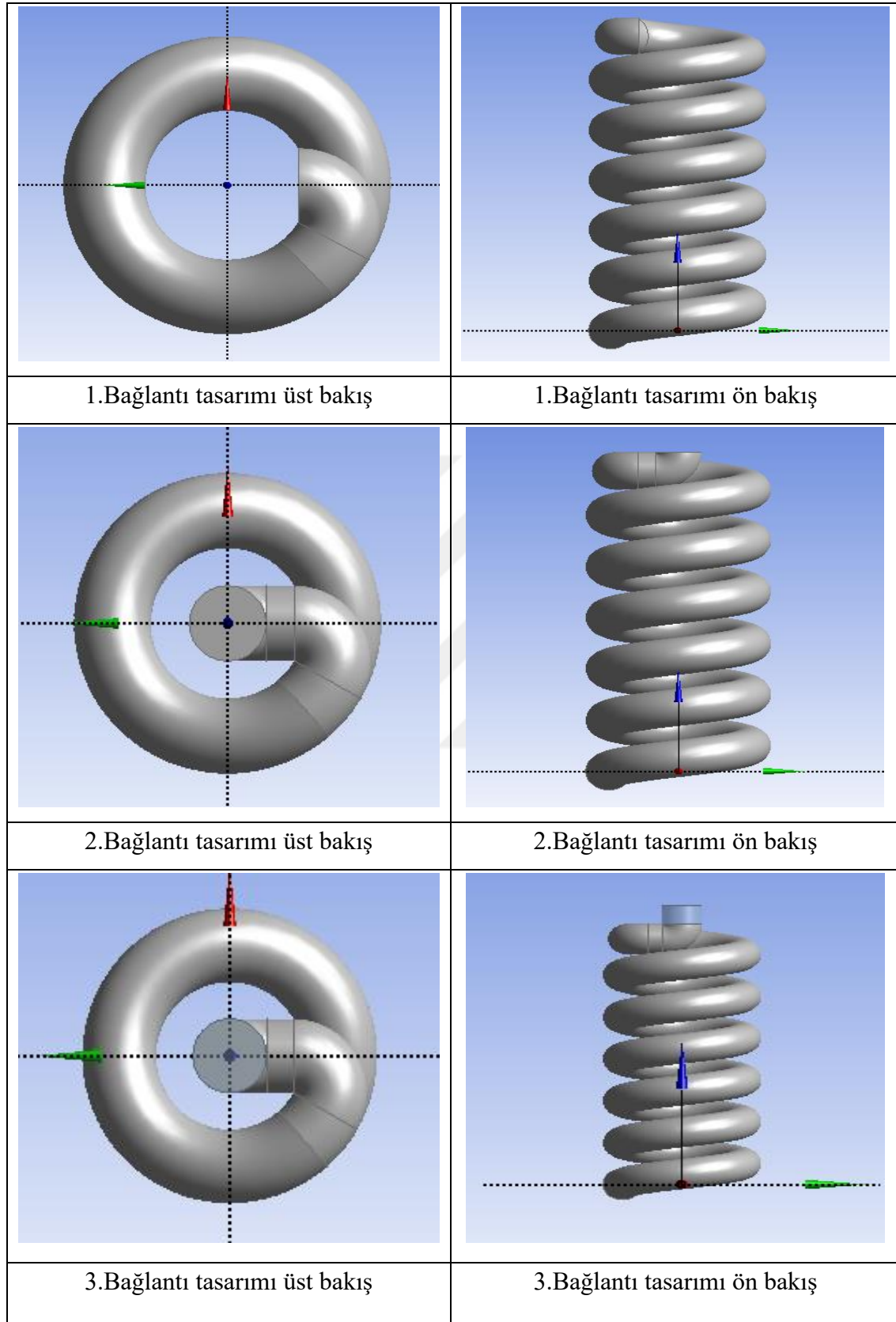


Şekil 5.11. Helisel yay görseli

Details of Sweep22	
Sweep	Sweep22
Profile	Sketch37
Path	Sketch36
Operation	Add Material
Alignment	Path Tangent
☐ FD4, Scale (>0)	1
Twist Specification	Turns
☐ FD5, Turns	5,865
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	No

Şekil 5.12. Helisel yay katılaştırma işlemi

Helisel yayın çizimin ardından helisel yayın yaprak yay bağlantısını sağlamak için 3 adet farklı geometriye sahip tasarım yapılmıştır. Yapılan 3 adet farklı bağlantı tasarımı helisel yayın üst kısmında oluşturulmuş ve helisel yayın alt kısmına aynı şekilde kopyalanmıştır. Bu kopyalamanın temel nedeni çift kademeli yaprak yayın her iki tarafı ile bağlantı sağlanmasıdır. Yapılan bağlantı tasarımları birinci, ikinci ve üçüncü olarak isimlendirilmiş ve aynı sıralama ile Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



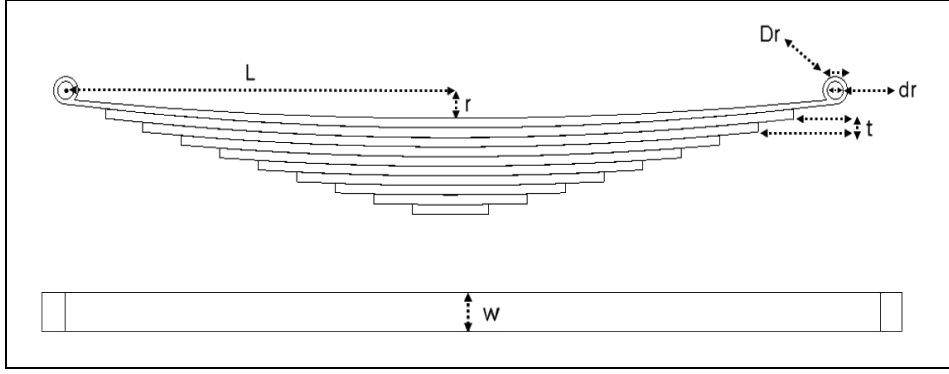
Şekil 5.13. Bağlantı elemanları görseli

Her üç bağlantı tasarımında ortak noktası tasarımlar için tanımlanan profillerin çapının helisel yay ile aynı çap değerine sahip olması ve bu doğrultu da gerekli katılaştırma işleminin yapılmasıdır. İlk bağlantı tasarımının amacı helisel yayın uç kısmının yaprak yayın tam merkezine gelmesidir. Bu amaç doğrultusunda birinci bağlantı elemanının katı modeli süpürerek katı oluşturma yöntemi ile oluşturulmuştur. Süpürme işlemi için helisel yay ile aynı kalınlıkta bir profil oluşturulmuş ve ZX ekseninde helisel yayın boyu kadar ötelenmiş şekilde süpürme işlemi için gerekli yol oluşturulmuştur. İkinci bağlantı elemanın temel görevi ise ilk bağlantı tasarımı ile son bağlantı tasarımını birleştirmektir. İkinci tasarımın oluşturulması için XY düzleminde bir düzlem oluşturulmuş ve bu düzleme tasarımın yol çizimi yapılmıştır. Tasarımın profili için ilk bağlantı tasarımının uç kısmına bir düzlem tanımlanmış ve gerekli profil şekli oluşturulmuştur. Üçüncü bağlantı elemanın görevi ise yaprak yay ile helisel yayın bağlantısını sağlamaktır. Son Bağlantı tasarımının diğer bağlantı tasarımlarından farklı olarak tasarım parametrik olarak modellenmiştir. Tasarımın parametrik olarak oluşturulması ile yaprak yayın tasarımı değişmesine rağmen helisel yay ile yaprak yayın birbirlerine tam olarak temas edilmesi sağlanmıştır. Tasarımın iki bölümü parametrikdir. Bunlar; Tasarımın uç noktası ve boy uzunluğudur. Tasarımın uç noktası ve boyu lama kalınlığına göre değişmektedir. Üçüncü bağlantı tasarımı aynı zamanda diğer modellerden farklı olarak Add Material Komutu yerine Add Frozen komutu ile oluşturulmuştur.

Hibrit alt modelin lama uzunlukları, çift (düz ve ters) alt modelin lama uzunlukları ile aynı olup yeni bir Çizelge hazırlanmamıştır. Hibrit modele ait lama uzunlukları (Bkz. Çizelge 5.7'de) bulunmaktadır.

5.2.2. B modelinin hazırlanması

B modeli 4 ana alt model içermektedir. Bunlar; Düz, ters, çift (düz ve ters) ve hibrit (yaprak yay ve helisel yay birleştirilmesi) yaydır. Düz alt modeline ait örnek teknik resim Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Teknik resimde bulunan parametrelerinin açıklaması (Bkz. Çizelge 5.4'de) gösterilmiştir.

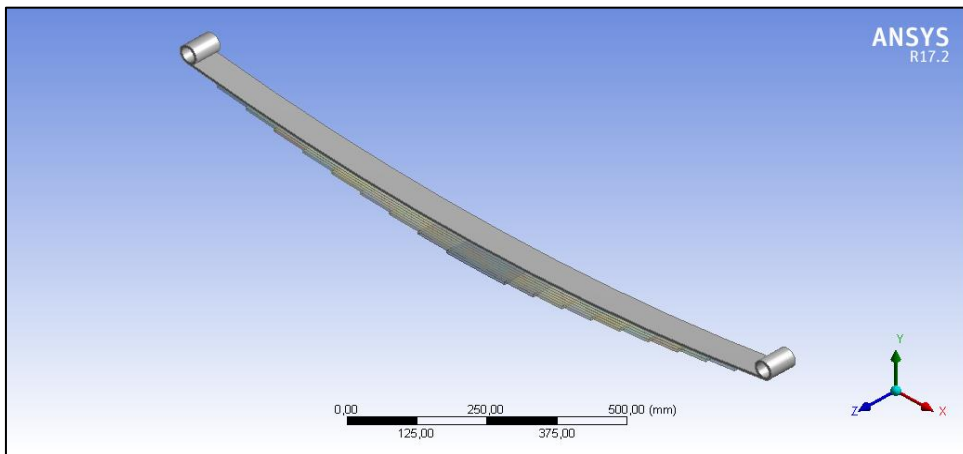


Şekil 5.14. Model B teknik resim

Düz alt model

Düz alt modeli dört farklı kat sayısına göre tasarlanmıştır. Bunlar; 1,4,6 ve 10 katlı yaprak yay modelleridir. Yaprak yay tasarımının temeli A Modeli (ters alt modeli) ile birebir benzer olarak oluşturulmuştur. B. Modeli düz alt modelin, A. Model, ters alt modeli ile tek farkı döndürme komutu uygulanmamasıdır. Oluşturulan bu model boyutlandırma ve tasarım açısından model A düz alt modeli ile aynı olup, şekil açısından A Model ters alt modeli ile aynıdır. Oluşturulan modelin birebir benzer olması nedeni ile yeni Çizelge ve şekiller oluşturulmamıştır. Model A'ya ait şekillere gerekli atıfta bulunarak sunulmuştur. Atıfta bulunan Çizelge ve şekiller ise; lama uzunluğu Çizelgesi (Bkz. Çizelge 5.5), Katılaştırma işlemi şekli (Bkz. Şekil 5.4) ve ana lama tasarımının şekillidir (Bkz. Şekil 5.3).

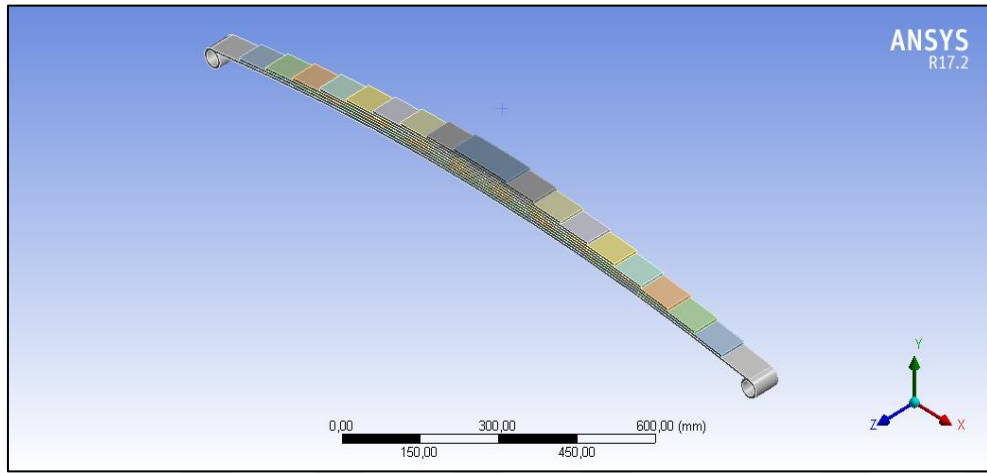
Düz Alt modele ait 10 kat lamadan oluşan örnek yaprak yay tasarımı Şekil 5.15'de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Düz alt model örnek görsel

Ters alt modeli

Ters alt modeli, düz alt modelinin YZ eksenini etrafında 180 derecelik açı ile döndürülmesi sonucu oluşturulmuştur. Toplamda 4 kat sayısına sahip model oluşturulmuştur. Bunlar; 1,4,6 ve 10 katlı modellerdir. Ters alt modelin lama uzunlukları model 1 düz alt modeli ile aynı olup. Tekrardan Çizelge oluşturulmamış ve (Bkz. Çizelge 5.6) gösterilmiştir. Ters alt modeline ait 10 kattan oluşan yaprak yay Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Ters model örnek görsel

Çift (düz ve ters) alt modeli

Çift (düz ve ters alt modeli) 4 farklı kat sayısına sahip yaprak yay tasarımına sahiptir. Bunlar; 1,4,6 ve 10 katlı tasarıma sahip modellerdir. Çift model düz modelin oluşturulduktan sonra modelin, aynalanması ile oluşturulmuştur. Aynalama işlemi için düz yaprak yayın en dış katmanına teğet olan ZX düzlemine paralel bir düzlem oluşturulmuştur. Aynalama işlemine ait düzlemin görseli Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

Details of Mirror1	
Mirror	Mirror1
Preserve Bodies?	Yes
Mirror Plane	Plane13
Bodies	10

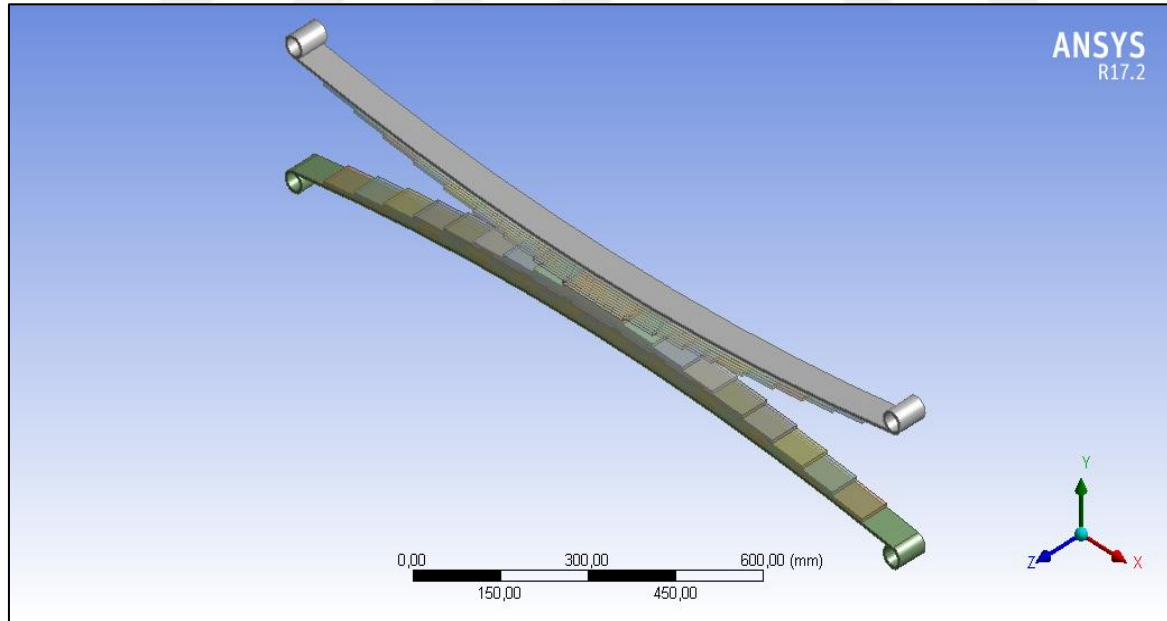
Şekil 5.17. Aynalama düzlemi görseli

Aynalama işlemi ile birlikte düz ve ters model birbirlerine en dış yüzeylerinden temas etmesi sağlanmıştır. Çift modele ait lama uzunlukları Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Model B çift alt model lama uzunlukları çizelgesi

Kat numarası	Lama uzunluğu (mm)	Lama uzunluğu (mm)
1	725	72,5
2	652,5	145
3	580	217,5
4	507,5	290
5	435	362,5
6	362,5	435
7	290	507,5
8	217,5	580
9	145	652,5
10	72,5	725

B modelininin Çift alt modeline ait 10 katlı yaprak yay örnek tasarım Şekil 5.18’de gösterilmiştir.

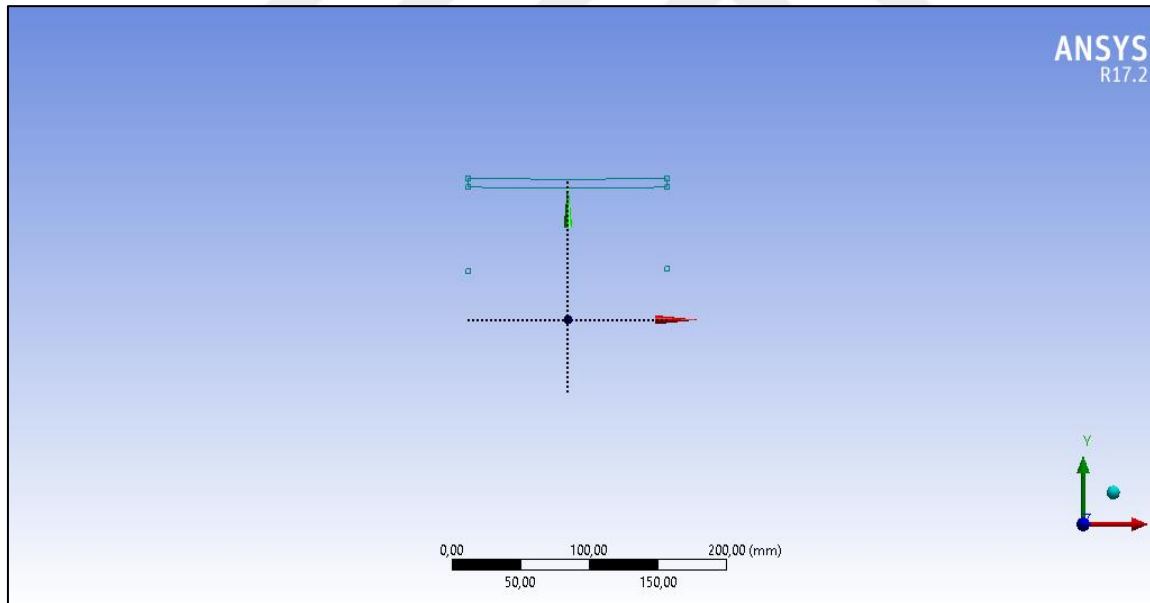


Şekil 5.18. Çift alt modeli örnek görsel

Hibrit alt model

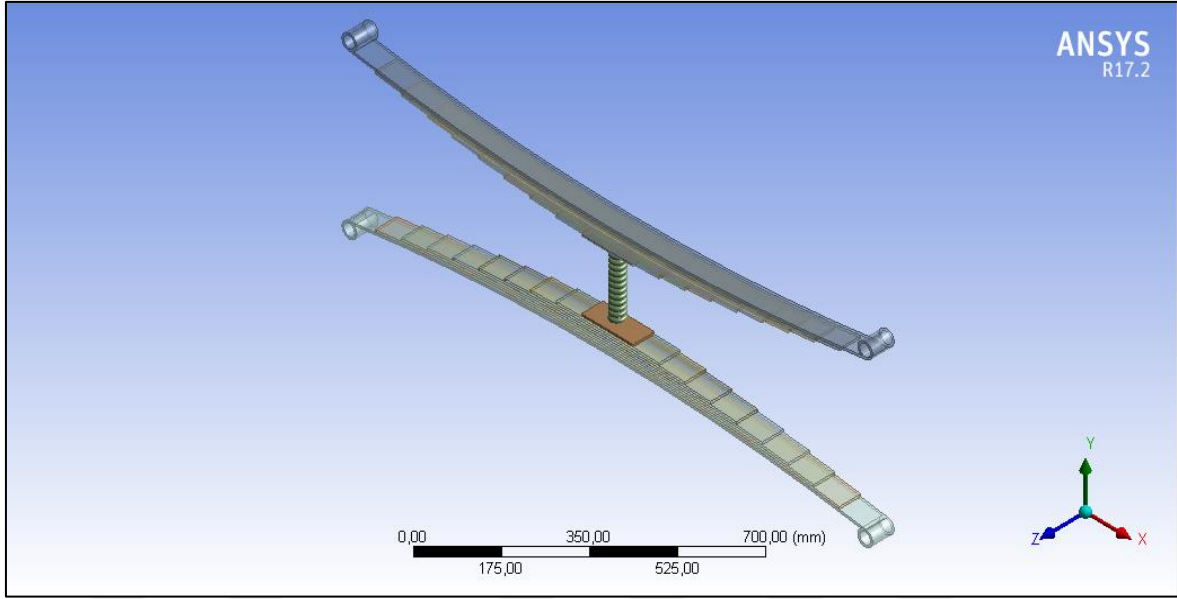
Hibrit (helisel ve yaprak yay birleşimi) alt modeli 4 farklı kat sayısına sahip yaprak yay tasarımına sahiptir. Bunlar; 1,4,6 ve 10 kattan oluşan yaprak yay tasarımıdır. Hibrit yaprak yay modeli için en dış katmanda bulunan lama Y ekseninden 91 mm uzaklıkta çizilerek oluşturulmuştur. 91 mm uzaklığın nedeni model 1 de bulunan helisel yayın aynı geometrik tasarıma ve ölçülendirmeye sahip olmasını sağlamaktır. Oluşturulan her hibrit modelde aynı helisel yay tasarımı oluşturularak yaprak yayların analizi sırasında helisel yaya ait hiçbir parametrenin değiştirilmemesi hedeflenmiştir. Böylelikle en doğru hibrit modelin parametrik analizi sırasında helisel yayın geometrik boyutlandırmalarındaki değişimlerin etkisi bertaraf edilmiştir.

İlk katman lamanın (En dış katmanda bulunan lama) tasarımı için oluşturulan çizim Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. En dış lama görseli

İlk lamanın (En dış katmanda bulunan lamanın) çizilmesinin ardından en son lamaya (ana lama) kadar bir önceki modellerin tasarımında olduğu gibi sıra ile aynı düzende çizilmiştir. Modelin helisel yay ile bağlantısı en dış lamanın dış yüzeyi ile yapılmıştır. Hibrit model Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

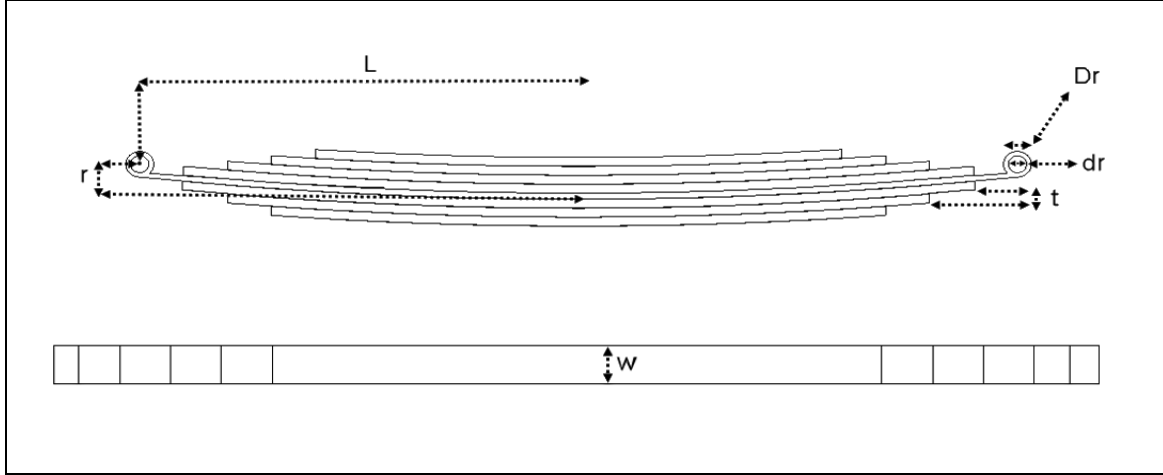


Şekil 5.20. Hibrit model örnek görseli

Hibrit modelde bulunan helisel yay model A da bulunan helisel yay ile aynı olduğu için yeni şekil eklenmemiştir. Helisel yaya ait şekiller ve Çizelgeler model A da bulunan (Bkz. Şekil 5.11ve Bkz. Çizelge 5.8) bulunmaktadır. Hibrit modele ait lama uzunlukları çift model ile aynı olup (Bkz. Çizelge 5.7’de) gösterilmiştir.

5.2.3. C modelin hazırlanması

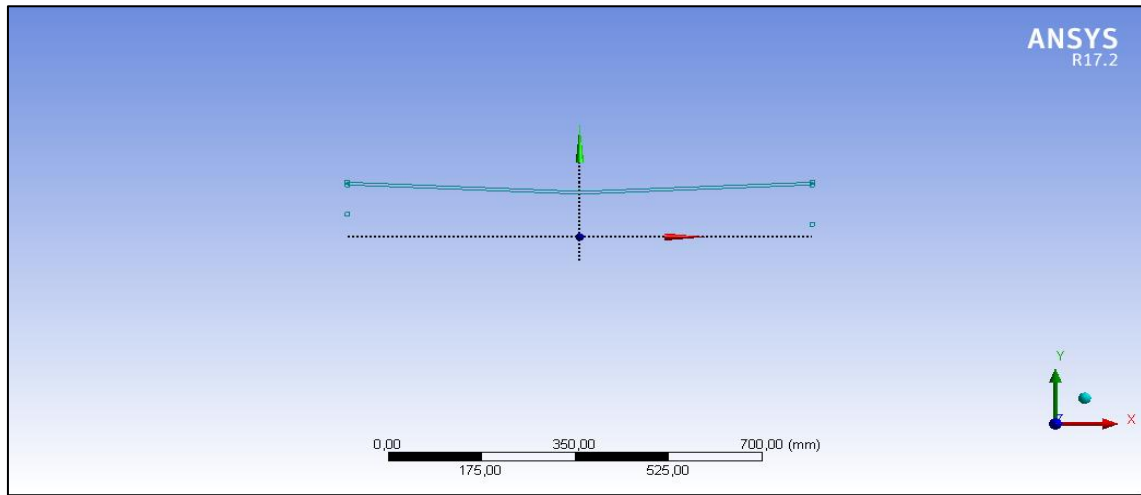
Model C için toplamda 4 farklı tasarıma sahip alt model oluşturulmuştur. Bunlar; Düz, Ters, Çift (düz ve ters) ve hibrit modeldir. Model C’ye ait örnek teknik resim Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Teknik resimde bulunan parametrelerin açıklanması (Bkz. Çizelge 5.4’de) gösterilmiştir. Model C diğer modellerden farklı olarak kat sayıları değiştirilerek tasarlanmıştır. Model C’ye ait alt model tasarımlarının kat sayıları ise 1,3,5 ve 9 kattan oluşan tasarımlardır. Seçilen lama sayılarının tek sayı olmasının nedeni ana lamanın ortada olmasını sağlayarak ana lamanın üstüne ve altına simetrik olarak model tasarımının yapılabilmesidir.



Şekil 5.21. Model C teknik resim

Düz alt model

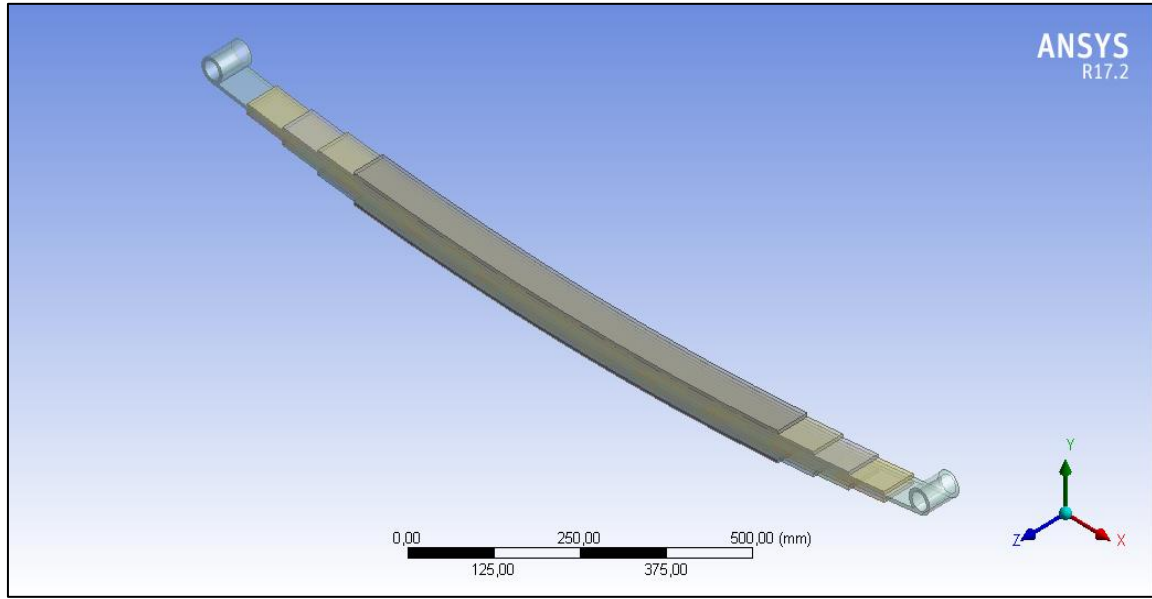
Düz model toplamda 4 farklı kat sayısına sahip yaprak yay tasarımına sahiptir. Bunlar; 1,3,5 ve 9 kattan oluşan yaprak yay tasarımıdır. Düz model tasarımı temel olarak ana lamanın ortada olması ve ana lamanın altına ve üstüne birbirleri aynı boyutlandırmalara sahip lamaların tasarlanması ile oluşturulmuştur. Düz modele ait ilk lamanın tasarımı Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Model C düz alt model ilk lamanın tasarımı

Düz model tasarımı için öncelikle Şekil 5.22’de gösterilen lama çizilmiş ve katılaştırma işlemi yapılmıştır. İlk lamanın tasarımının ardından XY Düzleminde yeni bir lama çizimi yapılmıştır ve aynı şekilde katılaştırılmıştır. Orta katta bulunan lamaya kadar yay lamalarının

tasarımı bu şekilde oluşturulmuştur. Orta katta bulunan lama yani ana lama tasarımı için sağ ve sol kanatlarda bulunan göz unsurlarını oluşturan daireler çizilmiştir. Göz unsurlarının çizilmesinin ardından, unsurlar birbirleri ile alt ve üst yüzeylerinden birleştiren iki adet çap dairesi oluşturularak ana lamanın tasarımı yapılmıştır. Ana lamanın tasarımının ardından, ana lamanın altından bulunan yay lamaları ana lamaya simetrik olacak şekilde aynı adım sırası izlenerek modelin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Örnek düz model tasarımı Şekil 5.23’de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Model C düz alt modeli örnek görseli

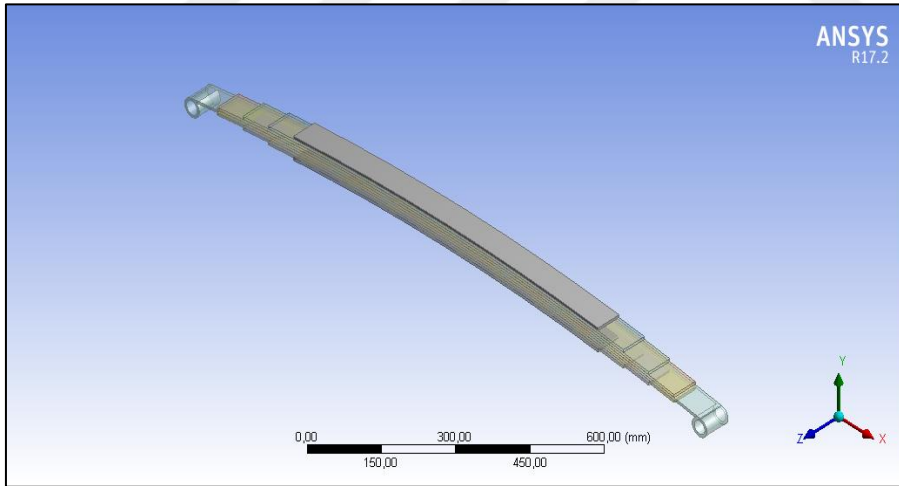
Düz modele ait lama uzunlukları Çizelge 5.10’da gösterilmiştir. Lama tasarımları birbirlerine simetrik olduğu için toplamda 5 farklı lama uzunluğuna sahip model bulunmaktadır.

Çizelge 5.10. Model C düz alt model lama uzunlukları çizelgesi

Kat numarası	Lama uzunluğu (mm)
1	435
2	507,5
3	580
4	652,5
5	725
6	652,5
7	580
8	507,5
9	435

Ters alt modeli

Ters alt modeli toplamda 4 farklı lama sayısına sahip tasarımdan oluşmaktadır. Bunlar: 1,3,5 ve 9 dur. Ters modele ait tasarım düz alt modelinin YZ düzleminde 180 derecelik açı döndürülmesi ile oluşturulmuştur. Ters modele ait lama uzunlukları (Bkz. Çizelge 5.6) gösterilmiştir. Ters alt model tasarımı Şekil 5.24’de gösterilmiştir.

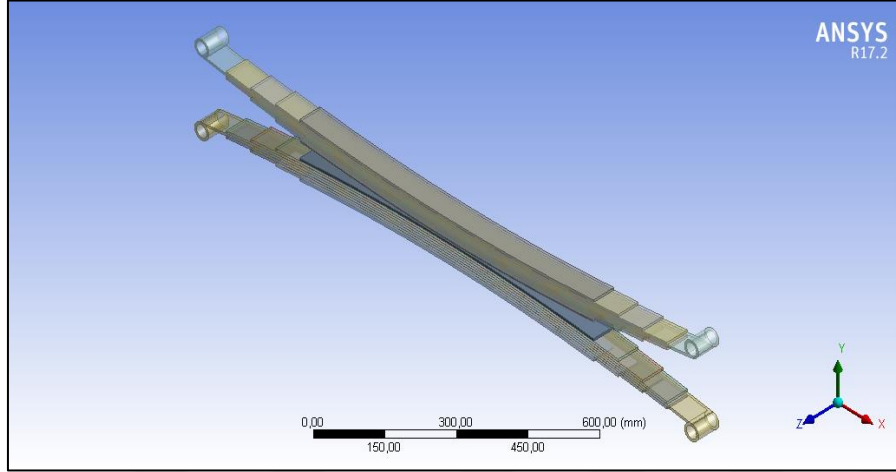


Şekil 5.24. Model C ters alt modeli örnek görseli

Çift (düz ve ters) alt model

Çift (düz ve ters) model toplamda 4 farklı kat sayısına tasarım içermektedir. Bunlar; 1,3,5 ve 9 kattan oluşan lama tasarımlarıdır. Çift alt modeli, düz alt modelinin ZX düzleminde aynalanması sonucunda elde edilmiştir. Aynalama işlemi ile oluşan düz ve ters model en

dışta bulunan lamalardan birbirlerine bağlanmıştır. Çift model tasarımı Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Lama uzunlukları Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.



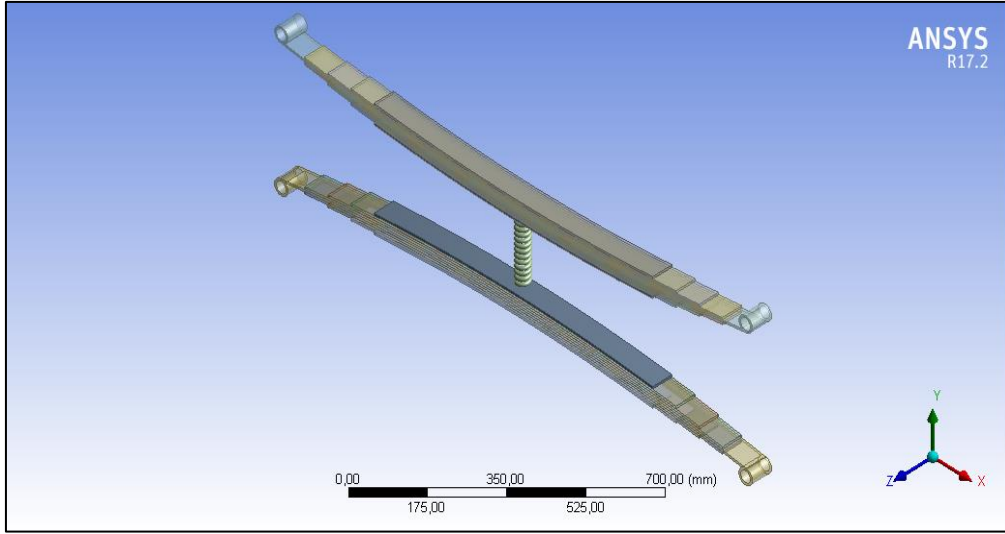
Şekil 5.25. Model C çift alt model tasarımı

Çizelge 5.11. Model C çift alt model lama uzunlukları çizelgesi

Kat numarası	Düz lama uzunluğu (mm)	Ters lama uzunluğu (mm)
1	435	435
2	507,5	507,5
3	580	580
4	652,5	652,5
5	725	725
6	652,5	652,5
7	580	580
8	507,5	507,5
9	435	435

Hibrit alt model

Hibrit alt modeli 4 farklı lama sayısına sahip modelden oluşmaktadır. Bunlar; 1,3,5 ve 9 kattan oluşan tasarımlardır. Hibrit model temel olarak çift taraflı bir yaprak yay tasarımı yapılmış ve yapılan tasarımın arasında oluşturulan boşluğa bir helisel yay tasarımı yapılarak elde edilmiştir. Helisel yay tasarımı diğer modellerde bulunan yay tasarımları ile birebir aynı olup yay şekilleri (Bkz. Şekil 5.13) bulunmaktadır. Helisel yay ile yaprak yay birbirlerine düz ve ters yayların en dış lamalarından bağlanmıştır. Hibrit alt modelin lama uzunlukları çift alt modelinin lama uzunlukları eşittir. Hibrit modele ait tasarım Şekil 5.26’da gösterilmiştir.

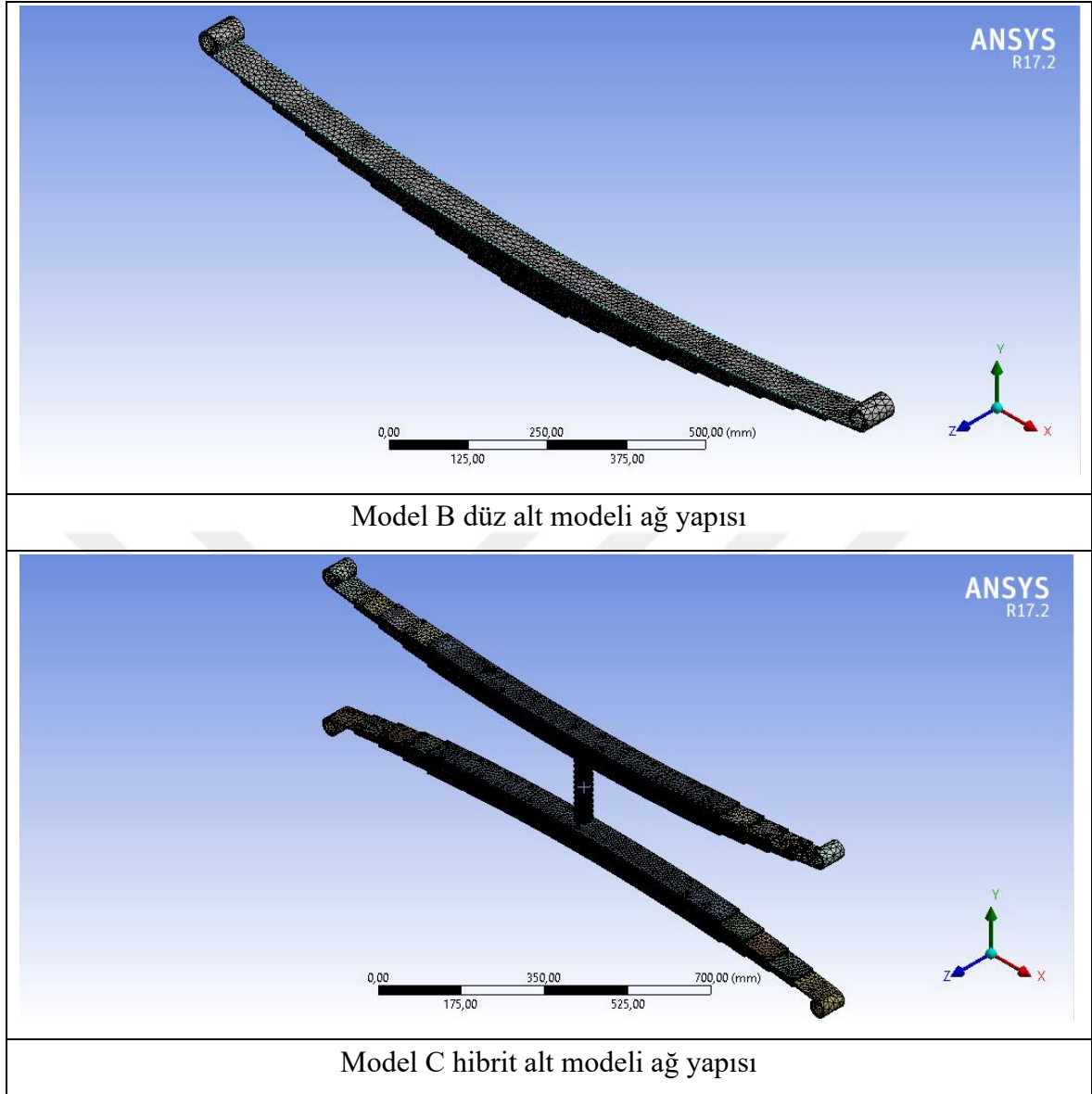


Şekil 5.26. Model C hibrit alt model tasarımı

5.3. Model A, B ve C Ağ Yapısı

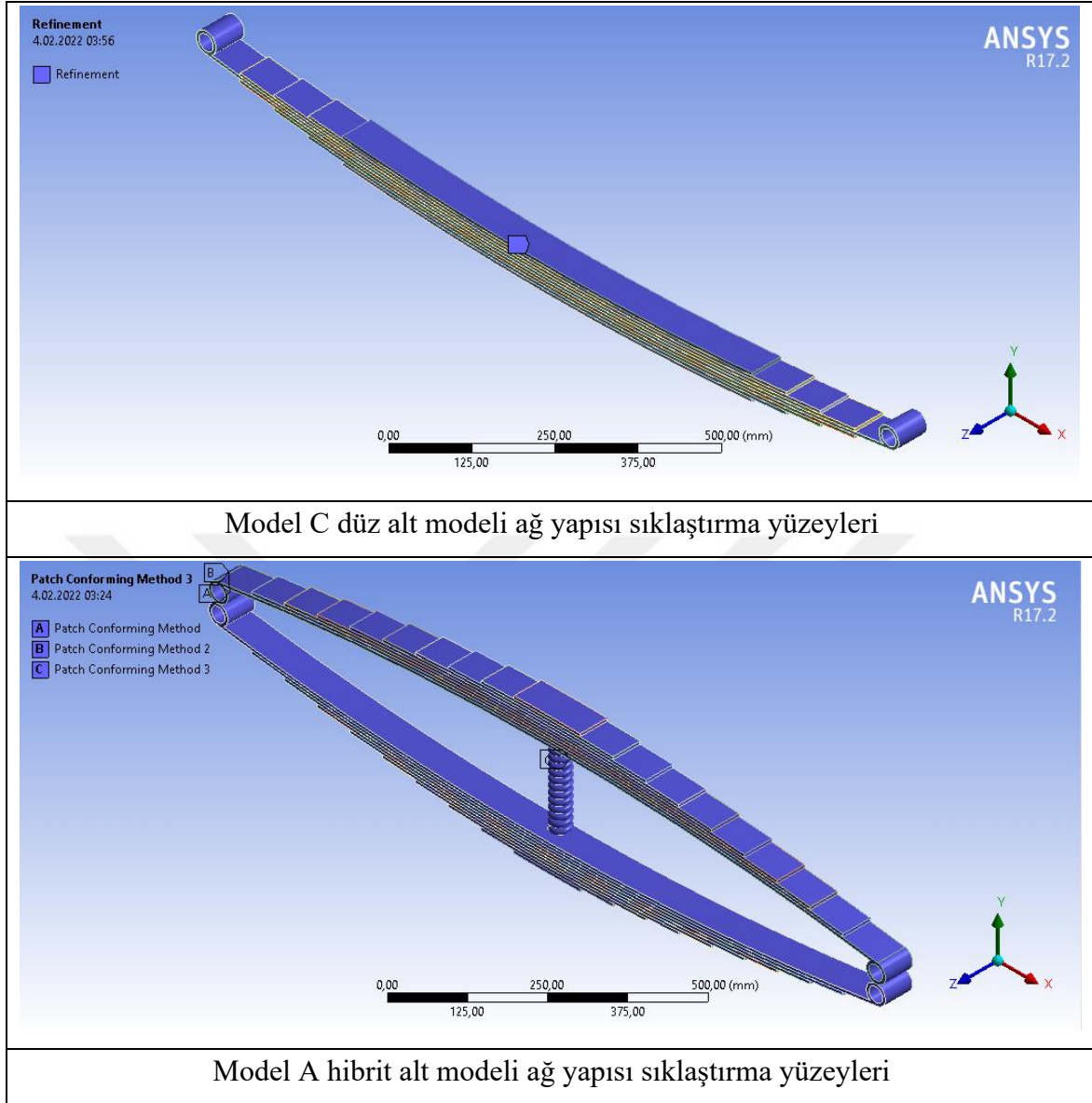
Model A, B, C ve bu modellere ait bütün alt model tasarımları için aynı uygulama yöntemleri kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısını oluşturan elemanların sıklığı ve düğüm noktalarının sayısı ile bu unsurların boyutlandırmaları sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının doğruluğu için önemli olması nedeni ile gerekli sıklaştırma, eleman boyutu küçültme ve ağ yapısı modeli tasarımlar için en optimal şekilde sağlanmıştır.

Ağ yapısının modeli olarak Tetrahedrons seçilmiştir. Seçilen model bütün yaprak yay lamaları seçilerek bütün parçalara uygulanmıştır. Hibrit model için yay lamalarının yanında helisel yay ve helisel yay ile yaprak yay arasında ki bağlantıyı sağlayan parçalara da Tetrahedrons ağ yapısı uygulanmıştır. Ağ modelinin seçilmesinin ardından ağ yapısını düzenlemeye yarayan relevance unsuru için 96 değeri uygun görülmüş ve bütün modeller için relevance değeri 96 olarak uygulanmıştır. Ağ yapısının modeli için örnek tasarımlar Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



Şekil 5.27. Yaprak yay örnek ağ yapısı gösterimi

Ağ yapısı oluşturulurken öncelikle yaprak yaylar için kritik olan bölgelerde ağ yapısı sıklaştırma uygulanmıştır. Yaprak yaylar için kritik bölgeler; Yay lamalarının birbirine temas ettikleri alt ve üst yüzeyleri, göz unsurlarının iç ve dış yüzeyleri ve hibrit model tasarımı için helisel yayın bütün yüzeyleri kritik bölgeler olarak seçilmiş ve ağ yapısı sıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı sıklaştırma işlemi Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Örnek ağ yapısı sıklaştırma yüzeylerinin gösterimi

5.4. Model A, B ve C Bağlantı

Tasarımı yapılan model A, B, C ve bu modellerin alt modellerinin hepsinde yaprak yay lamaları için uygulanan bağlantı türü ve bağlantı yerlerinin yüzeyleri aynıdır. Yaprak yaylar üzerlerine uygulanan kuvvetleri lamalar üzerinden birbirlerine iletmektedir. İletim şekli birbirleri üzerinden iletebilmelerinin temel nedeni birbirlerine bağlı ve sıralı şekilde hareket edebilmeleridir. Yaprak yaylara ait bu özellik de yapılan bütün tasarımlar için simülasyona dahil edilmiştir. Bu nedenle simülasyon için tasarımı yapılan bütün yaprak yayların lamaları birbirine Bonded komutu kullanılarak tasarımı yapılmıştır. Ansys programı üzerinden

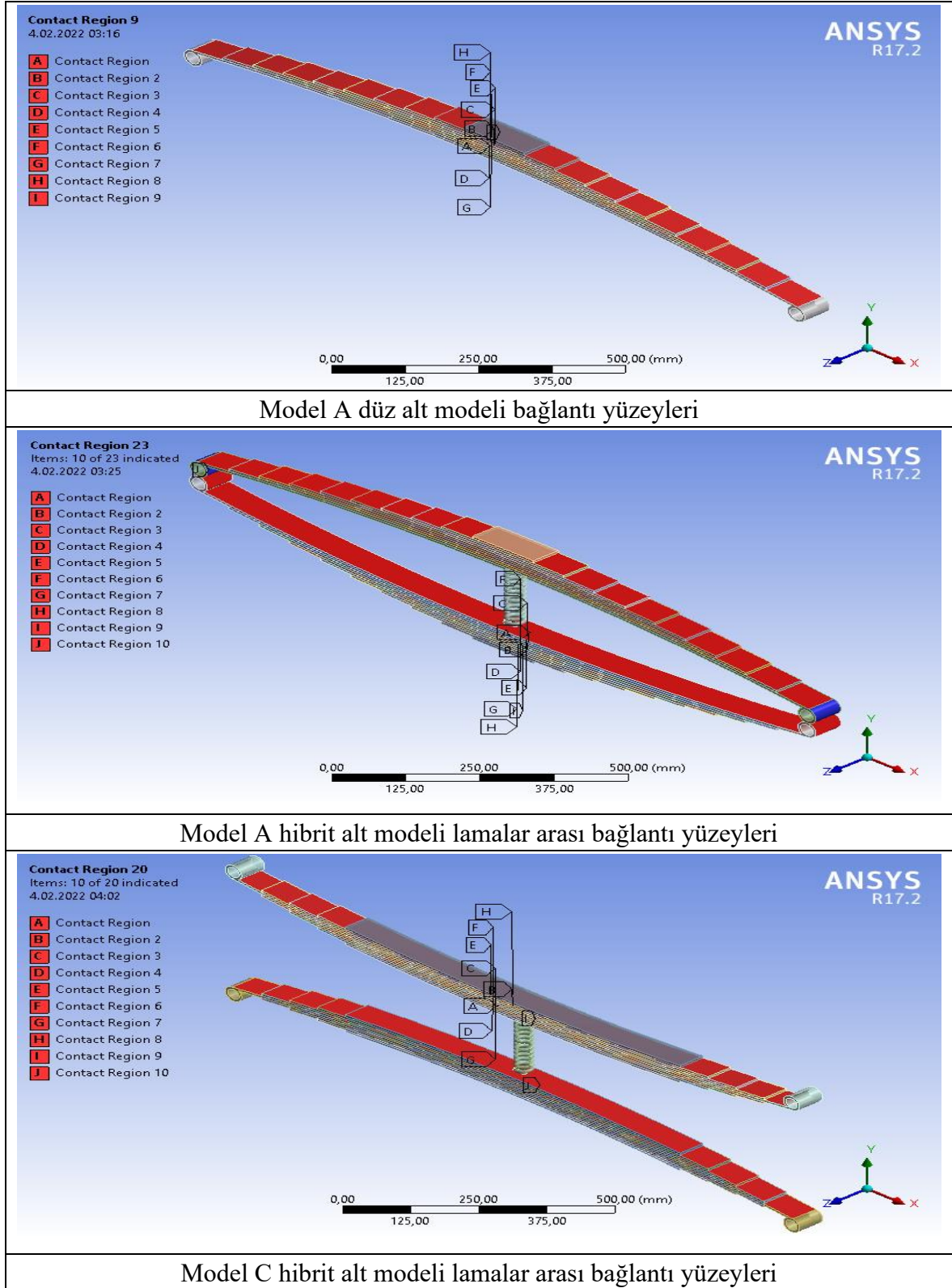
komutun kullanılması için birbirlerine temas eden lama yüzeyleri (alt katta bulunan lamanın üst yüzeyi ve üst katta bulunan lamanın alt yüzeyi) seçilmiş ve komut uygulanmıştır. Uygulanan bağlantı tipi Şekil 5.29’de gösterilmiştir.

☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Solid
Target Bodies	Solid
☐ Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic

Şekil 5.29. Bağlantı tipi görseli

Çift alt modeli için lamalara uygulanan bağlantı komutlarının yanında aynı zamanda modeller birbirlerine temas eden yüzeylerinden Bonded komutu kullanılarak bağlanmıştır. Model A için düz ve ters yaprak yay tasarımları birbirlerine göz unsurlarının dış yüzeylerinden bağlanmıştır. Model B ve model C için bağlantı yüzeyi birbirlerine temas eden en dış lamalarından uygulanmıştır.

Hibrit alt modelleri lamaların bağlantısı için uygulanan bonded komutunun yanında helisel yay ve yaya temas eden yaprak yay laması yüzeyi ayrıca Bonded komutu kullanılarak tasarlanmıştır. Helisel yay tasarımı için yapılan 3. Bağlantı unsuru (Bkz. Şekil 5.13) üst kısmından yaprak yaya bağlanmıştır. 3. Bağlantı unsuru aynı zamanda 2. Bağlantı unsuru ile birbirlerine temas eden yüzeylerinden Bonded komutu kullanılarak tekrardan bağlanmıştır. Düz, ters, çift ve hibrit modellerin bağlantıları için örnek şekiller seçilmiş ve Şekil 5.30’da gösterilmiştir.

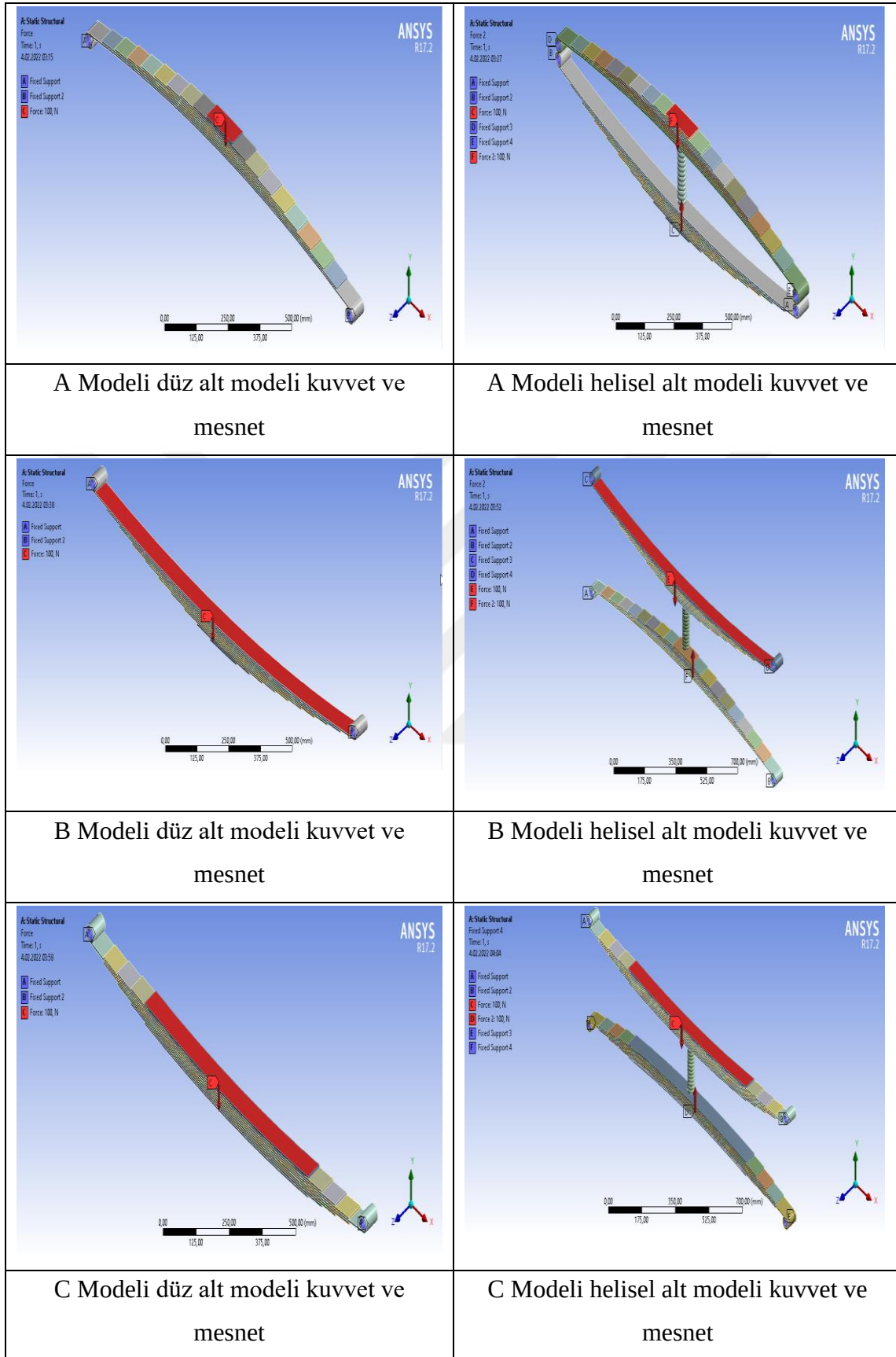


Şekil 5.30. Lamalar arasında bağlantı yüzeylerinin örnek gösterimi

5.5. Model A, B ve C Uygulanan Kuvvet ve Mesnet

Model A, B, C ve bu modellerin alt modellerinin hepsinde uygulanan kuvvet değeri ve mesnet şekilleri aynıdır. Bütün modeller için mesnetler yaprak yayların göz unsurlarının iç yüzeyleri seçilerek uygulanmıştır. Tasarımı yapılan düz ve ters alt modelleri 2 adet göz unsuru içerdiği için 2 adet mesnet uygulanmıştır. Çift ve helisel alt modellerinde 4 adet göz unsuru bulunduğu için 4 adet mesnet uygulanmıştır. Uygulanan bütün mesnetler için sabit mesnet mekanizması seçilmiştir. Mesnetlerin gösterimi için örnek bir alt modelden belirli şekiller seçilmiştir ve uygulanan kuvvet değerleri ile birlikte Şekil 5.31’de gösterilmiştir.

Tasarımı yapılan 3 model ve alt modelleri için uygulanan 5 farklı kuvvet değeri uygulanarak simülasyon edilmiştir. Bu kuvvet değerleri; 100, 2500, 7500, 10000 ve 25000 Newton’dur. Uygulanan kuvvetlerin yerleri düz ve ters alt modelleri için tek yüzey olmaktadır. Çift ve helisel alt modeller için uygulanan kuvvet yüzeyleri ise iki yüzeyli olarak uygulanmıştır. İki yüzeye uygulanan kuvvetler birbirlerine ters yönlerde uygulanıp aynı büyüklük değerine sahip olarak tasarlanmıştır. Temel olarak çift ve helisel alt modellerin uygulanan yükler yaprak yay bası uygulamaktadır. Uygulanan kuvvetlerin yerlerini göstermek için örnek modeller seçilmiştir. Seçilen örnek modelin şekilleri mesnetler ile birlikte Şekil 5.31’de gösterilmiştir.



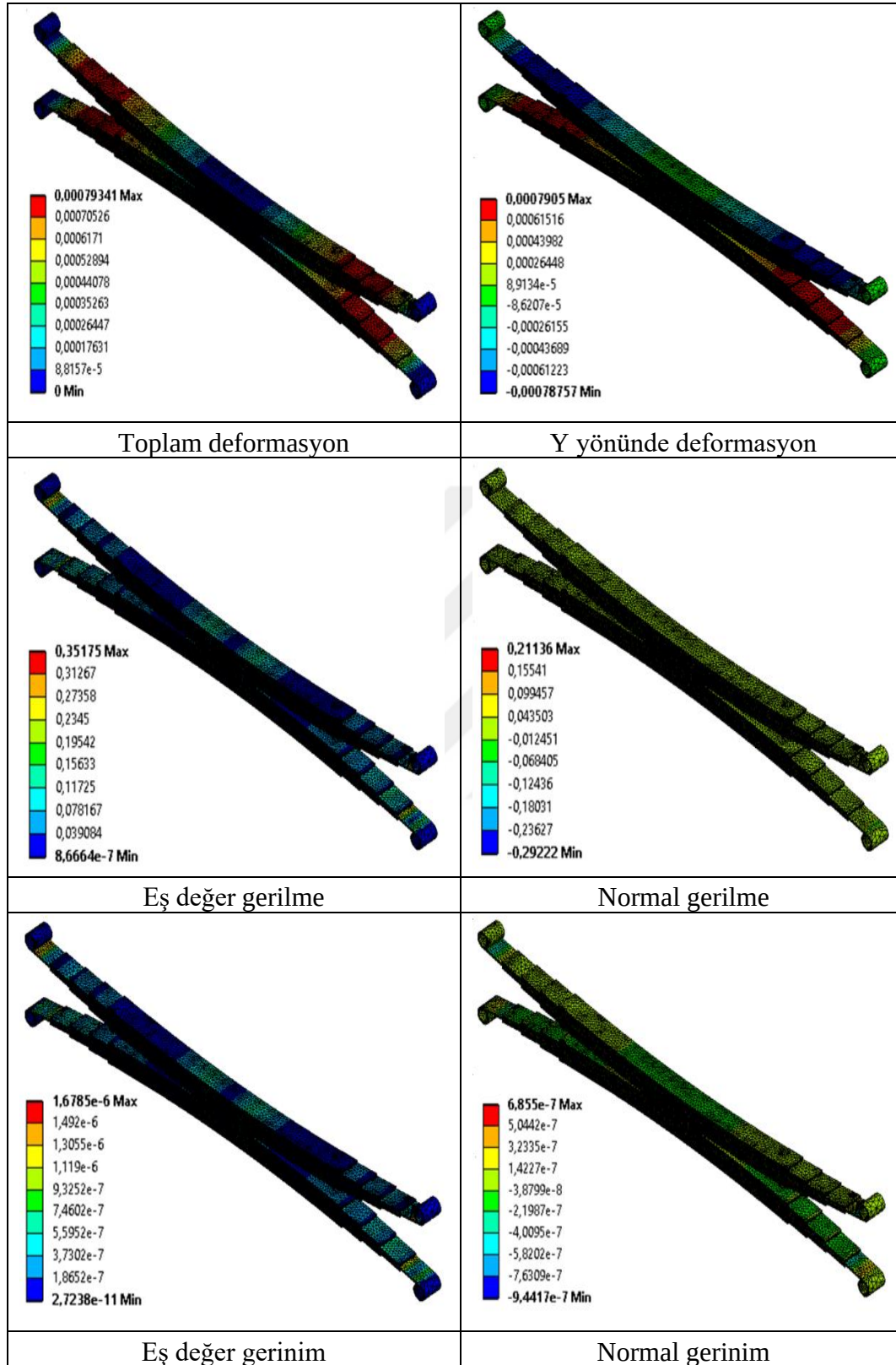
Şekil 5.31. Alt modeller kuvvet uygulanan bölgelerin örnek gösterimi

5.6. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

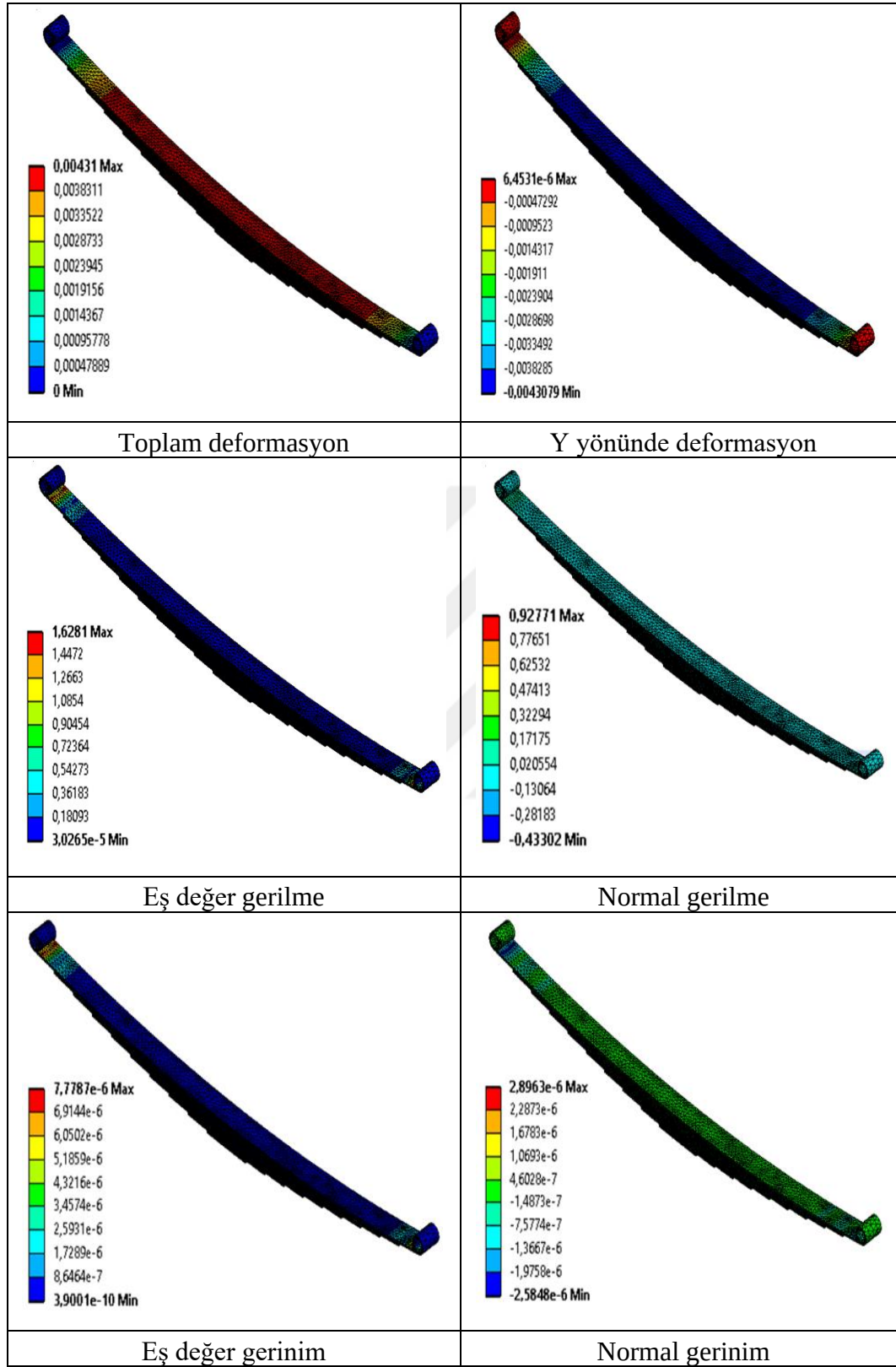
Tasarımı yapılan 3 farklı yaprak yay ve her yaprak yaya ait olan alt modellerin hepsi 6 farklı sonuç parametresine göre analiz edilmiş ve elde edilen bulgular Excel programı üzerinden derlenerek birbirleri arasında kıyaslanma yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen 6 farklı sonuç parametresi: toplam deformasyon, Y yönünde deformasyon, eşdeğer gerilme, normal gerilme, eşdeğer gerinim ve normal gerinimdir. Elde sonuçlar tasarım parametrelerine göre değişmektedir. Bütün modeller ve alt modeller için tasarım parametrelerinin değişiminde benzer parametreler için ortak noktalar bulunmaktadır. Parametre değişimlerinin etkileri Bölüm 5.6.1-5.7 arasında açıklanmıştır. Aynı zamanda yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen modeller üzerinden örnek görseller hazırlanmış ve Şekil 5.36-5.50 arasında gösterilmiştir.

Bölüm 5.6.1-5.7 arasında toplamda tasarımı yapılan 2160 yaprak yay modeli için belirli aralıklarla seçilen veriler için grafikler oluşturularak tasarım parametrelerinin değişmesi sonucu sonuçların nasıl etkilendiği araştırmak için 4 farklı parametre belirlenmiştir.. Bu parametreler: lama sayısı değişimi, lama kalınlığı değişimi, lama genişliği değişimi ve uygulanan yük miktarının değişimidir. Bu parametreler üzerinden farklı modeller ve alt modeller için örnek grafikler sunularak parametre değişimlerinin etkileri incelenmiştir.

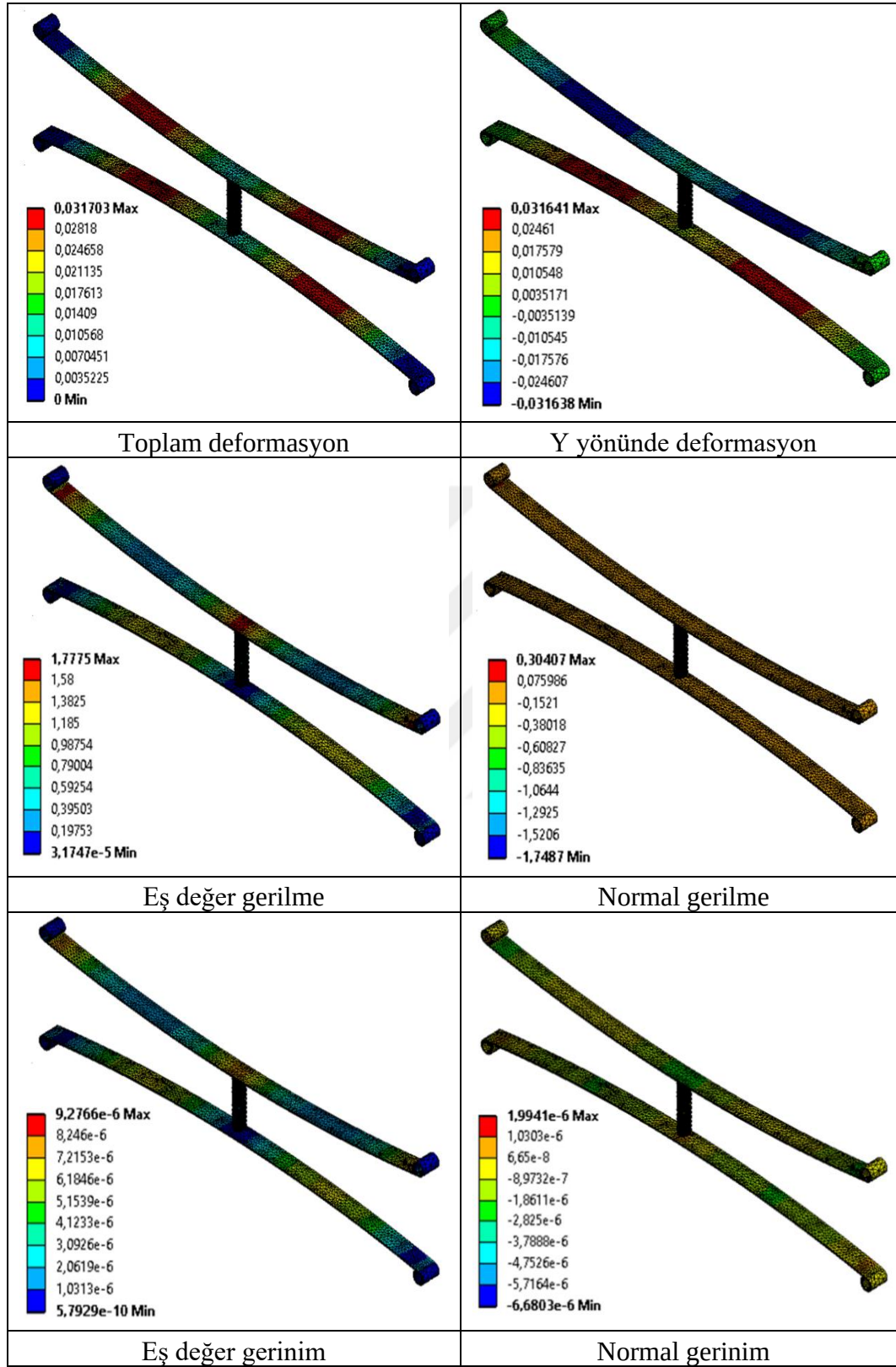
Yapılan incelemeler sırasında yalnızca sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmamıştır. Aynı zamanda probelar yardımı elde edilen şekil değiştirme miktarı ile uygulanan yükün oranlanması sonucu elde edilen yay sabiti değerleride Microsoft Excel programı üzerinde derlenmiş ve bir sonuç parametresi olarak yay sabiti değişimin etkileri de ölçülmüştür.



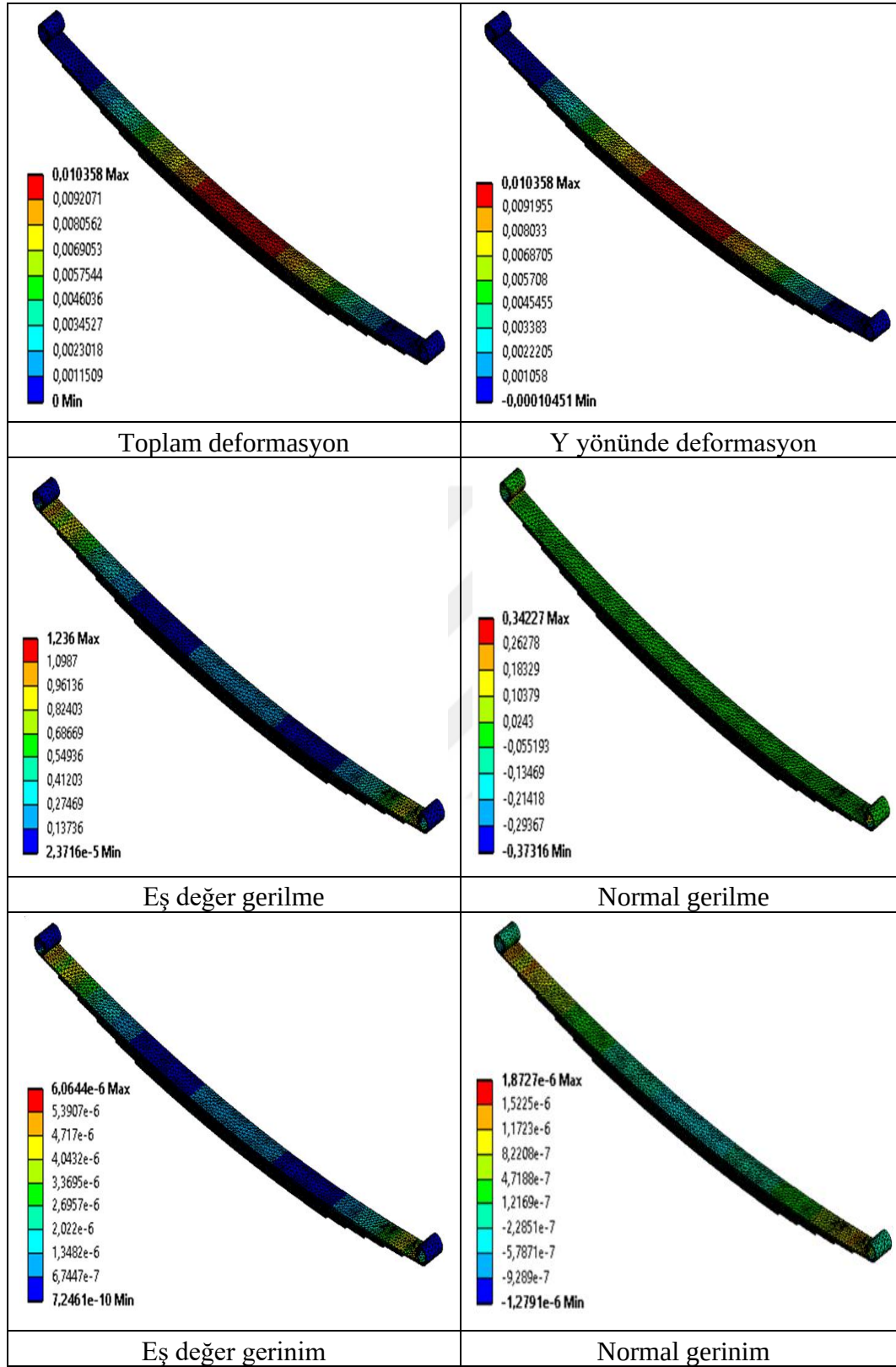
Şekil 5.32. Model C çift alt modelinin sonlu elemanlar analiz sonuçları



Şekil 5.33. Model B düz alt modelinin sonlu elemanlar analiz sonuçları



Şekil 5.34. Model B hibrit alt modelinin sonlu elemanlar analiz sonuçları



Şekil 5.35. Model A ters alt modelinin sonlu elemanlar analiz sonuçları

5.6.1. Toplam deformasyon

Toplam deformasyon, yaprak yay üzerine kuvvet uygulanması sonucu oluşan şekil değiştirme miktarı olarak tanımlanabilir. Toplam deformasyon miktarı en yüksek olarak yaprak yayın orta bölgesinde olduğu saptanmıştır. Bu durumun temel nedeni kuvvet uygulanan bölgenin yaprak yayın orta bölgesine denk gelmesidir. Yayın uç kısımlarına doğru gidildikçe toplam deformasyon miktarının azaldığı saptanmıştır.

Toplam deformasyon miktarının değişimi tasarlanan yaprak yay parametrelerinin değişimine göre etkilenmektedir. Bu değişimlerin etkisinin gösterilmesi için 3 örnek grafik hazırlanmıştır ve Şekil 5.36'da gösterilmiştir. Örnek grafikler alt modellere göre kendi içlerinde ayrılarak sadece değiştirilen parametrenin toplam deformasyona etkisi gösterilmiştir. Oluşturulan her bir grafik de bir parametre değişken tutulmuş ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Grafikleri oluştururken kullanılan sabit parametreler ve değişken parametreler Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. Toplam deformasyon grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	10000	6	değişken	10	GENİŞLİK: 60-80 mm
B	25000	değişken	60	6	LAMA SAYISI : 4-10
C	değişken	5	80	10	UYGULANAN YÜK: 2500-10000 N

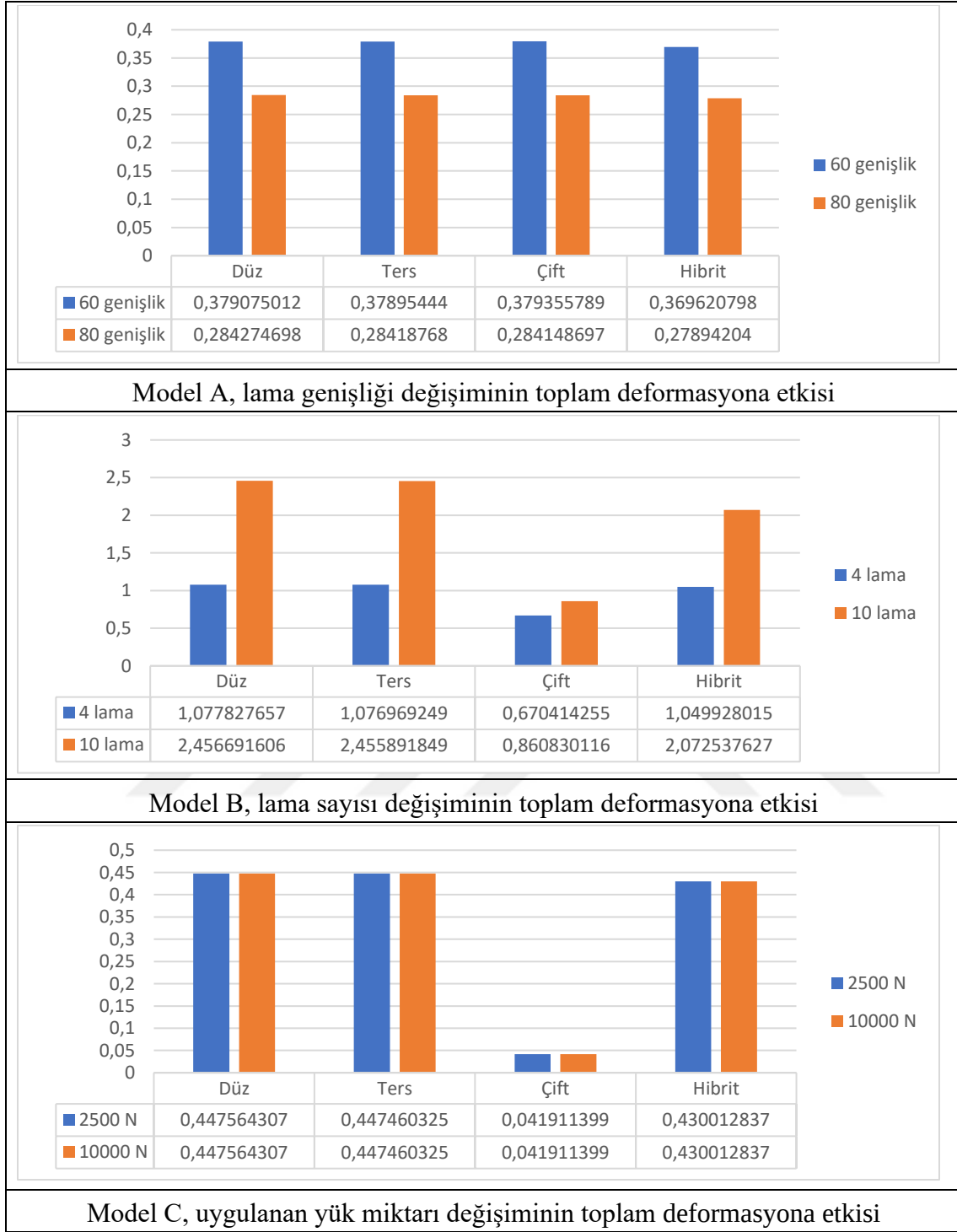
İlk grafikte model A için lama genişliği değişiminin toplam deformasyona etkisi incelenmiştir. Lama genişliğinin artması ile yayın deformasyona olan direncinin artması nedeni ile bütün yaprak yay tasarımlarında toplam deformasyon miktarının azaldığı saptanmıştır. 60 ve 80 mm genişliğe sahip her alt modelde de aynı genişlikte olan yay tasarımlarının benzer miktarda toplam deformasyon olduğu gözlenmiştir.

İkinci grafikte model B için lama sayısının değişiminin toplam deformasyona etkisi incelenmiştir. Lama sayısının artması ile yayın deformasyona olan direnci arttığı saptanmış ve bütün tasarımı yapılan yaprak yay modellerinde lama sayısının artması sonucu oluşan toplam deformasyon miktarının azaldığı saptanmıştır. Alt modellere göre kıyaslanma

yapıldığında ise düz ve ters alt modellerinin birbirine yakın miktarda deformasyon oluştuğu gözlenmiş ve en az deformasyon oluşumu ise çift modelde oluştuğu saptanmıştır.

Üçüncü grafikte model C için uygulanan yük miktarının değişiminin toplam deformasyona olan etkisi incelenmiştir. Yük değişiminin toplam deformasyon büyük bir etkisi olmadığı ve benzer sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Alt modellere göre kıyaslama yapıldığında ise düz, ters ve hibrit modellerin birbirine yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır. En az deformasyon miktarı yine çift modelde oluştuğu gözlenmiştir.





Şekil 5.36. Yaprak yay parametre değişimlerinin toplam deformasyona etkisi

Toplam deformasyon miktarının tasarımı yapılan ana modellere göre kıyaslanması için 3 farklı örnek grafik Şekil 5.37’de gösterilmiştir. Oluşturulan örnek grafik için belirlenen yay tasarımın boyutsal parametreleri Çizelge 5.13’de gösterilmiştir.

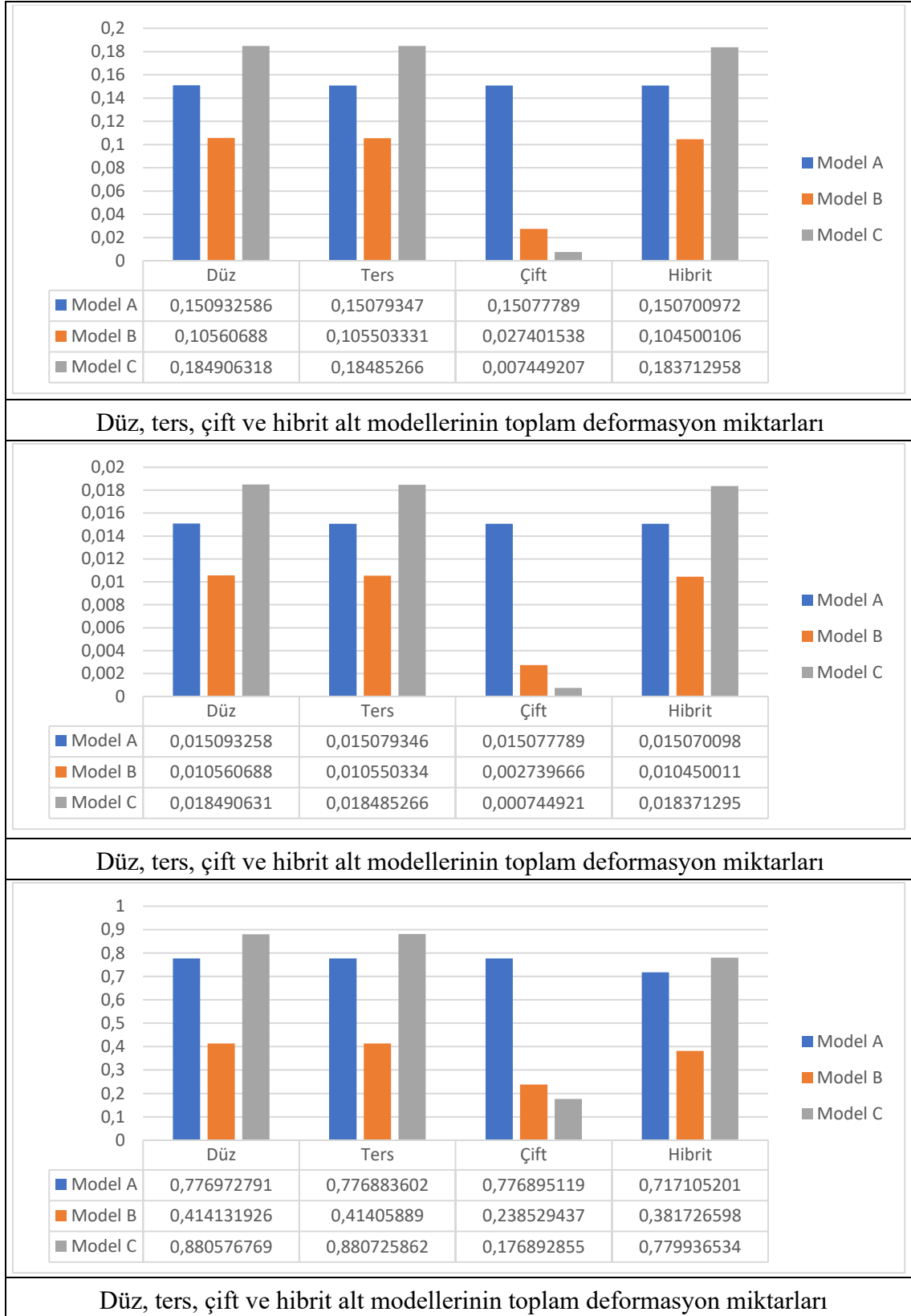
Çizelge 5.13. Toplam deformasyon için grafiklerde kullanılan parametreler

ANA MODEL	YÜK (N)	LAMA S.	GENİŞLİK (mm)	KALINLIK (mm)
MODEL A,B ve C	25000	10	120	15
MODEL A,B ve C	2500	10	120	15
MODEL A,B ve C	7500	6	60	6

3 ana model için oluşturulan örnek grafikler 4 farklı alt model esas alınarak kıyaslanma yapılmıştır. Oluşturulan grafiklerde lama sayısı, genişlik ve kalınlık parametreleri sabit tutulurken uygulanan kuvvet miktarının değişmesi toplam deformasyon miktarını ufak ölçüde etkilediği saptanmıştır. Bütün yaprak yay tasarımları içinde benzer sonuçlar olduğu saptanmıştır. Lama sayısı, genişlik ve kalınlık parametrelerinin azalması durumunda ise oluşan toplam deformasyon miktarı büyük ölçüde arttığı saptanmıştır.

Oluşturulan bütün tasarımlar alt modellere göre kıyaslandığı zaman en düşük toplam deformasyon miktarının çift alt modelinde olduğu diğer alt modellerin ise aynı tasarım parametrelerine sahip olan alt modellerinde ise yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Çift alt modelleri içinde ise en az deformasyon miktarı kademeli lama boyutlandırmasına sahip C ana modelinde olduğu saptanmıştır.

Toplam deformasyon açısından en düşük sonuçların sonuçların C ana modelinin çift alt modelinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.37. Model A, B ve C toplam deformasyon miktarına göre kıyaslanması

5.6.2. Y yönünde deformasyon

Y yönünde deformasyon miktarı, toplam deformasyonun en yoğun olduğu bölge ile yaprak yayın aynı bölgesinde olduğu saptanmıştır. Uygulanan kuvvetin etkisi ile her iki deformasyonda aynı bölgede oluşmuştur.

Y yönünde deformasyon miktarının değişimini etkileyen tasarım parametrelerinin anlaşılması için 3 farklı örnek grafik oluşturulmuştur Şekil 5.38’de gösterilmiştir. Her grafik farklı tasarım parametrelerinin kıyaslanması amaçlamıştır. Kıyaslanan tasarım parametrelerinin boyutları Çizelge 5.14’de gösterilmiştir.

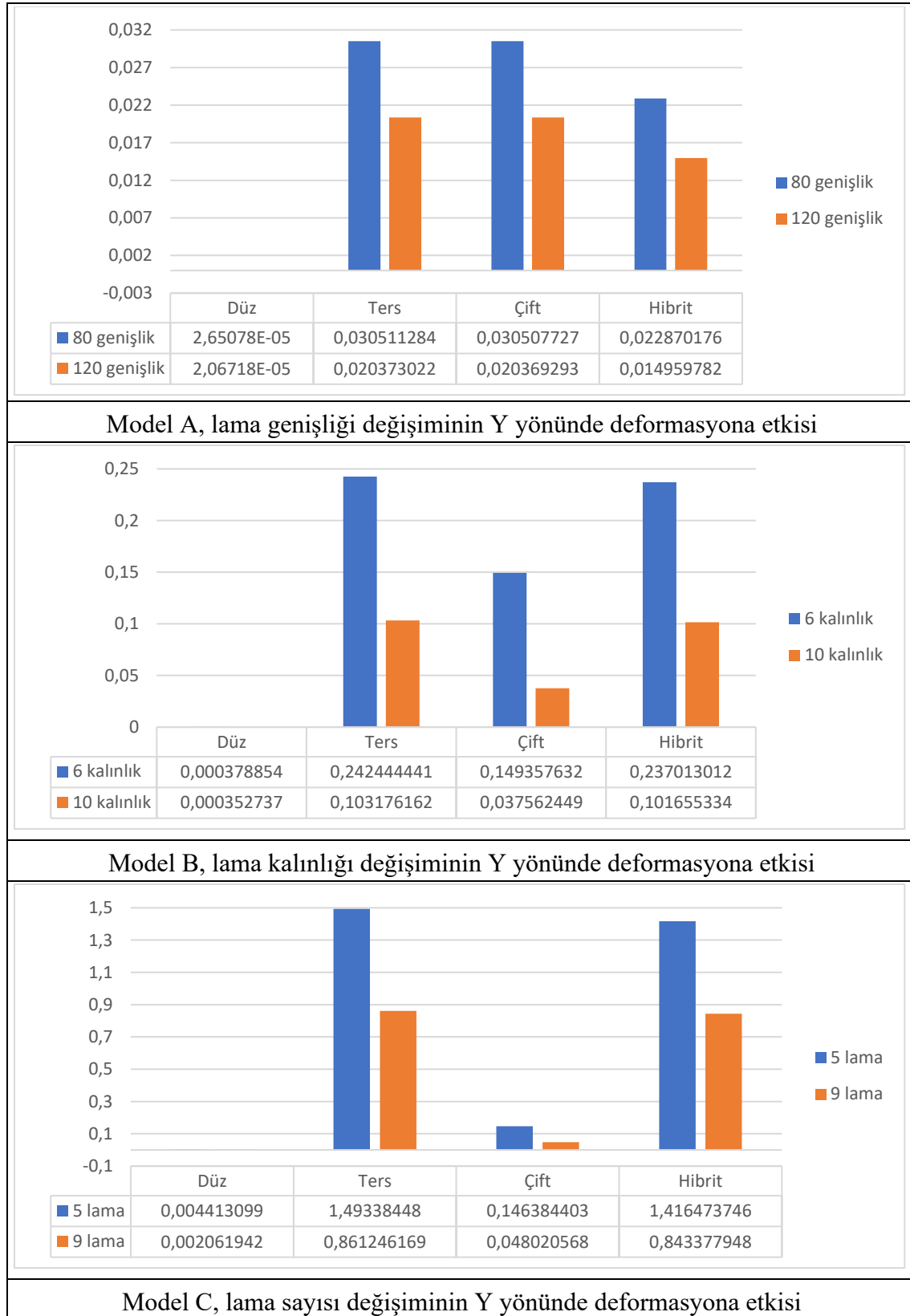
Çizelge 5.14. Y yönünde deformasyon grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	100	1	değişken	6	GENİŞLİK: 80-120
B	7500	10	80	değişken	KALINLIK : 6-10 mm
C	25000	değişken	60	10	LAMA SAYISI : 5-9

İlk grafikte model A için lama genişliği değişiminin Y yönünde deformasyona etkisi gösterilmiştir. Her alt model için lama genişliğinin artması Y yönünde deformasyon miktarını azalttığı saptanmıştır. Düz alt modeli ile diğer modeller arasında büyük bir fark olduğu gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni düz alt modeli için uygulanan yük ana lama üzerine uygulandığı ve böylelikle yükün en uzun lama üzerinde daha fazla dağılması nedeni ile Y yönünde deformasyon miktarının azaldığı görülmüştür.

İkinci grafikte model B için kalınlık değişiminin Y yönünde deformasyona etkisi gösterilmiştir. Kalınlık artışı yapılan bütün tasarımlarda Y yönünde oluşan deformasyon miktarını azalttığı saptanmıştır. Düz alt modelinde en az y yönünde deformasyon miktarı olduğu gözlenmiştir.

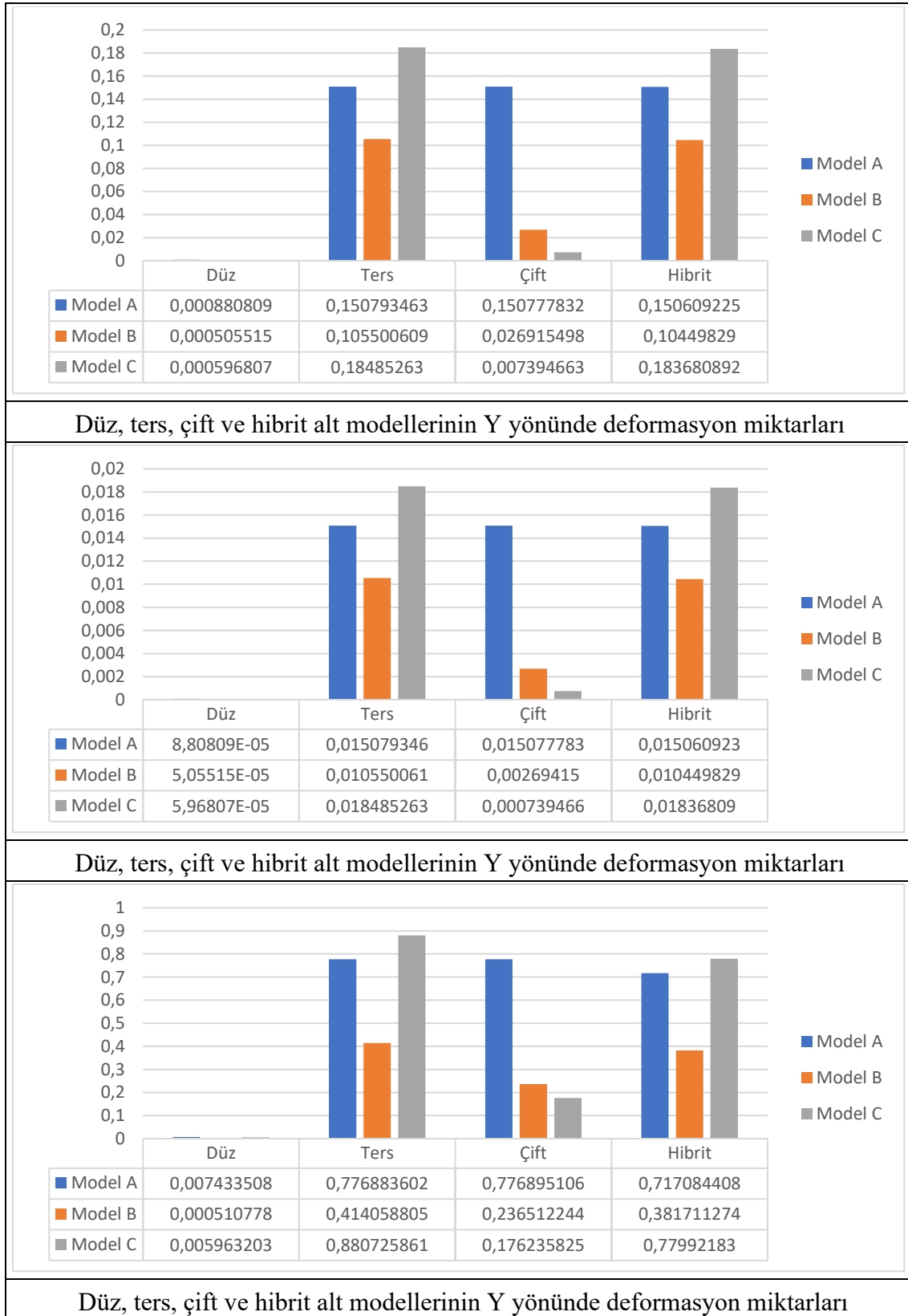
Üçüncü grafikte model C için lama sayısı değişiminin Y yönünde deformasyona etkisi gösterilmiştir. Lama sayısının artması Y yönünde oluşan deformasyon miktarını bütün tasarımlar için azalttığı gözlenmiştir. Y yönünde deformasyon miktarının en az düz alt modelinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.38. Yaprak yay parametre değişimlerinin Y yönünde deformasyona etkisi

Y yönünde deformasyon oluşumunu ana modellere göre kıyaslanması için 3 farklı grafik oluşturulmuştur ve Şekil 5.39'da gösterilmiştir. Oluşturulan örnek grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Yapılan grafiklerde 4 alt model ve 3 ana model kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslanmalar sonucunda bütün yaprak yay tasarımları için en düşük Y yönünde gerilme düz alt modelinde olduğu ve her ana model göz önüne alındığında düz alt model için yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır. Ters alt modeline göre kıyaslanma yapıldığında en yüksek deformasyonun model C üzerinde olduğu en düşük deformasyonun ise model B üzerinde olduğu saptanmıştır. Çift alt modeline göre kıyaslanma yapıldığında en düşük deformasyonun ise model C üzerinde olduğu, en yüksek deformasyonun ise model A üzerinde olduğu saptanmıştır. Hibrit alt modeli için en düşük deformasyon model B üzerinde olduğu, en yüksek deformasyonun ise model C üzerinde oluşmasına rağmen model A ile bütün yay tasarımları için yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



Şekil 5.39. Model A, B ve C Y yönünde deformasyon miktarına göre kıyaslanması

5.6.3. Eş-değer gerilme

Eş değer gerilme yaprak yay üzerinde en yüksek olduğu bölge yayın göz kısımlarına yakın bölgelerde olduğu gözlenmiştir. Göz unsurunun yakın bölgelerinde yoğunlaşmasının temel nedeni uygulanan kuvvetin oluşturduğu moment dolayısıyladır. Göz unsuru yaprak yayın merkeze en uzak bölgesi olması nedeni ile uygulanan kuvvetin mesafesinin artması ve böylelikle oluşan momentin aynı şekilde artmasına neden olmuştur. Aynı zamanda göz unsuru yakınlarında yaprak yay geometrisinde bir süreksizlik oluşması nedeni ile de oluşan gerilme miktarı bu bölge üzerinde artış göstermesinin bir diğer nedenidir.

Eş-değer gerilme miktarı tasarlanan yaprak yay parametrelerinin değişimine göre etkilenmektedir. Bu doğrultuda 3 adet grafik gösterilmiştir (Şekil 5.40). Oluşturulan grafikler farklı parametrik boyutların etkisini ölçmek için oluşturulmuş örnek grafikler olup bütün tasarımlar için benzer sonuçlar vermektedir. Değişen tasarım parametreleri Çizelge 5.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.15. Eş-değer gerilme grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	değişken	6	80	6	UYGULANAN YÜK: 2500-7500 N
B	7500	değişken	120	10	LAMA SAYISI : 1-6
C	10000	3	değişken	15	GENİŞLİK: 80-120

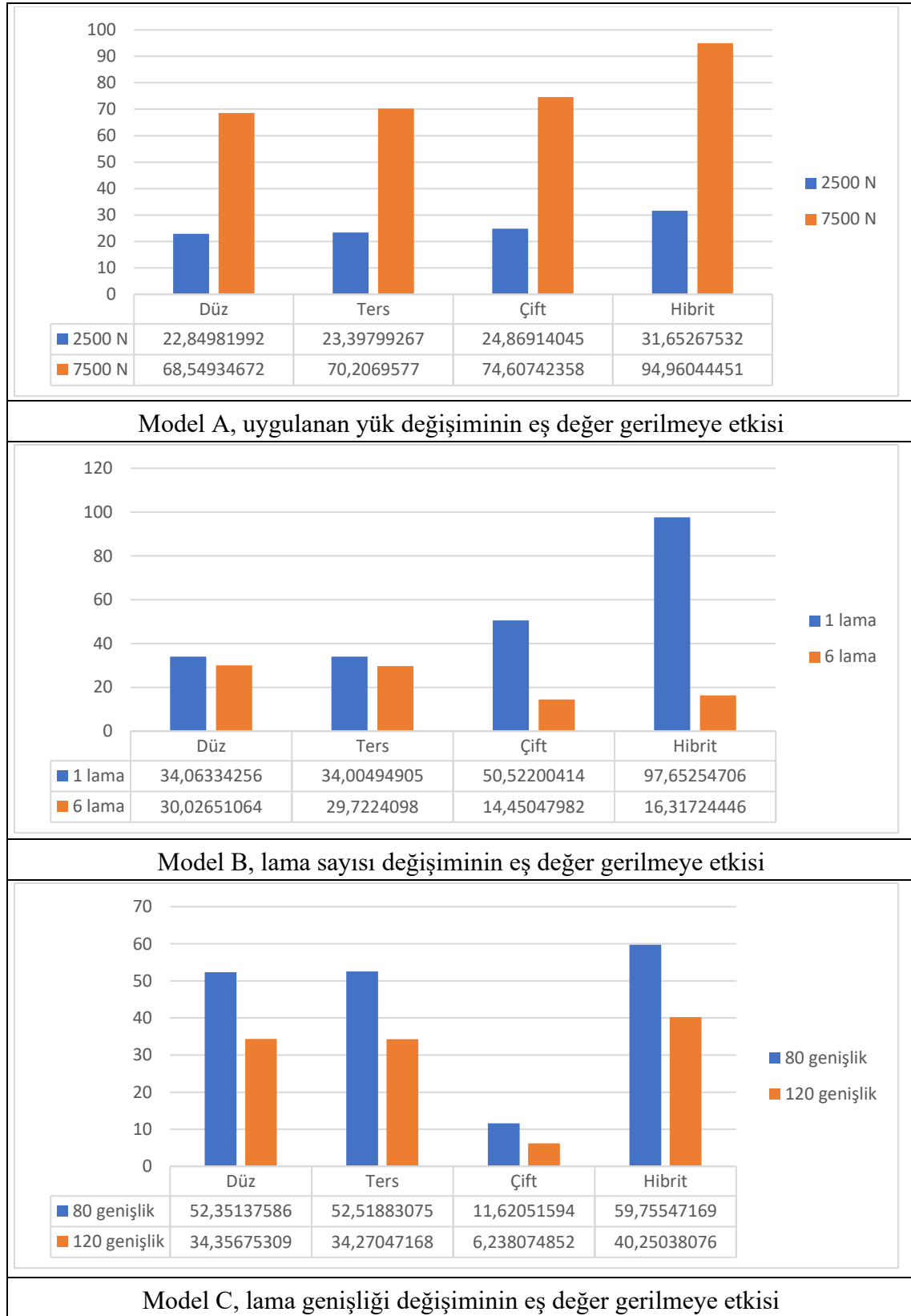
Oluşturulan ilk grafikte model A için uygulanan yük değişiminin eş değer gerilmeye etkisi gösterilmiştir. Uygulanan kuvvet miktarı arttıkça oluşan gerilmenin de aynı şekilde arttığı gözlenmiştir. En yüksek eş-değer gerilme oluşumunun kuvvet artışı ile birlikte, hibrit alt modeli üzerinde olduğu saptanmıştır. Diğer alt modeller için aralarında büyük farklar oluşmadığı gözlenmiştir. Uygulanan kuvvet büyüklüğü arttıkça aradaki farkın arttığı bütün yaprak yay modelleri için saptanmıştır.

İkinci grafikte Model B için lama sayısı değişiminin eş-değer gerilmeye etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda lama sayısı artması ile yaprak yay üzerinde oluşan gerilme miktarının azaldığı saptanmıştır. Azalmanın temel nedeni lama sayısı artması ile yaprak yay üzerine uygulanan kuvvetin daha fazla bölüşülmesi ve böylelikle oluşan gerilmenin azalmasıdır. En düşük eş-

değer gerilme miktarının lama sayısının artışına bağlı olarak bütün yaprak yay tasarımları için çift alt modeli üzerinde olduğu gözlenmiştir. 1 lamadan daha fazla lama sayısına sahip yaprak yay modelleri için oluşan eş-değer gerilme miktarı çift alt model haricinde birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Üçüncü grafikte model C için için lama genişliği değişiminin eş-değer gerilmeye etkisi incelenmiştir. Lama genişliğinin artması ile bütün alt modeller için oluşan eş-değer gerilme miktarının azaldığı saptanmıştır. En düşük gerilme miktarının bütün tasarımlar için çift alt modeli üzerinde olduğu saptanmıştır. Düz ve ters alt modelleri için gerilme oluşumu birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



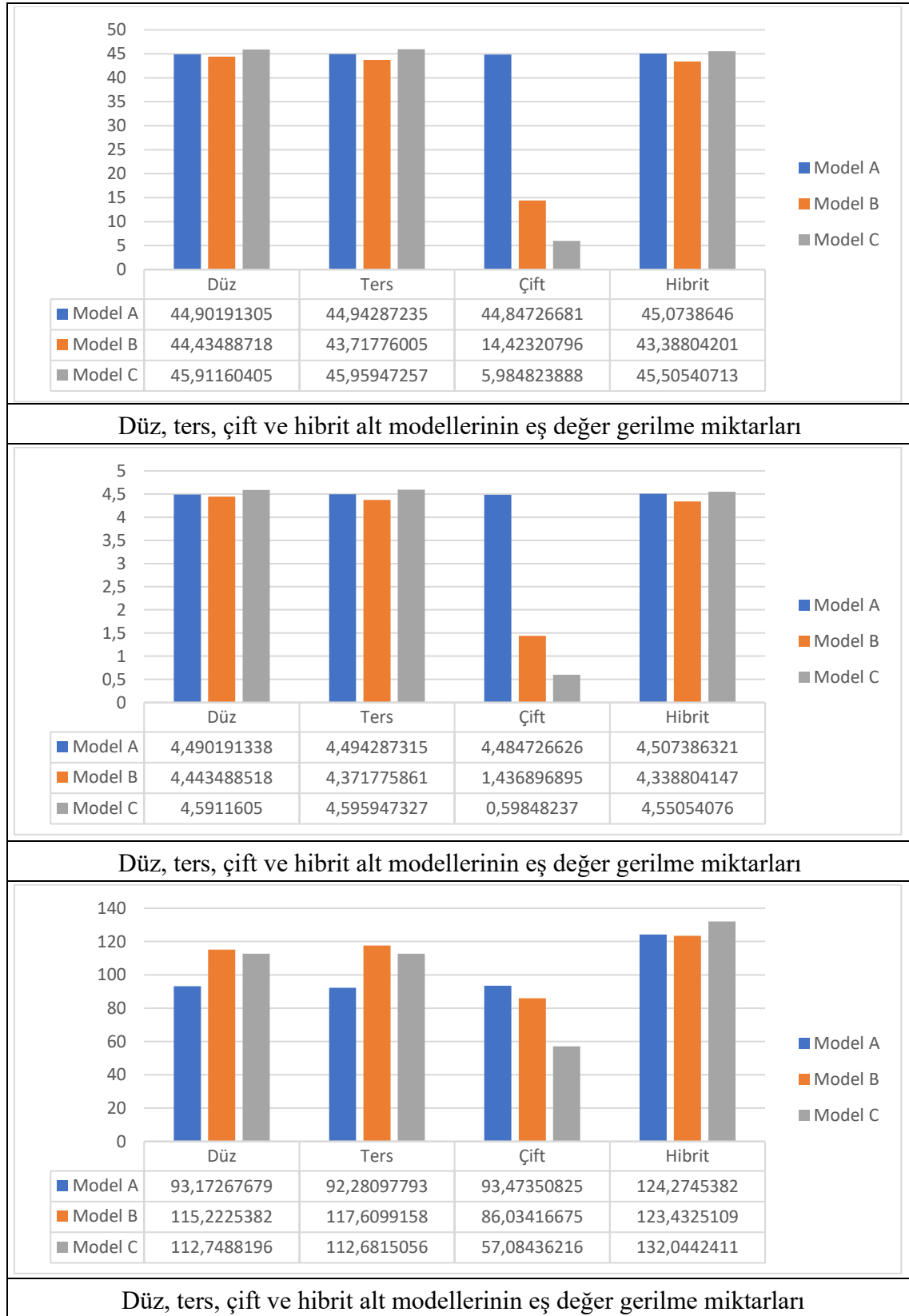


Şekil 5.40. Yaprak yay parametre değişimlerinin eş-değer gerilmeye etkisi

Eş değer gerilme oluşumunun ana modellere göre kıyaslanması için 3 farklı grafik oluşturulmuştur ve Şekil 5.41’de gösterilmiştir. Oluşturulan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Yapılan grafiklerde 4 alt model ve 3 ana model kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslanmalar sonucunda lama kalınlığı ve genişliğinin artması ile düz, ters ve hibrit alt modelleri ve ana modeller için eş- değer gerilme oluşumunun birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Çift alt modeli için en düşük gerilme oluşumunun model C üzerinde en yüksek gerilme oluşumun ise model A üzerinde olduğu saptanmıştır.





Şekil 5.41. Model A, B ve C eş-değer gerilme miktarına göre kıyaslanması

5.6.4. Normal gerilme

Normal gerilmenin yaprak yaylar üzerinde oluşumuna sebep olan temel etken eğilme gerilmesi olup normal gerilmenin yoğunlaştığı bölgeler eşit bir dağılım göstermesine karşın en çok göz unsurunun yakın bölgelerinde olduğu saptanmıştır.

Normal gerilmenin yaprak yayı tasarlarken kullanılan parametrelerin değişimine göre etkisini ölçmek için 3 farklı grafik Şekil 5.42’de gösterilmiştir. Grafikleri oluştururken kullanılan parametre değişimi değerleri Çizelge 5.16’da gösterilmiştir.

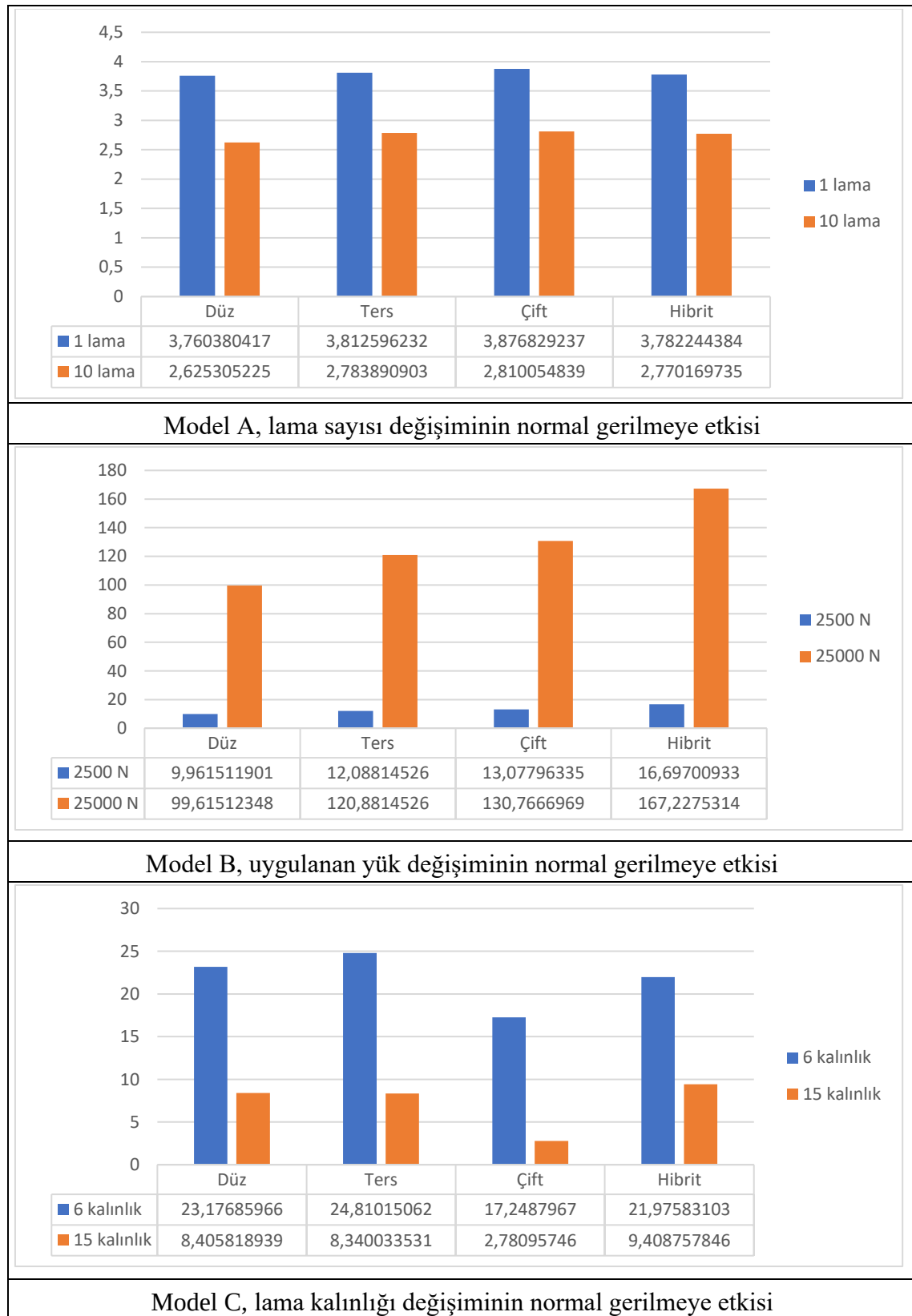
Çizelge 5.16. Normal gerilme grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	2500	değişken	60	15	LAMA SAYISI : 1-10
B	değişken	4	80	6	UYGULANAN YÜK: 2500-25000 N
C	7500	5	120	değişken	KALINLIK : 6-15 mm

Oluşturulan ilk grafik model A için Lama sayısı değişiminin normal gerilmeye etkisi gösterilmiştir. Lama sayısının artması ise yaprak yay üzerinde oluşan normal gerilme değerlerinin azaldığı saptanmıştır. 4 farklı alt model içinde aynı lama sayısına sahip bütün yaprak yay modelleri için benzer normal gerilme sonuçları elde edildiği saptanmıştır.

İkinci grafikte model B için uygulanan yükleme miktarının değişimin normal gerilmeye etkisi incelenmiştir. Uygulanan yük miktarı artması durumunda yaprak yay üzerinde oluşan normal gerilme miktarının arttığı saptanmıştır.

Üçüncü grafikte model C için lama kalınlığı değişiminin normal gerilmeye etkisi incelenmiştir. Lama kalınlığı artması durumunda bütün yaprak yay tasarımları için normal gerilme miktarının büyük ölçüde azaldığı saptanmıştır.

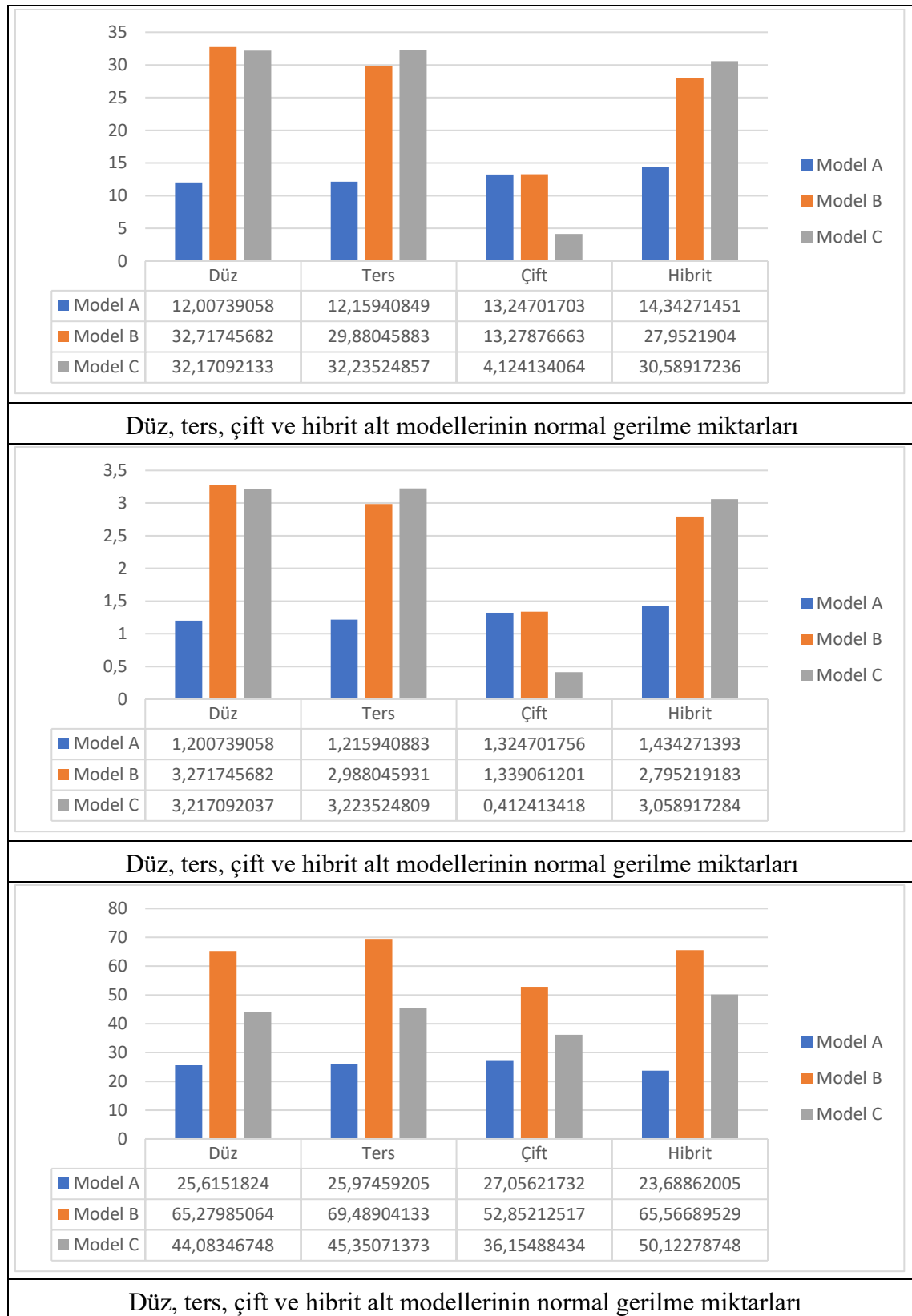


Şekil 5.42. Yaprak yay parametre değişimlerinin normal gerilmeye etkisi

Yaprak yaylar üzerinde oluşan normal gerilme değerlerinin ana modeller esas alınarak kıyaslanması için 3 farklı grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Normal gerilme açısından 3 ana model değerlendirildiğinde C modelinin en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir. C modeli A ve B modelinden farklı olarak tasarım şekli gereği 1 lama eksik olarak tasarlanmıştır. Eksik lama sayısına rağmen C modelinin üzerinde daha az normal gerilme olduğu gözlenmiştir. Alt modeller kendi içlerinde kıyaslandığında çift alt modeli üzerinde oluşan normal gerilme miktarının daha az olduğu gözlenmiştir.





Şekil 5.43. Model A, B ve C normal gerilme miktarına göre kıyaslanması

5.6.5. Eş-değer gerinim

Eş değer gerinim oluşumu en fazla eş değer gerilmede olduğu gibi yaprak yayın göz unsuruna yakın bölgelerde olduğu saptanmıştır. Eş değer gerinimin değişimin parametrelerin etkisinin anlaşılabilmesi için 3 farklı grafik Şekil 5.44’de gösterilmiştir. Grafikleri oluştururken kullanılan parametre değişimleri Çizelge 5.17’de gösterilmiştir.

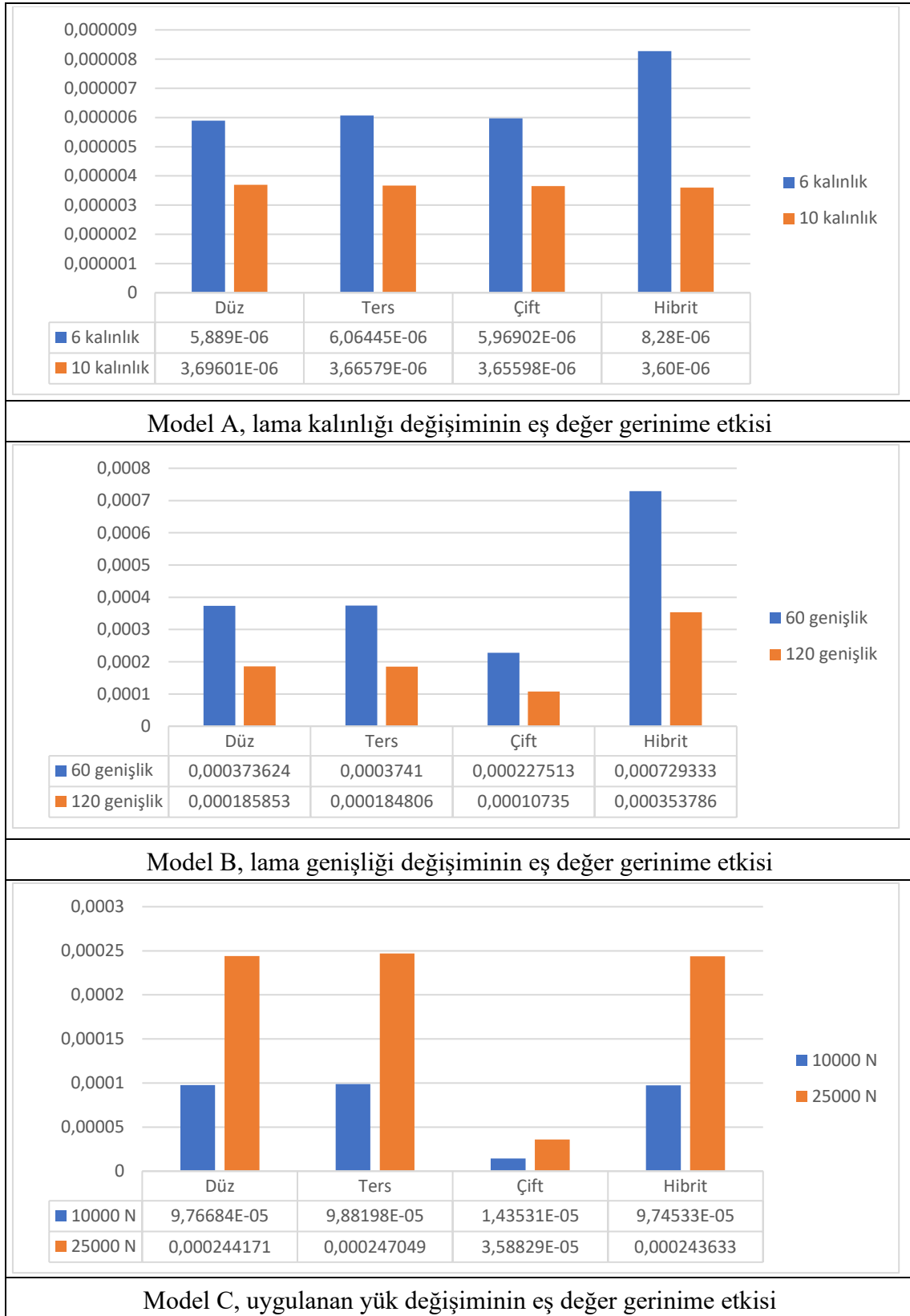
Çizelge 5.17. Eş-değer gerinim grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	100	6	60	değişken	KALINLIK: 6-10 mm
B	10000	4	değişken	10	GENİŞLİK: 60-120 mm
C	değişken	9	120	15	UYGULANAN YÜK: 10000-25000 N

İlk grafikte model A için lama kalınlığı değişimi sonucunda eş-değer gerinme miktarına olan etkisi gösterilmiştir. Bu doğrultuda uygulanan kalınlık arttıkça oluşan eş değer gerilme miktarında azaldığı saptanmıştır. Kalınlık değeri arttıkça oluşan eş-değer gerinmelerinde birbirine yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır.

İkinci grafikte model B için lama genişliği değişimin eş-değer gerinime etkisi incelenmiştir. Lama genişliği arttıkça oluşan eş-değer gerinim miktarının bütün modeller için azaldığı saptanmıştır.

Üçüncü grafikte model C için uygulanan yük değişimin eş-değer gerinime etkisi incelenmiştir. Uygulanan yük miktarı arttıkça oluşan eş-değer gerinmenin her yaprak yay modeli için arttığı saptanmıştır.

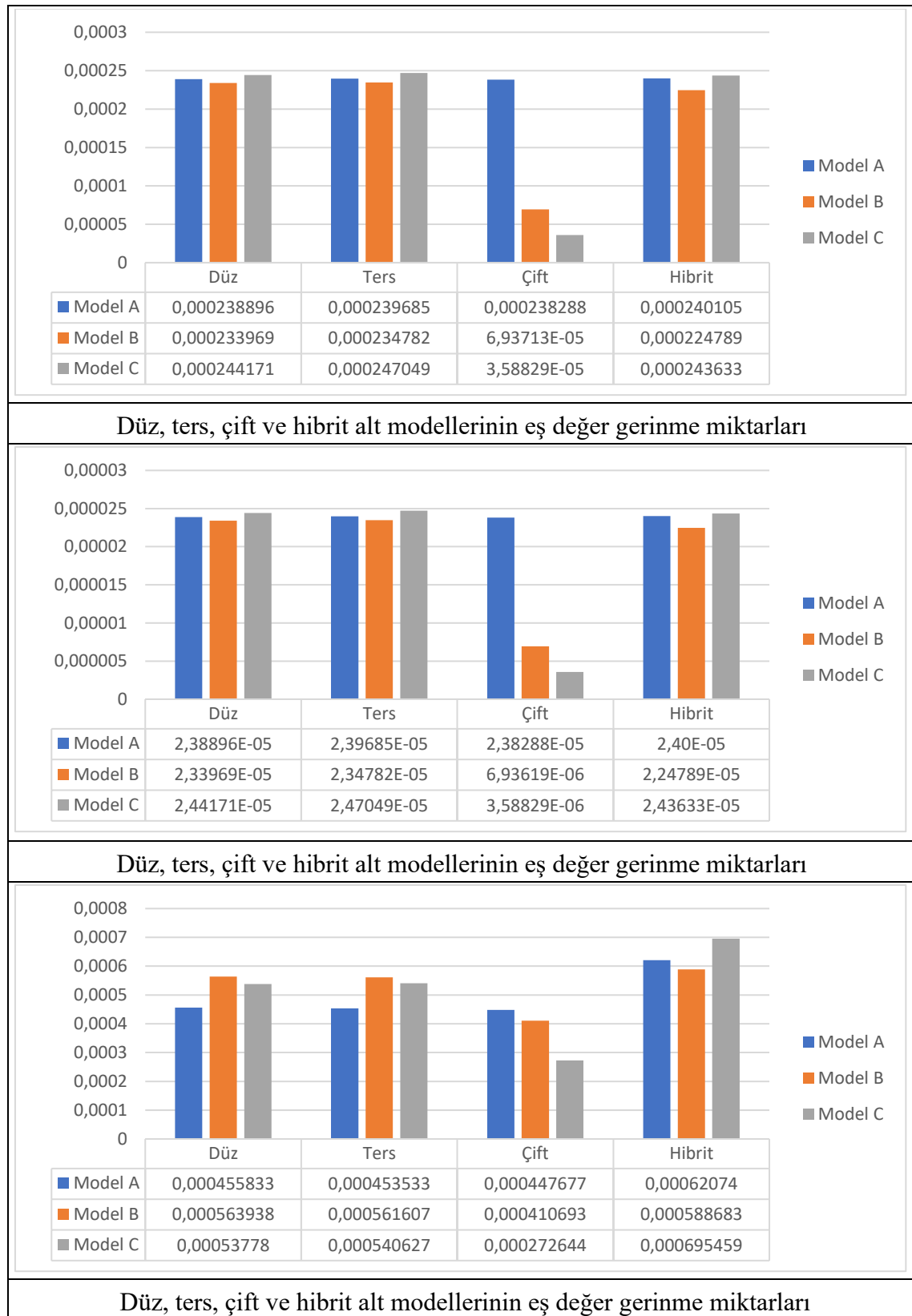


Şekil 5.44. Yaprak yay parametre değişimlerinin eş-değer gerinime etkisi

Oluşturulan 3 ana yaprak yay modeli üzerinde oluşan eş-değer gerilmenin kıyaslanması için 3 farklı örnek grafik oluşturulmuştur ve Şekil 5.45’de gösterilmiştir. Oluşturulan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Eş-değer gerinme bütün tasarımlar esas alınarak incelendiğinde en az C modelinin çift alt modelinde olduğu saptanmıştır. Alt modeller kıyaslandığı zaman en az eş-değer gerilmenin çift alt modelinde olduğu gözlenmiştir. Düz ve ters alt modelleri üzerinde oluşan eş-değer gerinme miktarları birbirlerine neredeyse aynı olacak şekilde sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Düz ve ters alt modellerinin benzer tasarımlara sahip olması bu durumu etkileyen temel etmendir.





Şekil 5.45. Model A, B ve C eş değer gerinme miktarına göre kıyaslanması

5.6.6. Normal gerinim

Normal gerinmenin yaprak yay üzerinde en yoğun olarak bulunduğu bölge yay gözüne yakın bölgelerde olduğu saptanmıştır. Normal gerinmenin yaprak yayı tasarlarken kullanılan parametre değişimlerine göre etkisinin anlaşılması için 3 adet örnek grafik Şekil 5.46'da gösterilmiştir. Hazırlanan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri Çizelge 5.18'de gösterilmiştir.

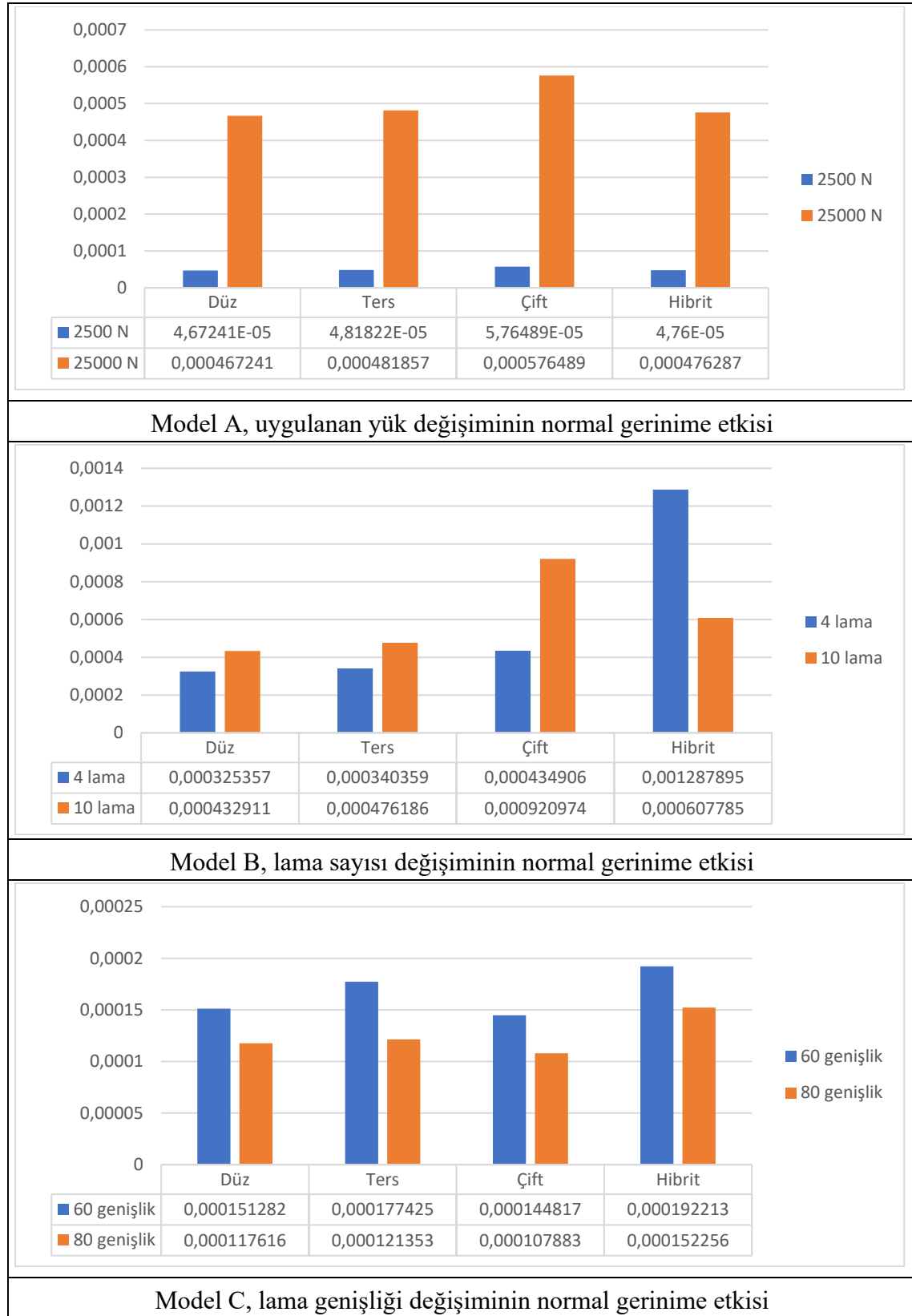
Çizelge 5.18. Normal gerinim grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	değişken	10	60	6	UYGULANAN YÜK: 2500-25000 N
B	25000	değişken	80	6	LAMA SAYISI : 4-10
C	7500	3	değişken	6	GENİŞLİK: 60-80 mm

Oluşturulan ilk grafikte model A için uygulanan yük değişiminin normal gerinime olan etkisi gösterilmiştir. Uygulanan yük değişiminin artması durumunda normal gerinim değerlerinin her yaprak yay modeli için büyük ölçüde arttığı gözlenmiştir.

İkinci grafikte model B için lama sayısı değişiminin normal gerinime etkisi incelenmiştir. Genel olarak hibrit model haricinde lama sayısı arttıkça normal gerinimin arttığı gözlenmiştir.

Üçüncü grafikte model C için lama genişliği artışının normal gerilmeye olan etkisi incelenmiştir. Her yaprak yay modeli için lama genişliği artması durumunda normal gerinimin azaldığı saptanmıştır. Genel olarak en yüksek normal gerinimin hibrit alt modelinde olduğu saptanmıştır.

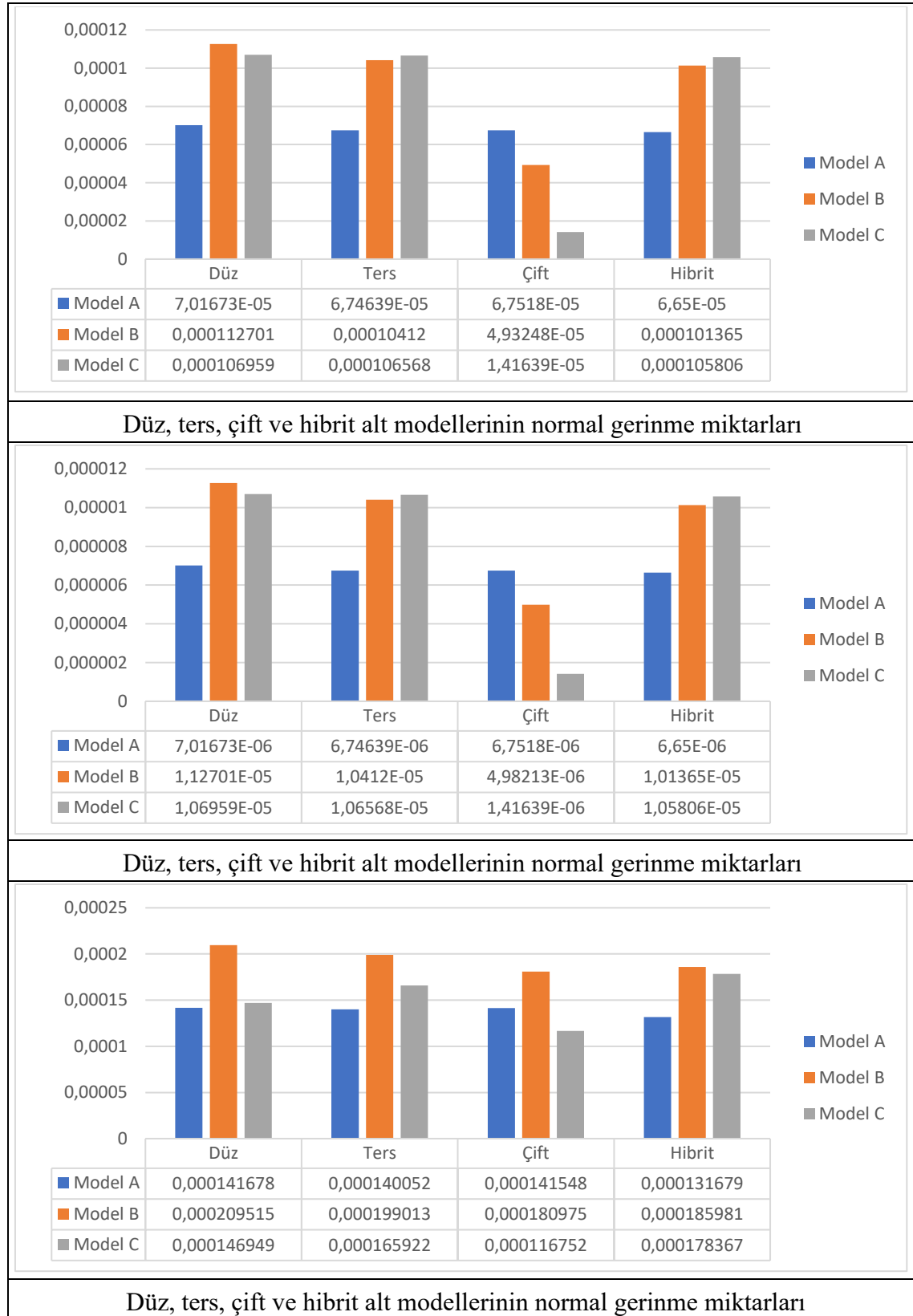


Şekil 5.46. Yaprak yay parametre değişimlerinin normal gerinime etkisi

Oluşturulan 3 ana yaprak modeli üzerinde normal gerinimin kıyaslanması için 3 farklı örnek grafik oluşturulmuştur ve şekil 5.47’de gösterilmiştir. Oluşturulan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Oluşturulan grafiklerde 3 ana model kıyaslandığı zamanda model C üzerinde en az normal gerinim olduğu gözlenmiştir. Model A üzerinde oluşan normal gerinim değerlerinde genel olarak bütün alt modeller için birbirine uzak olmayan değerler verdiği gözlenmiştir. Model B için ise alt modeller arasında büyük farklar olduğu gözlenmiştir. Alt modeller birbirleri ile kıyaslandığı zaman en az normal gerilme değerlerinin çift alt modelinde olduğu saptanmıştır.



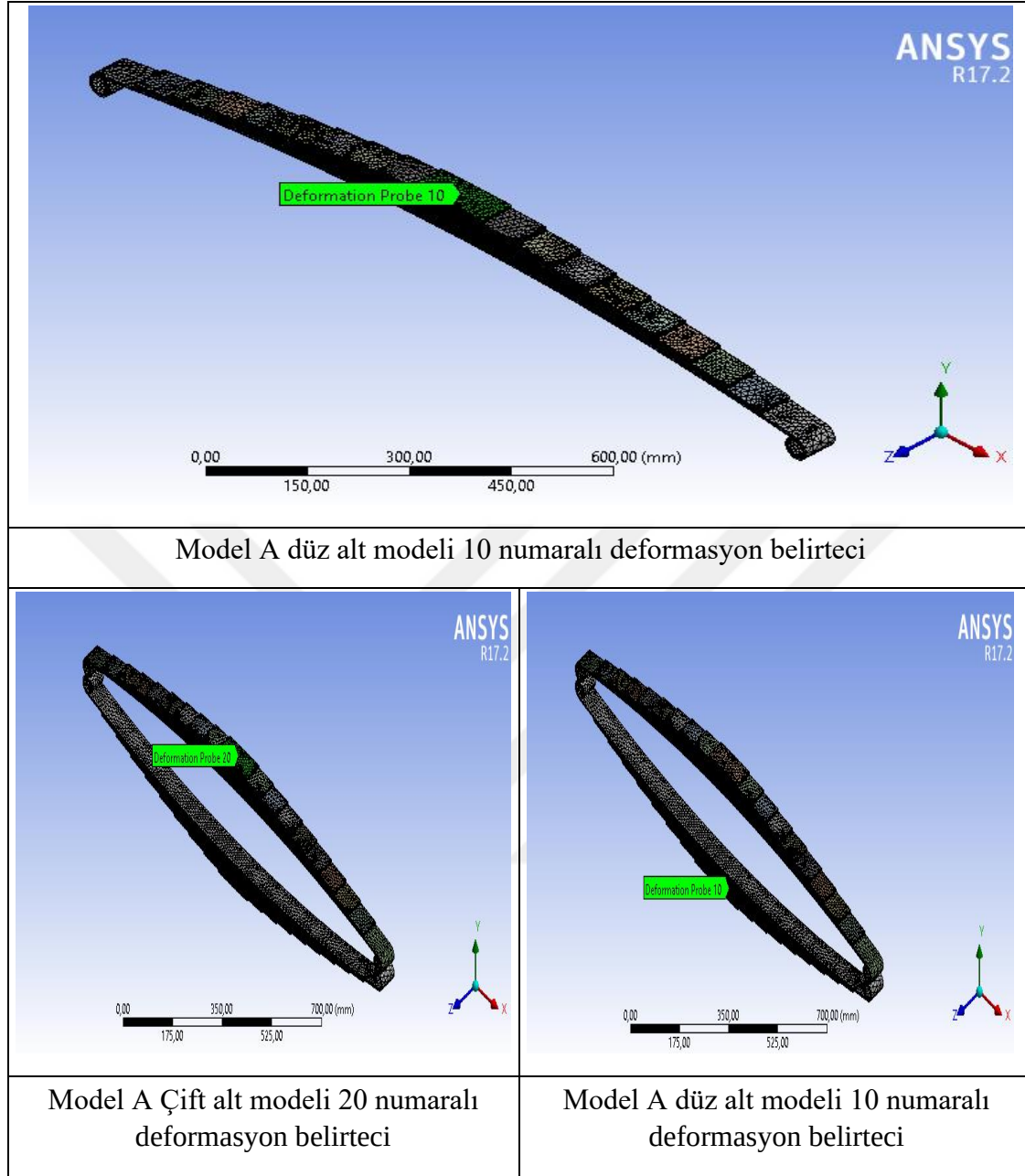


Şekil 5.47. Model A, B ve C normal gerinme miktarına göre kıyaslanması

5.7. Yay Sabiti

(K) yani yay sabiti temel olarak yaylar hakkında bir oranlama vermektedir. Yay üzerine uygulanan yük sonucu oluşan deformasyon miktarının çarpılması sonucu elde edilir. Yay sabitinin bulunması ile elde edilen değer temel bir oran olduğu için yay sabitinin bulunmasına kıyasla yay sabiti üzerinde oluşan değişim yaprak yay tasarımı için daha önemli fikirler vermektedir. Temel olarak bakıldığında yay sabitin ve gerilme arasında ters bir bağlantı bulunmaktadır. Yay sabiti arttığı zaman yaprak yay üzerinde oluşan gerilme miktarı azalmaktadır. Bu nedenle yapılan tasarımlarda yay sabitini arttıran durumların tasarım parametrelerinde kullanılması doğru yaprak yay tasarımı için önem arz etmektedir.

Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda her model ve her alt model için belirlenen farklı yükler altında oluşan K değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. K değerlerinin bulunması için sisteme uygulanan kuvvet sonucu oluşan şekil değişimin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle her alt modelde bulunan yay lamalarının üst yüzeylerine Y yönünde oluşan iekil değişimin hesaplanması için belirteçler (probe) atanmıştır Şekil 5.48’de gösterilmiştir. Her lamada oluşan K değerlerinin (Bkz. “Eş. 4.31”) gösterildiği gibi birleştirilerek hesaplanması ile her alt model için bir eşdeğer yay sabiti bulunmuştur. Düz ve ters alt modelleri tek yaprak yaydan oluştuğu için eşdeğer yay sabiti (Bkz. “Eş. 4.32”) kullanılarak bulunmuştur. Çift ve hibrit model alt ve üstte 2 farklı yaprak yayın birleşmesi ile oluşturulduğu için her yaprak yay (alt ve üst) için ayrı ayrı eşdeğer yay sabiti bulunmuş ve bu değerlerin oranlanması ile sistemin toplam eşdeğer sabiti bulunmuştur.



Şekil 5.48. Yaprak yay modelleri deformasyon belirteçlerinin yerleri

Yay sabiti yaprak üzerine uygulanan yük sonucu oluşan deformasyon ile uygulanan yük arasındaki bağlantıyı veren bir orandır. Yay sabiti, yaprak yayı tasarlarken kullanılan tasarım parametrelerinin değişimine göre etkilenmektedir. Bu değişimin temel nedeni yaprak yay tasarım parametrelerinin değişmesiyle yay üzerinde oluşan deformasyon miktarının artması veya azalması durumundan kaynaklıdır. Yay sabiti değişimi etkileyen parametrelerin etkisinin gösterilmesi için 3 adet örnek grafik hazırlanmıştır (Şekil 5.49). Hazırlanan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri Çizelge 5.19’da gösterilmiştir.

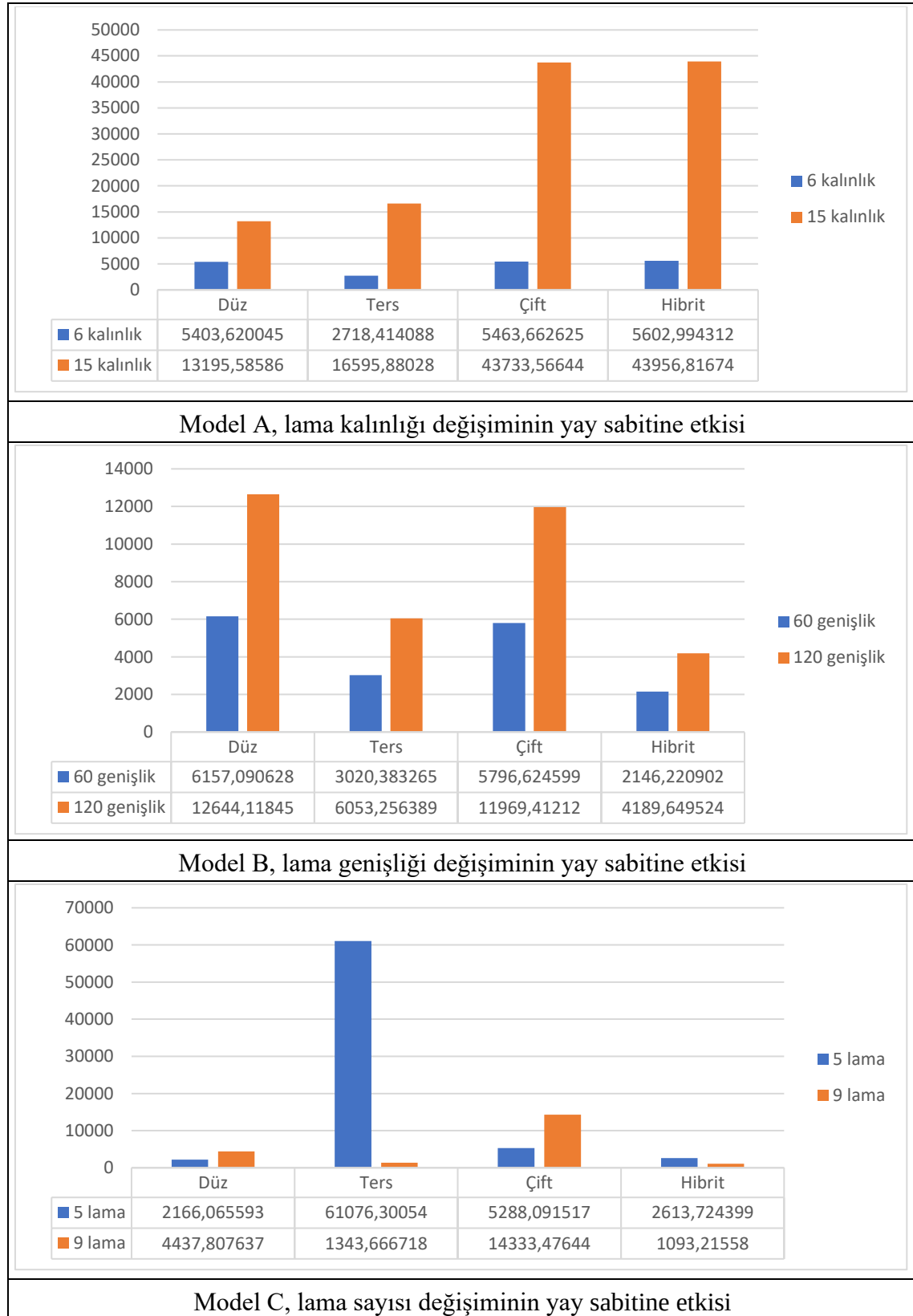
Çizelge 5.19. Yay sabiti grafiklerinin tasarım parametreleri

SABİTLER					ETKİSİ ÖLÇÜLEN PARAMETRE
ANA MODEL	YÜK	LAMA S.	GENİŞLİK	KALINLIK	DEĞİŞKENLER
A	25000	10	120	değişken	KALINLIK: 6-15 mm
B	10000	6	değişken	6	GENİŞLİK : 60-120 mm
C	25000	değişken	60	6	LAMA SAYISI: 5-9

İlk grafikte model A için lama kalınlığı değişiminin yay sabitine etkisi incelenmiştir. Lama kalınlığının artması ile tasarımı yapılan her yaprak yay modelinin yay sabiti değerlerinin büyük oranda arttığı gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni kalınlık artışı ile lama üzerinde oluşan deformasyon miktarının azalmasıdır.

İkinci grafikte model B için lama genişliği değişiminin yay sabitine etkisi incelenmiştir. Lama genişliğinin artması ile tasarımı yapılan her yaprak yay modelinin yay sabitinin kalınlık artışında olduğu gibi arttığı gözlenmiştir. Artışın temel nedeni lama genişliği artışı ile yaprak yay üzerinde oluşan deformasyon miktarının azalmasıdır.

Üçüncü grafikte Model C için lama sayısı değişiminin yay sabitine etkisi incelenmiştir. Lama sayısının artması alt modellere göre farklılık göstermesine rağmen çift alt modeli için yay sabitinin arttığı diğer modeller için ise değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.49. Yaprak yay parametre değişimlerinin yay sabitine etkisi

Oluşturulan 3 ana yaprak modeli üzerinde yay sabiti değerlerinin kıyaslanması için 3 farklı örnek grafik oluşturulmuştur (Şekil 5.50). Oluşturulan grafikler için belirlenen tasarım parametreleri (Bkz. Çizelge 5.13) gösterilmiştir.

Oluşturulan grafiklerde 3 ana model kıyaslandığı zaman C modelinin genel olarak aynı tasarım şartları altında iken daha yüksek yay sabiti değerleri verdiği gözlenmiştir. Alt modeller arasında kıyaslanma yapıldığı zaman genel olarak Çift alt modeli aynı tasarım şartları altındayken daha yüksek yay sabiti sonuçları verdiği gözlenmiştir.

Oluşturulan grafiklerde 3 ana model kıyaslandığı zamanda model C üzerinde en az normal gerinim olduğu gözlenmiştir. Model A üzerinde oluşan normal gerinim değerlerinde genel olarak bütün alt modeller için birbirine uzak olmayan değerler verdiği gözlenmiştir. Model B için ise alt modeller arasında büyük farklar olduğu gözlenmiştir. Alt modeller birbirleri ile kıyaslandığı zaman en az normal gerilme değerlerinin çift alt modelinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.50. Model A, B ve C yay sabiti değerlerine göre kıyaslanması

6. YAPAY SINİR AĞLARI

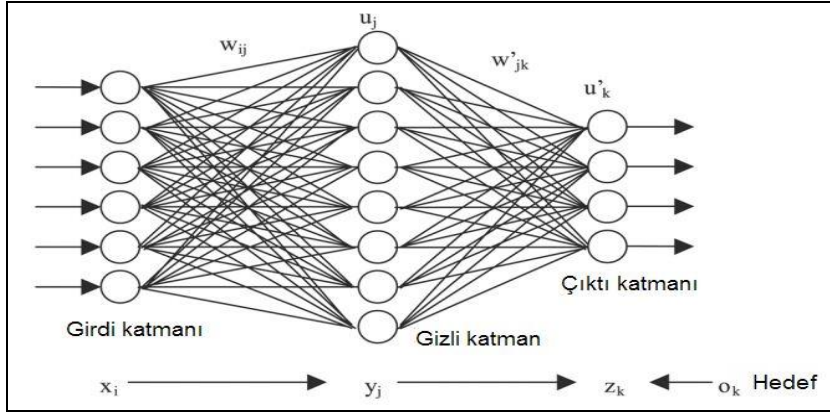
Yapay sinir ağı, yapay zekanın bir alt koludur. Temel olarak yapay sinir ağı yöntemi beynin öğrenme ve öğrendiği girdilerine göre sonuç oluşturabilme yeteneklerini taklit eden bir algoritmadır. Bağlantılı ağılar, paralel dağılmış ağılar, nöromorfik sistemler olarak da isimlendirilmektedir. Birçok farklı türü olmasına karşın en çok geri yayımlı yapay sinir ağı kullanılmaktadır. Yapay sinir ağı geliştirilirken beyin yapısından esinlenildiği için çoğu terim sinir bilimden alınmıştır. Denetim, sistem modelleme, ses ve el yazısı tanıma, işaret tanıma, meteorolojik yorumlama ve mühendislik gibi alanlarda sıkça kullanılır. İnsan beyninin öğrenme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon gibi özelliklerini gerçekleştiren bir algoritmadır. Yapay sinir ağı yöntemini diğer bilgisayar algoritmalarından ayıran temel özellik öğrenebilme yeteneği ve bilgileri bir veri tabanında tutmak yerine ağı oluşturan bağların içinde tutmaktır. Yapay sinir ağı yönteminde tıpkı beyinde olduğu gibi bilgiler paralel işlenmektedir. Paralel işleme ile birbirinden bağımsız değişkenler işlenebilmektedir. Diğer algoritma türlerinden istenilen veriye ulaşmak için belirli bir işlem sırası takip edilirken yapay sinir ağlarında paralel işleme yeteneği ile bu durum farklılaşmaktadır. Aynı zamanda belirli bir işlem sırası takip edilmediği için bir bölümde oluşan hata bütün çıktı değerlerini etkilememekte yalnızca hata olan bölümü etkilemektedir. Paralel işleme yeteneği ile birlikte ve veya ve değil gibi mantıksal sınamalar kullanılarak diğer algoritmalarından farklı sonuçlar yapay sinir ağlarının kullanımı ile elde edilebilmektedir [76 - 78].

Yapay sinir ağlarında en temel bileşen olan düğümler istenilen sonuçlara ulaşılması için 4 temel mekanizmayı takip edilmektedir. Bunlar: giriş, ağırlık, toplama işlevi ve etkinlik işlevidir. Bu 4 temel işlevin yerine getirilmesi için öncelikle yapay sinir ağlarının öğrenme işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Öğrenme işleminin gerçekleşmesi için öncelikle örnek olay ağı tanıtır bu duruma ağı için eğitim seti tanımlanması denilmektedir. Tanıtma işleminin başarısı yapay sinir ağlarının istenilen sonuçlara başarı ile ulaşmasını sağlayan temel kıstastır. Ağı kendine tanıtılan bütün örnek olaylara doğru cevap veriyorsa öğrenme işlemi tamamlanır. Öğrenme işleminin başarılı şekilde tamamlanmaması durumunda eğitim işlemi doğru öğrenme oluşana kadar devam eder. Öğrenme işleminin doğru tamamlanmasının ardından yapay sinir ağına daha önce görmediği bir örnek gösterilir eğer

ağ kabul edilebilir bir doğruluk oranında veriler sağlıyorsa ağın performansının iyi olduğu kabul edilir [78 - 80].

Yapay sinir ağlarının birbirine paralel olarak bulunan hücreler ile oluşumu gerçekleşmektedir. Hücrelerin birleştirilmesi ile katman adı verilen unsurlar elde edilir. Aynı katmanda bulunan hücreler çok karışık problemler haricinde birbirleri bağ oluşturmaz. Hücreler yalnızca kendinden bir sonra ki katmanda bulunan hücreler ile bağ oluşturması sağlanır aynı zamanda her hücreden yalnızca bir çıktı değeri elde edilir. Bu çıktı değeri bir sonraki katmandaki hücrelere ulaşıncaya farklı bir değer alabilmektedir. Katmanlar giriş, çıkış ve gizli katmanlar olarak farklı türlerde bulunmaktadır. 3 farklı katman birbirlerine katmanlar arası bağlantı denilen bağlayıcı unsurlar ile birleştirilir. Toplamda 5 farklı katmanlar arası bağlantı bulunmaktadır. Bunlar: Rezonans, çift yönlü, hiyerarşik, kısmi bağlantılı, tam bağlantılı ve ileri beslemedir. Bağlantı türleri arasındaki temel fark katmanlarda bulunan hücrelerin birbirleri ile bağlantı şekillerine göre değişmektedir. Katmanlar arası bağlar aynı zamanda bir katsayı görevi görmekte ve doğru sonucun bulunması için kritik önem arz etmektedir. Ağ öğrenmesi işleminde temel olarak bu katsayıların doğruluğunu bulmak amaçlanır [78, 80, 81].

Yapay sinir ağlarında işlem prosedürüne ilk olarak girdi değerlerinin ağ yapısına sunulması ile başlanır. Girdi değerleri gizli katmanlara iletilir ve istenilen çıktı değeri doğruysa yapay sinir ağı görevini tamamlamış olur. Bu prosedürün gerçekleşmesi için yani doğru çıktı değerinin bulunması için öğrenme işleminin doğru olması gerekmektedir. Öğrenme işlemi temel olarak katmanlar arası katsayıların doğru belirlenmesi ile gerçekleşir Katsayıların belirlenmesi için öncelikle rastgele küçük bir değer atanır ve atanan değer doğru olmaması durumunda kat sayı artırılması veya gizli katman sayısının artırılarak doğru sonuç bulunana kadar devam edilir. Doğru katsayı belirlendikten sonra hücredeki değer ile çarpılarak bulunan değer bir sonraki katmana gönderilir. Atanan başlangıç katsayılarının -1 ile 0,1 arasında olması daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Doğru; katsayı, katman sayısı gibi parametrelerin bulunmasının ardından yeni bir örnek yapay sinir ağına sunulur ve bu doğrultuda istenilen çıktı değerlerine ulaşılır [77, 78, 80].



Şekil 6.1. Yapay sinir ağı modeli örnek gösterimi

6.1. Yapay Sinir Ağı Modelleme Sonuçları

Parametrik sonlu elemanlar analizi ile Model A için için 3 farklı geometrik dizayna sahip konvansiyonel yaprak yay tasarımı yapılmıştır ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Her yaprak yay tasarımı 45 alt modele indirgenerek toplamda 135 parametrik model oluşturulmuştur.

Model A Düz	
Model A Ters	
Model A Düz ve Ters	

Şekil 6.2. Yaprak yay modelleri (Düz, Ters ve Çift (düz ve ters))

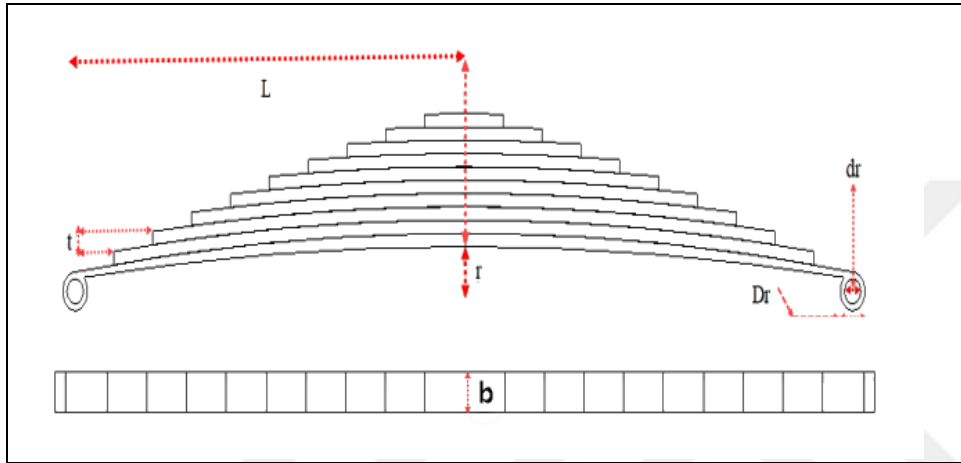
Yay tasarımı için boyutlandırmaları Uzel ticaret ve sanayi limited şirketi tarafından çıkarılmış olan Uzel yayları kataloğundan alınmıştır. Bu boyutlandırmalar; yay gözü iç çapı, ana lamanın uzunluğu, yay genişlik parametreleri, yay kalınlığı, yay lama sayısı ve kavis uzunluklarıdır. Oluşturulan parametrik modeller ve tasarım ölçüleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir

Çizelge 6.1 Parametrik yaprak yay tasarım parametreleri

Model tipi	Lama kat sayısı	Lama uzunluğu (mm)	Lama kesit kalınlığı t (mm)	Lama kesit yüksekliği b (mm)	Yay kavis yarıçapı (mm)	Kuvvet (N)
Düz	1	72.5	6	60	76-82-85-88-90-94-100-106-110-112-115-118-120-124-130-140-150-145-160-175-190-205	100 2500 7500 10000 25000
		145				
		217.5				
		290				
		362.5				
Ters	4	435	10	80		
	6	507.5	15	120		
	8	580				
	10	652.5				
Düz ve Ters (Çift)		725				

Düz ve ters alt modeli toplamda 10 lamadan oluşmakta ve çift alt modeli ise 20 kat lamadan oluşmaktadır . Diğer bütün parametreler her 3 model için aynı olup bunlar; yaprak yayın göz iç çapı (dr) katalogdan alınmıştır ve her model için 30 mm çapındadır. Göz dış çapı (Dr) ise yaprak yayın kalınlık değerlerine göre değişmekte ve 42-60 mm arasında değerler almaktadır. Lama kalınlığı 6-15 arasında değişmektedir. Lama genişliği (W) 60-120 mm arasında değişmektedir. Lama kavis uzunlukları (r) her model için farklı olmakla birlikte

model 1 için lama kavis değerleri 70- 205 mm arasındadır. Ters alt modeli için lama kavis değerleri 205-70 mm arasındadır. Çift alt modeli için kavis değerleri 70-205 arasındadır. Bütün kavis değerleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Ana lamanın uzunluğu 725mm olup katalogdan alınmıştır. Diğer lama boylarının uzunluğu (L), R. B. Charde ve Dr. D.V. Bhope’nin çalışmalarına göre hesaplanmıştır (Eş. 14.1) Lama boyları her 3 model için ayrı ayrı hesaplanmış ve Çizelge 6.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Yaprak yay lama sayılarına bağlı parametrelerin gösterimi

$$L_{i\ net} = i \frac{L}{n} \quad (14.1)$$

Katman sayısına bağlı olarak yaprak yay boyutları Eşitlik 6.1’e göre hesaplanmış ve parametrik modeller için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan yaprak yay boyutları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Model tipi ve katman sayısına bağlı yay lama uzunlukları

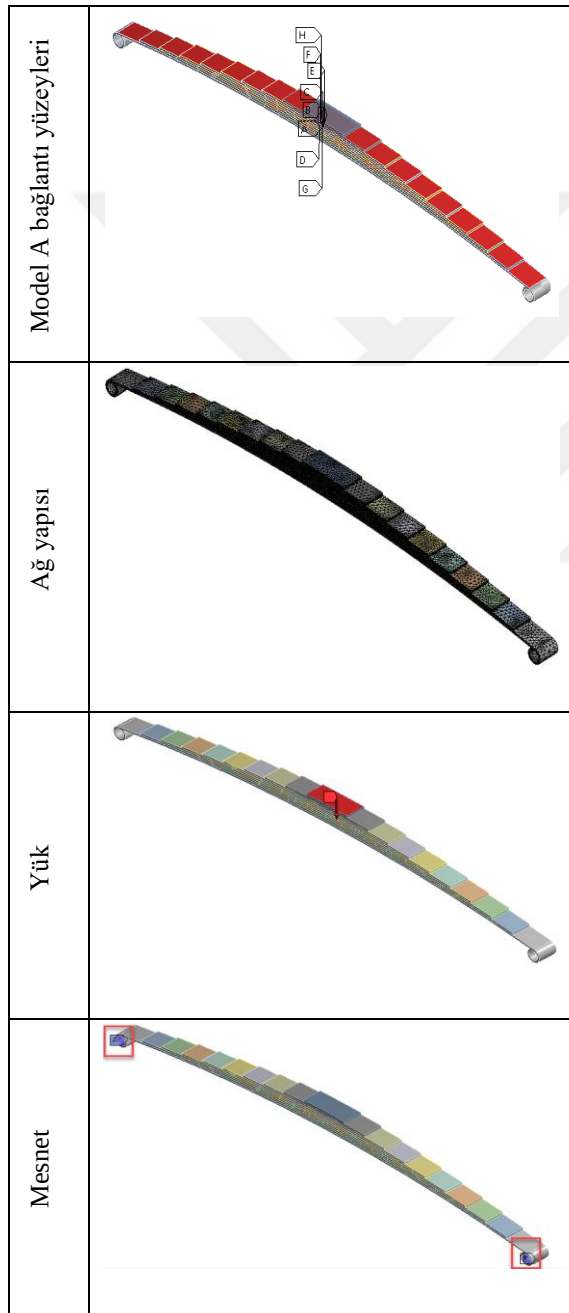
Model A Lama uzunlukları		Model B Lama Uzunlukları		Model C Lama Uzunlukları		
Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Lama uzunluğu (mm)
1	72,5	1	725	1	72,5	725
2	145	2	652,5	2	145	652,5
3	217,5	3	580	3	217,5	580
4	290	4	507,5	4	290	507,5
5	362,5	5	435	5	362,5	435
6	435	6	362,5	6	435	362,5
7	507,5	7	290	7	507,5	290
8	580	8	217,5	8	580	217,5
9	652,5	9	145	9	652,5	145
10	725	10	72,5	10	725	72,5

6.2. Yaprak Yayların Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi ve Analizi

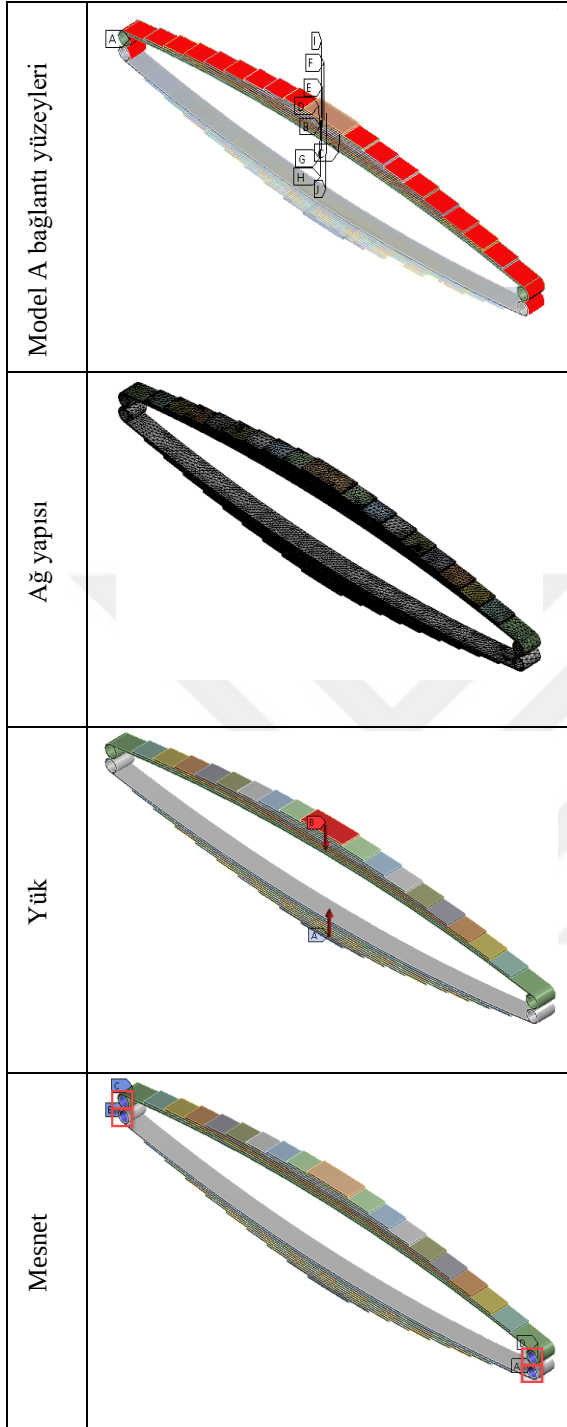
Oluşturulan yaprak yay modelleri sonlu elemanlar analizi için gerekli olan sınır şartları Ansys 17.2 programı kullanılarak tanımlanmıştır. Bunlar; uygulanan yük, mesnetler, ağ yapısı ve bağlantı tanımlamalarıdır. Her model için ayrı ayrı Şekil 6.4- 6.6 ‘da gösterilmiştir.

Her 3 tasarımda, lamaların birbirine yüzeylerinden birbirlerine temas ettiği tasarlanmıştır ve böylelikle uygulanan kuvvetin her lamaya aktarımı sağlanmıştır. Model 3 için bağlı yüzeylere ekstra olarak gözlerin dış yüzeyinden birleştirilmiş, böylelikle çift kademeli yaprak yayın birbirine bağlantısı sağlanmıştır. Düz alt model ve ters alt model yaprak yayların en dış katmanının üst yüzeyine 100, 2500, 7500, 10000 ve 25000 N kuvvet uygulanmıştır. Çift alt model için ise en dış 2 yüzeyine olacak şekilde eş büyüklükte 100,

2500, 7500, 10000 ve 25000 N kuvvet uygulanmıştır. Yaprak yaylar her 3 tasarımda da göz kısımlarında sabit mesnet kullanılmıştır. 3 modelde yay lamaları Tetrahedrons ağ yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Kritik bölgeler ve geometrik süreksizliklerin olduğu bölgelerde ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Yay gözlerinin iç ve dış kısımları, Lamaların birbirlerine temas ettikleri yüzeyler ile ana lamanın dış kısımlarında ağ sıklaştırılması yapılmıştır. Yükleme koşulları ve sınır şartları Şekil 6.4- 6.6 'da verilmiştir.



Şekil 6.4. Düz alt model bağlantı, mesnet, ağ yapısı ve yükleme gösterimi



Şekil 6.6. Çift alt model bağlantı, mesnet, ağ yapısı ve yükleme gösterimi

6.3. Yaprak Yayların Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

Yapay sinir ağları, yapay zeka tekniklerinden bir tanesidir. İnsan beynini simülasyon ederek, aynı insanın öğrenme becerilerini bilgisayar teknikleri ile insan beyninin yaptığı öğrenme ve tahmin işlemlerini yerine getirir. Bu modelin arkasında derin bir matematik vardır. Günümüz

teknolojisinde birçok bilim alanında uygulaması mevcuttur. Modelin geliştirilmesi için gerekli olan veri setinin belirlenmesi ve bu veri setindeki verilerin girdi ve çıktı olarak tasnif edilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirmek için problemlerin bir parametreye bağlanması yani girdi değerlerine karşılık gelen çıktı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Girdi ve çıktı değerleri için ya deneysel çalışmaların yapılması ya da mühendislik yaklaşımı ile bir hesaplamalarının elde edilmesi gerekir. Bu çalışmada; 3 farklı tasarım ana modeline göre, yaprak yay katman sayısı, yay boyları, yay kat yüksekliği, yay genişliği ve uygulanan kuvvetler girdi parametresi alınarak Yapay Sinir ağı modeli geliştirilmiştir. 52 sütunlu girdi ve 10 sütunlu çıktı değerlerini kapsayan toplamda 10800 satırlık veri ile bir öğrenme modeli geliştirilmiştir. 51 sütunlu veri setinde, yay model tipi (Düz, Ters ve Düz + Ters) yaprak yay katmanları parametrik model boyutları (kat sayısı, katman kalınlığı, katman yüksekliği, yay kavis yarıçapı vb. değerler her katman için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Çıktı parametreleri için maksimum deformasyon, defleksiyon, von mises, normal gerilme, von-mises ve normal gerinim, yay sabiti (çok katmanlı olanlardaki her katman için yay sabiti) değerleri modellenmiştir. Bu amaçla veri seti kullanılarak Matlab ortamında bir kod yazılarak birçok farklı model denemesi gerçekleştirilmiş ve bu modellerin performansları istatistiksel olarak yazılım üzerinden hesap ettirilmiştir. Daha sonra Matlab’ dan elde edilen sonuçlar ile; SEA sonuçlarının regresyonları kontrol edilerek en iyi performansı sağlayan model Yapay Sinir Ağı Modeli belirlenmiştir.

Yapay sinir ağları, yapay zekanın bir alt kolu olup, insan beyninin öğrenme modelini esas alarak bir öğrenme ve öğrenme sonunda bir sonuç çıkartma ilişkisi ile çalışmaktadır. Bu metot birçok sosyal ve mühendislik problemlerine daha hızlı ve kolay yoldan çözüm ortaya koymaktadır. Özellikle lineer olmayan sonuçların daha kolay ve hızlı bir yöntemle çözümünü gerçekleştirebilmektedir. Bu metot genel olarak girdilere karşılık bir çıktı değerleri oluşturmaktadır. En basit manası ile: Girdiler, İşlem, Çıktılar biçiminde model tanımlanabilir. Modelin girdiler kısmında deney sonuçlarını etkileyen parametreler girdi olarak modelde tanımlanır. Bu girdilere karşılık çıktıları elde edebilmek için İşlem basamağında yoğun matematik barındıran bir kara kutu (black box) bulunur. İşlem basamağı, gizli katmanlar ve aktivasyon fonksiyonlarından oluşur. Aktivasyon fonksiyonları probleme göre farklılıklar gösterebilir ve doğru aktivasyon fonksiyonunu belirleyebilmek için birçok iteratif işlem yapılması gerekmektedir. ANN ana mimarisinde; tansig, tribas, hardlim, logsig, purelin vb. farklı matematiksel fonksiyonlar kullanılabilir. Ayrıca bu gizli katmanların sahip oldukları nöron sayıları da modelin etkili sonuç

vermesinde etkisi büyüktür. Kısaca yalnızca doğru aktivasyon fonksiyonunu belirlemek, doğru modeli belirlemeye yetmez, bunun yanında her bir gizli katmanın nöron sayısını da doğru belirlemek gerekmektedir. Aktivasyon fonksiyonunun ve nöron sayılarının belirlenmesinin yanı sıra; öğrenme fonksiyonunun belirlenmesi de büyük önem arz etmektedir. Yapay Sinir Ağları yönteminde birçok farklı öğrenme metodu bulunmaktadır; trainbr, trainbuwb, trainc, trainb, trainbfg, trainbfgc, trainlm vb. Bu fonksiyonlar içinde genel mühendislik problemlerinde en hızlı çözümün gerçekleştiği trainlm fonksiyonu öne çıkmaktadır. Hem doğruluk hem de hız bakımından trainlm öğrenme algoritması büyük bir avantaja sahiptir. Bu algoritma; Trainlm (Levenberg-Marquardt) back-propagation (BP) metodunu içermekte ve Levenberg-Marquardt matematiksel yaklaşımını kullanmaktadır.

Yapay Sinir Ağı Modelini oluşturmak için Trainlm Öğrenme Algoritmasının yanı sıra Tansig+Logsig + Purelin aktivasyon fonksiyonlarının ve nöron sayılarının iterasyonları denenmiş ve performansı en yüksek olan model gerek öğrenme gerek tahmin ve de gerek validasyon için en iyi sonucu veren model belirlenmiştir. Bu işlem için Matlab yazılımında bir kod hazırlanmış ve bu kodda, tansig ve logsig fonksiyonlarının katmanlarının öncelikleri ve nöron sayıları bir algoritmaya göre değiştirilerek sonuçlar elde edilmiş daha sonrasında regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizine göre en iyi performansı sağlayan modelin sonuçları ile ANSYS sonuçları değerleri birbirleri ile sayısal tutarlılıkları kontrol edilmiş en iyi model belirlenmiştir. Algoritma oluşturulurken katman sayısı 2'den 5'e kadar iterasyon yapılmış, n-1 ci katmanın hep purelin olduğu belirlenmiştir. Yani 2 katmanlı bir sistemde ya: Tansig+ Purelin ya da Logsig+Purelin fonksiyonu belirlenmiştir. Katman sayısı artırıldıkça mesela katman sayısı 3 olduğunda Tansig+Logsig+Purelin, Tansig+Tansig+Purelin, Logsig+Tansig+Purelin ve Logsig+Logsig+Purelin biçiminde sonuç verecek For-Next döngüsü kullanılmıştır. Bu döngünün içinde ayrıca nöron sayıları 5'den 100'e kadar değişecek biçimde For-Next döngüsü içine alınmıştır. [83-89]

3782 satırlık x 51 sütunluk bir girdi verisi ile 3782 satırlık x10 sütunluk bir çıktı elde edilmiştir. Girdilerimiz; problem tasarım parametreleri olmakla birlikte, çıktılarımız, deformasyon, gerinim, gerilme, yay sabiti K ve çok katmanlı yayalardaki eşdeğer k değeri biçiminde planlanmıştır. Bu inputlara karşı mühendislik hesaplamalarında elde edilebilecek tüm sonuçlar Yapay Sinir Ağı Sistemi ile hızlı ve kolay yoldan belirlenmiştir.

Yapay Sinir Ağı Sistemine veriler girilirken %70 data öğrenme verisi olarak Matlab 'daki data bankasına girilmiş, geriye kalan %15 i Test ve son kısım %15 ise Doğrulama (Validasyon) için kullanılmıştır. Yapay Sinir Ağı Modelinin matematiksel modelleri denklem 5-9 da verilmiştir. [83-89]

$$Net\ O = (\sum w_{i,j} \cdot x_j) + b_m \cdot v_{m,n} = (\sum [w_{i,j}][x_k]) + b_m \cdot v_{m,n} \quad (14.2)$$

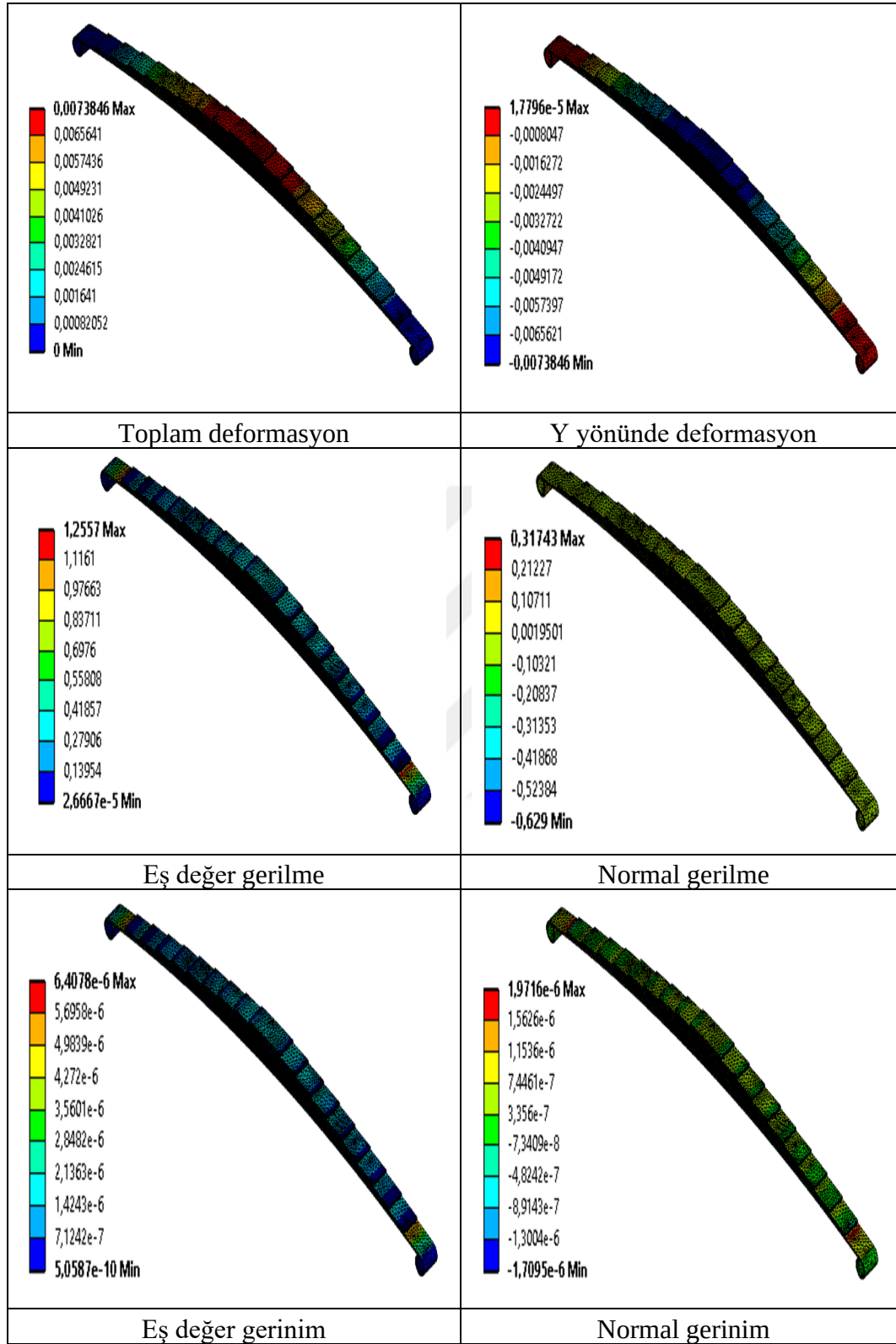
$$x_1 = tansig(x_1) = \frac{2}{(1+e^{-2\sum(w_{i,j} \cdot x_1)+b_1 \cdot v_{1,n}})} - 1 \quad (14.3)$$

$$x_2 = tansig(x_2) = \frac{2}{(1+e^{-2\sum(w_{i,j} \cdot x_2)+b_2 \cdot v_{2,n}})} - 1 \quad (14.4)$$

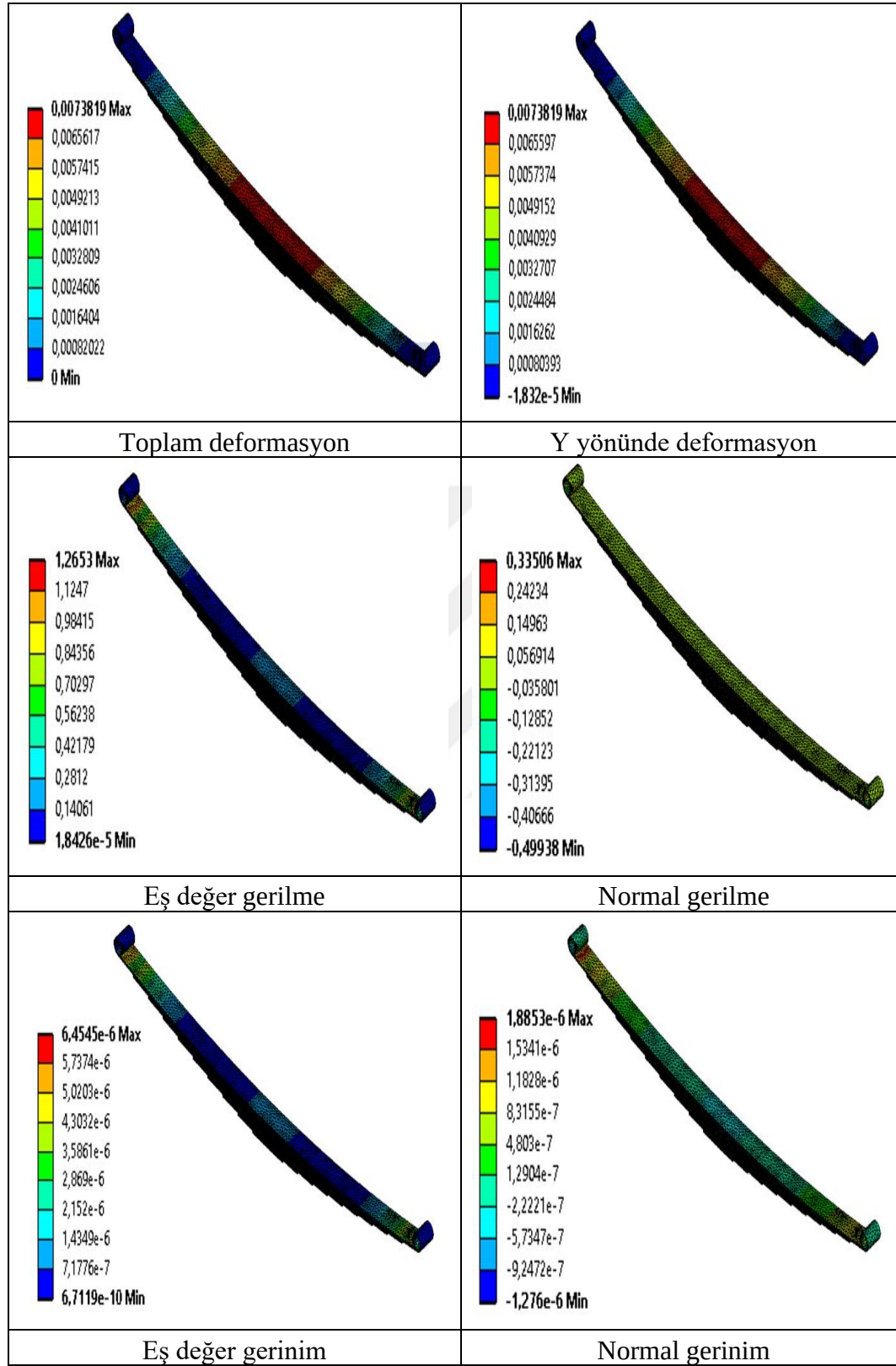
$$x_3 = logsig(x_3) = \frac{1}{(1+e^{-\sum(w_{i,j} \cdot x_3)+b_3 \cdot v_{3,n}})} \quad (14.5)$$

$$x_4 = purelin(x_4) \quad (14.6)$$

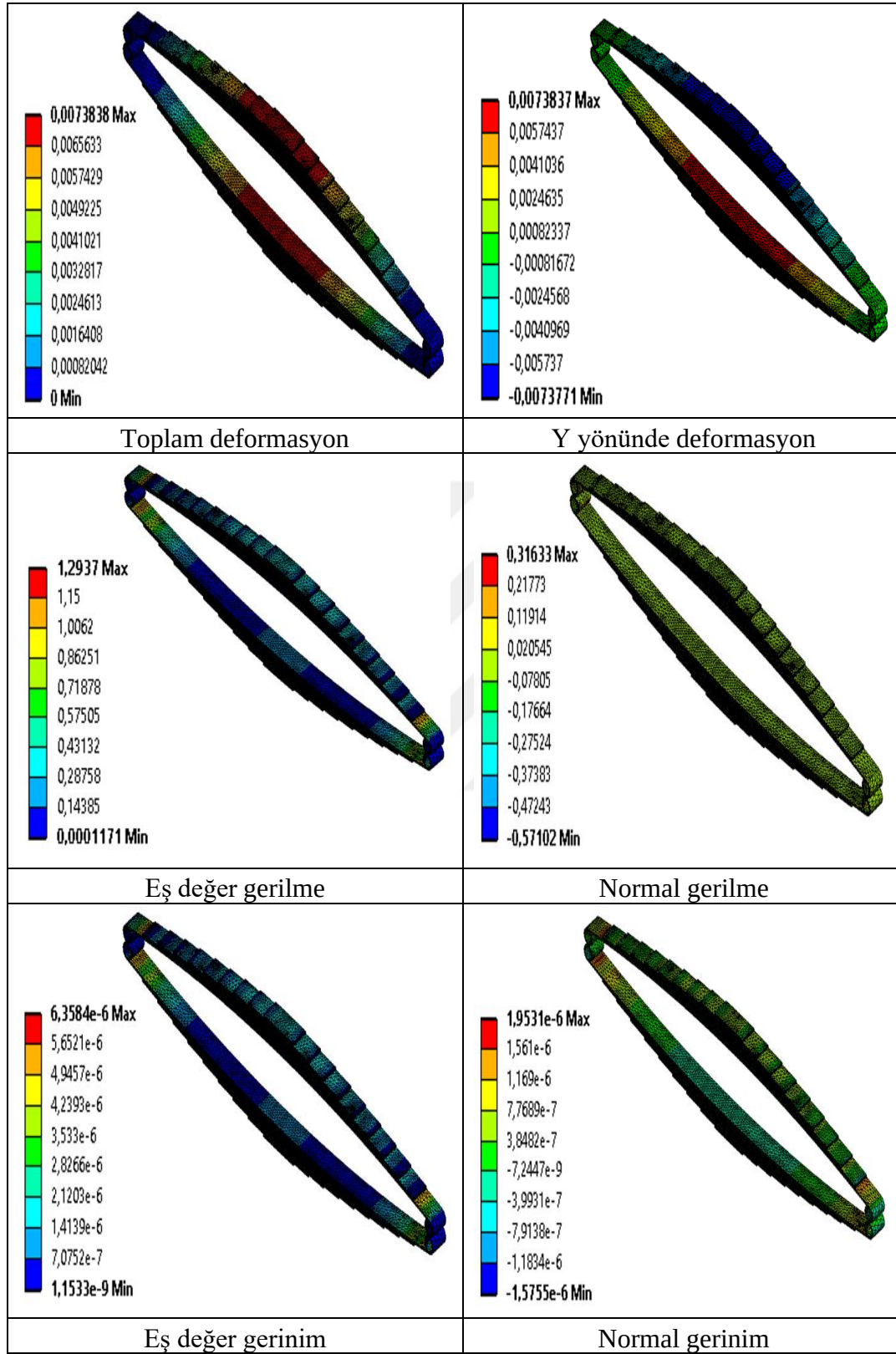
Düz (Model A) ve Ters (Model A) olan modellerin parametrik tasarımlarında aynı boyutsal parametreler kullanılmıştır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.9'da düz ve çift model için tasarım parametrelerine göre mühendislik analiz sonuçları verilmiştir. Çift alt modelde ise (Düz ve Ters) modellerin simetrik parametrik boyutları kullanılmıştır



Şekil 6.7. Model A yaprak yay (düz alt Model) SEA sonuçları



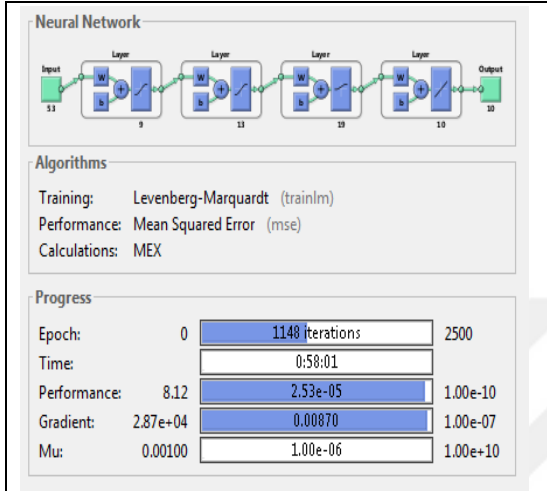
Şekil 6.8. Model A yaprak yay (ters alt model) SEA sonuçları



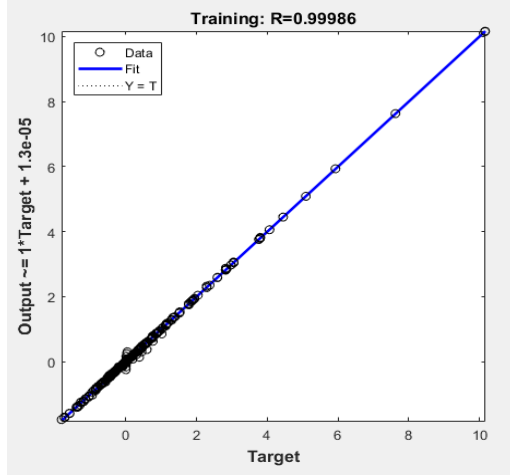
Şekil 6.9. Model A yaprak Yay (çift alt model) SEA sonuçları

6.4. Yaprak Yayların Yapay Sinir Ağları Sonuçları

Elde edilen modelde; 51 input+9 Tansig+13 Tansig+19 Logsig+10 Purelin +10 Output modeli belirlenmiştir (6.10. Şekil).



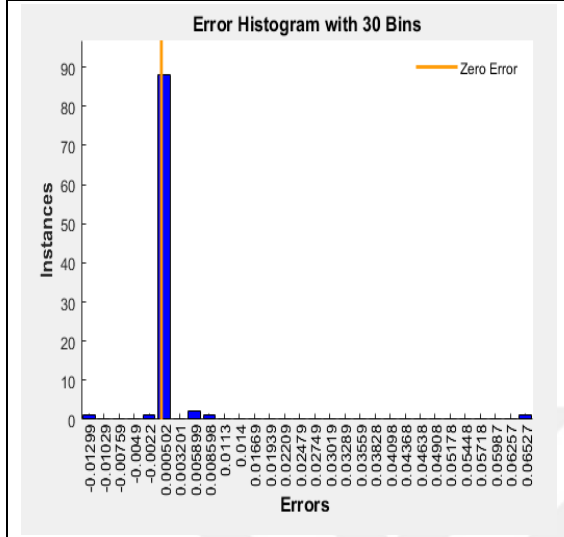
Şekil 6.10. Model A ANN Mimarisi



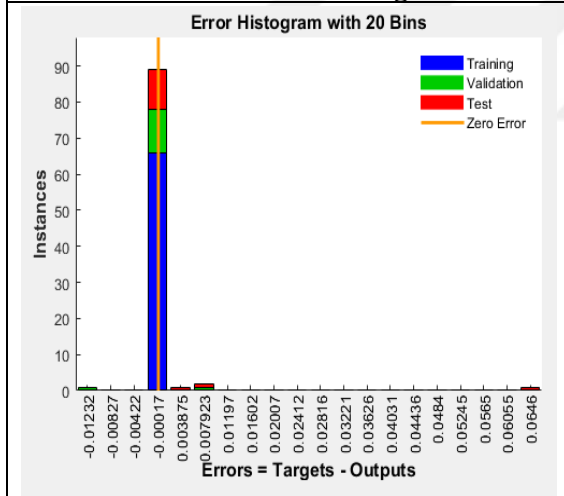
Şekil 6.11. ANN modelinin öğrenme performansı

Şekil 15.1'de ANN modelinin öğrenme performansı görülmektedir. Şekle göre modelin öğrenme performansı $R=0.99986$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'e yakın bir değer olmasından dolayı öğrenme performansının iyi olduğu belirlenmekle birlikte, test ve doğrulama sonuçları ile yeniden analiz edilmesi gerekmektedir. Test ve doğrulama

sonuçlarının iyi olmaması durumunda bu öğrenmenin iyi olmadığını ortaya koymuştur ve sonuç olarak başka bir model üzerinde durulması gerekmektedir.



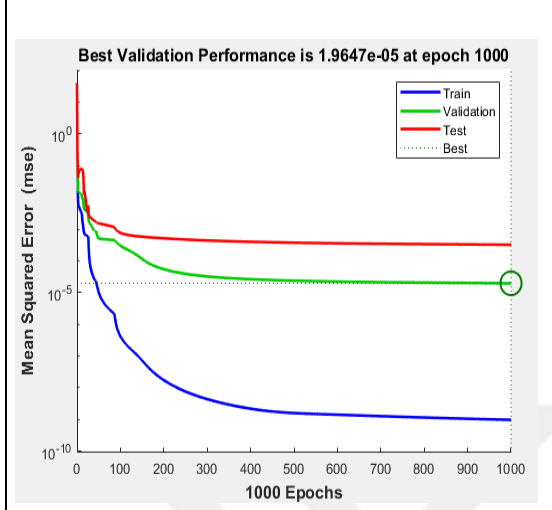
Şekil 6.12. Model A yapay sinir ağı modelinin 30 bins error histogramı



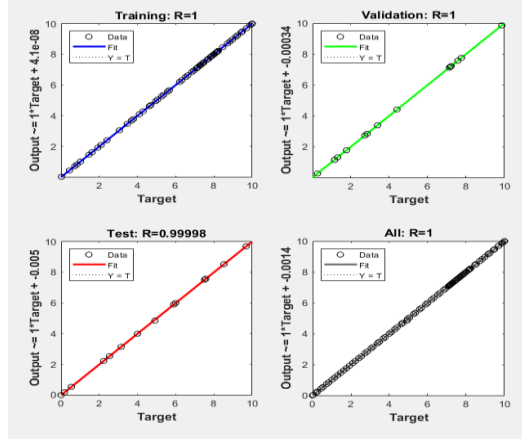
Şekil 6.13. Model A yapay sinir ağı modelinin 20 bins error histogramı

Şekil 6.12’de ANN modelinin 30 Bins Error Histogramı, Şekil 6.13’de ise ANN Modelinin 20 Bins Error Histogramı gösterilmiştir. Şekil 6.14’ de gösterilen ; öğrenme verilerinin %90 ı sıfır hata içermektedir. Geri kalan %10’luk kısım ise %0,005 hata ihtiva etmektedir. Bu değer bize öğrenme performansının iyi olduğunu ispatlamaktadır. Şekil 6.15’de ise, öğrenme, test ve doğrulama hata miktarları gösterilmiştir. Buna göre öğrenmenin %70’lik verisinin %65 i sıfır hata ihtiva etmekte, test ve doğrulama verilerinin ise %15 lik

kısımlarının %12,5 değerinin sıfır hata ihtiva ettiği hesaplanmıştır. Buna göre öğrenme, test ve doğrulama değerlerinin performanslarının yeterli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.14. Model A YSA öğrenme, test ve doğrulama mukayesesi



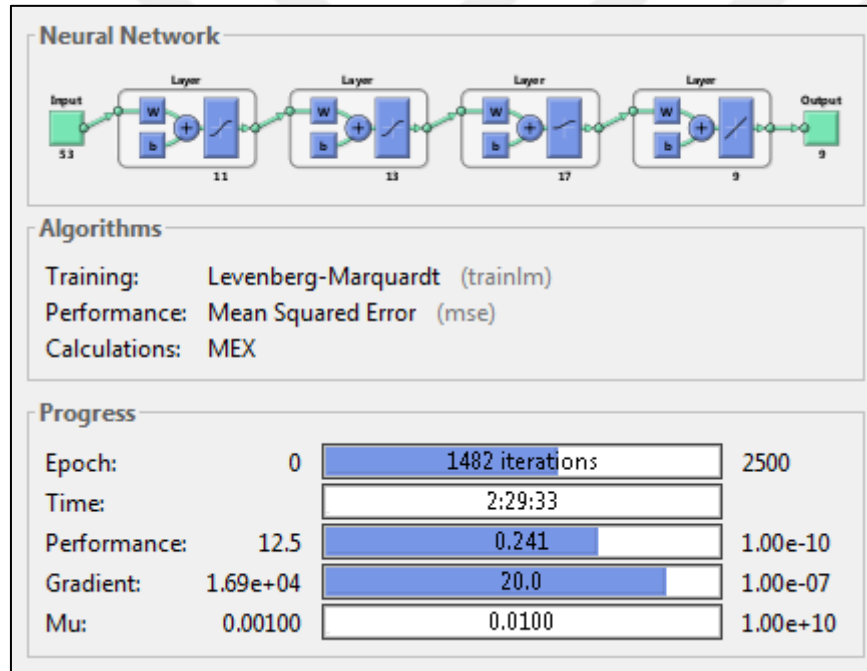
Şekil 6.15. model A YSA, test ve doğrulama performansları

Parametrik Sonlu Elemanlar çözümü ile YSA çözümlerinin istatistik mukayesesi Çizelge 5 de verilmiştir. Buna göre SEA çözümleri ile YSA çözümleri arasında büyük bir uyum söz konusudur. Yapay Sinir Ağı Modelinin problem için doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

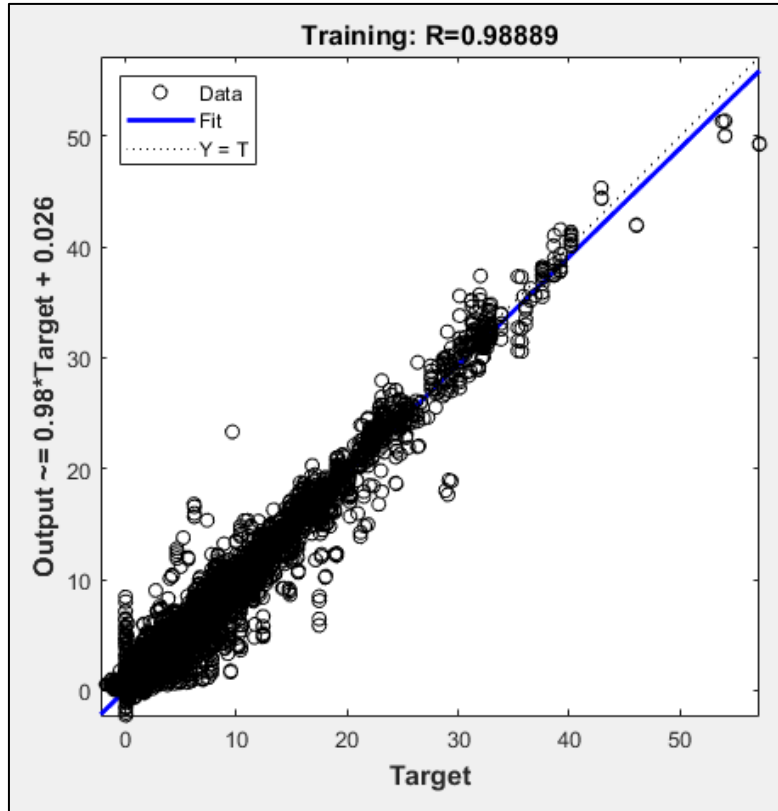
Çizelge 6.3 SEA- YSA modellerinin performanslarının istatistiksel mukayesesi

	SEA – ANN
Average Error MEP%	0.0001999333
RMS	3.60391E ⁻⁰⁵
R ²	0.999999333

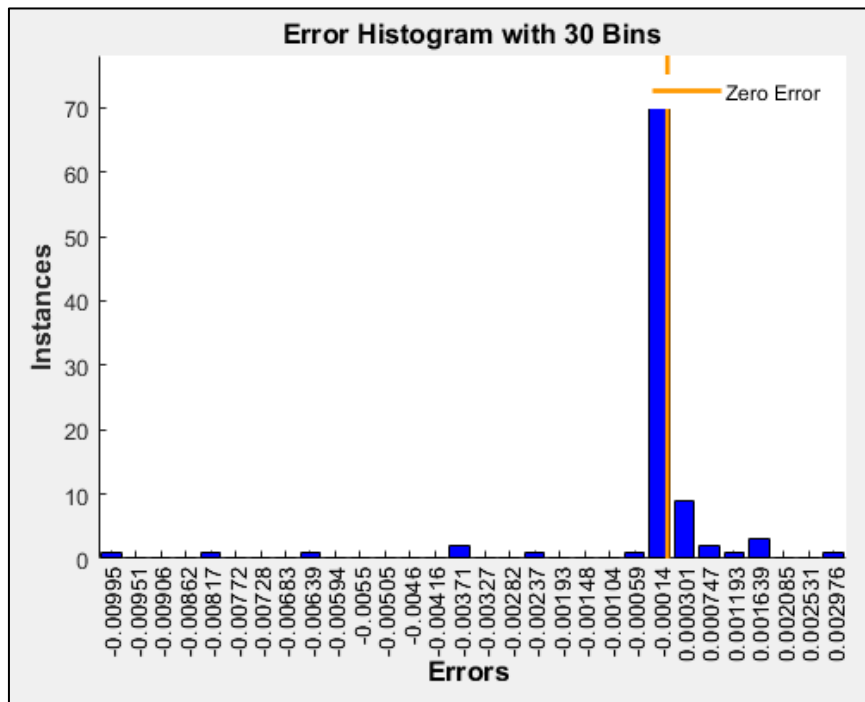
6.5. Model A, B ve C Tipi Yaprak Yayların ANN Model Sonuçları



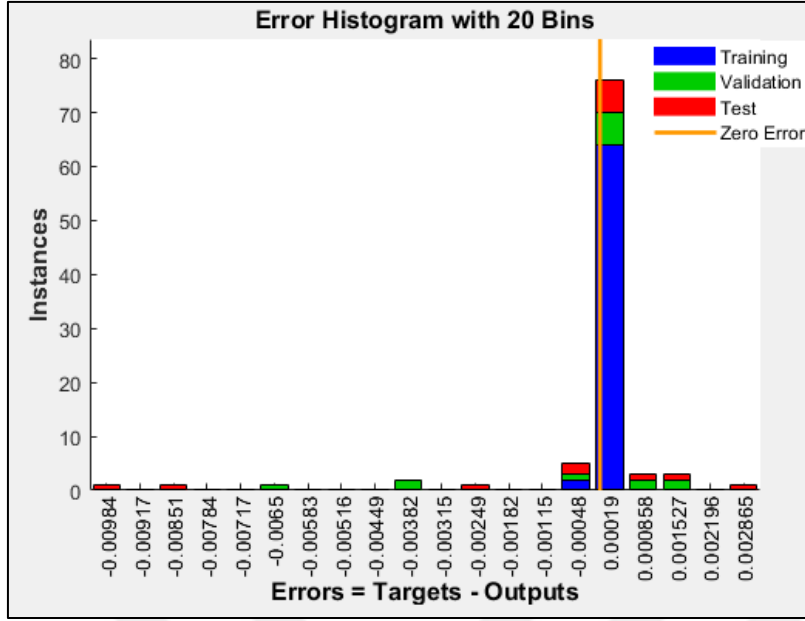
Şekil 6.16 Model A, B ve C ANN Mimarisi performansı



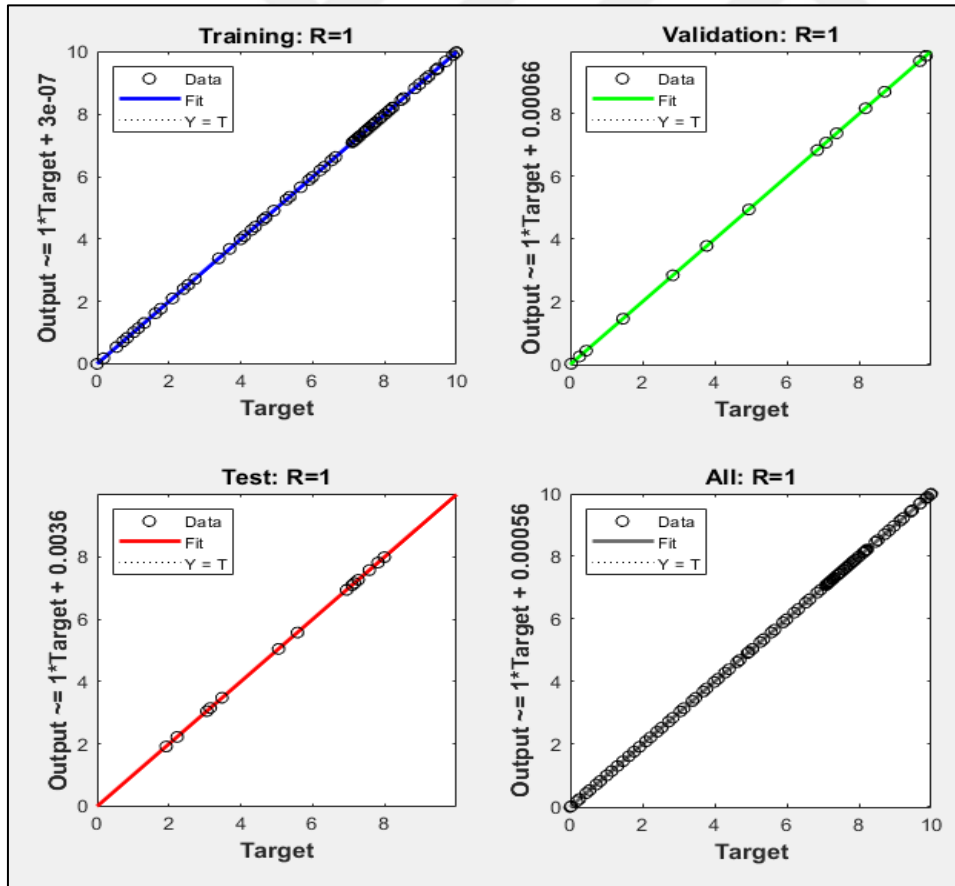
Şekil 6.17 Model A, B ve C ANN öğrenme



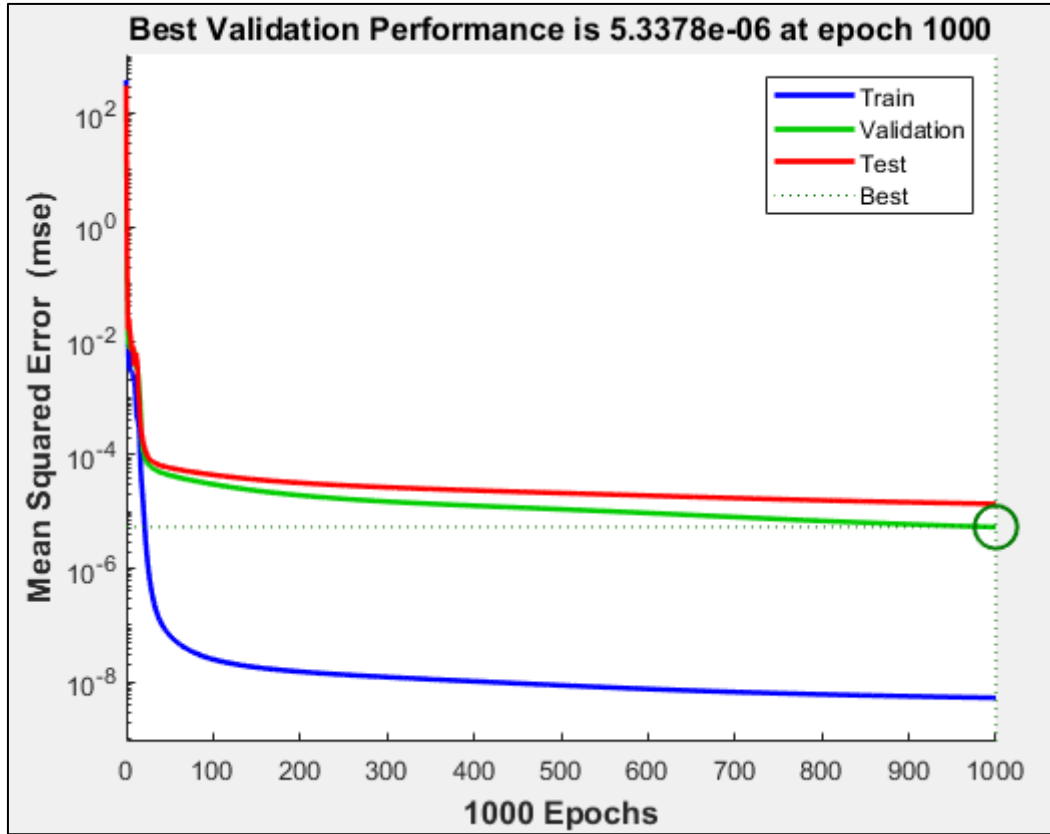
Şekil 6.18 Model A, B ve C yapay sinir ağı modelinin 30 bins error histogramı



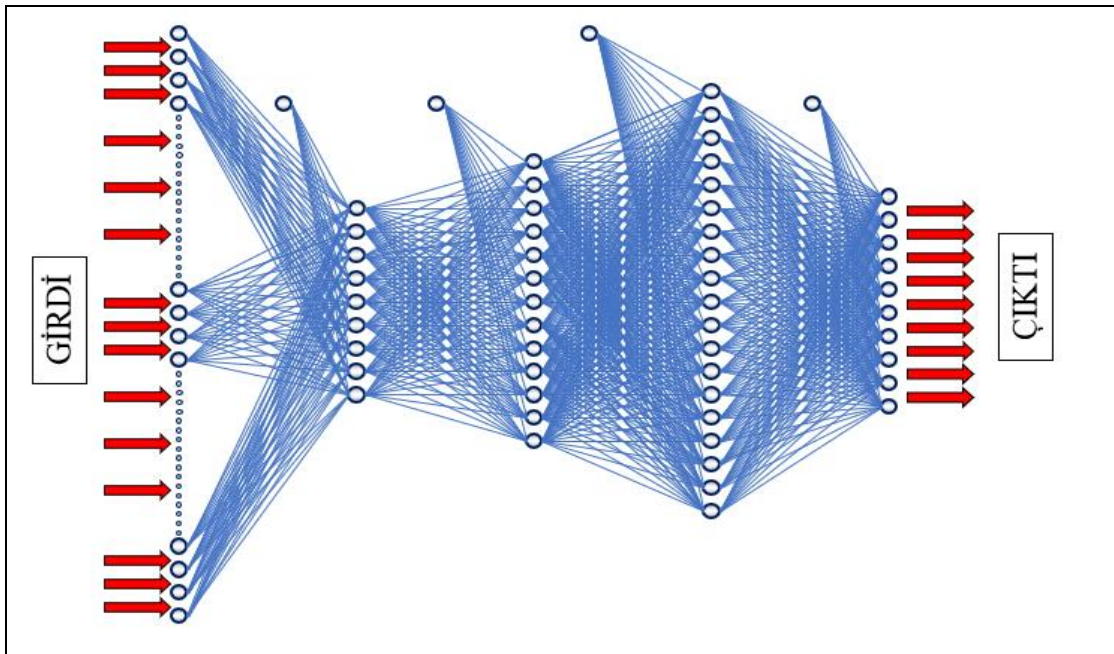
Şekil 6.19 Model A, B ve C yapay sinir ağı modelinin 20 bins error histogramı



Şekil 6.20 Model A, B ve C YSA öğrenme, test ve doğrulama performansları



Şekil 6.21 Model A, B ve C YSA öğrenme, test ve doğrulama mukayesesi



Şekil 6.22. Model A, B ve C ANN mimarisi [51 9 13 19 10]

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada özellikle ağır yük koşullarında çalışan hareketli makinalarda kullanılan (Kamyon, tır, arazi aracı vb.) gibi ulaşım araçlarında çok önemli bir kullanma yeri olan yaprak yay tasarımı farklı kombinasyonlar denenerek modellenmiştir. Bu amaç için; Çizelge 10.1. de tasarım parametreleri i, boyutları ve şekilsel özellikleri değişkenlik gösteren A, B ve C yaprak yay tasarımları mühendislik yaklaşımıyla modellenmiş, analiz edilmiş ve modellerden elde edilen sonuçlar bir yaprak yay veri tabanı haline getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar SEA yazılımı ile modellenmiş ve parametrik olarak farklı yüklemeler neticesindeki gerilme, gerilim değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar mühendislik yaklaşımı formüller ile kontrol edilmiş ve analizler A, B ve C temel modeller için 4 er farklı tasarım varyasyonu ortaya konulmuştur. Bu modellerin her biri için ayrı ayrı yaprak yay kat sayısı ve boyutları da ilave edilerek model sayısı çaprazlama olarak artırılmıştır. Temel ölçüler orijinal yaprak yay üretici firmanın katalogu referans olarak alınarak, boyutlandırmalar gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller için 172800 varyasyon elde edilmiştir. Bu kadar çok varyasyonun olduğu modellerin çözümünün çok zaman alması sebebi ile temel parametre sayısı azaltılarak minimize edilmiştir. Tüm olasılıkların içinde bulunduğu bir yaprak yay veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı kullanılarak, bu geniş tasarım çerçevesi içinde, her problemin çözümünü %99.999 doğrulukta tahmin edilebileceği bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir.

Yapay sinir ağları mühendislik, Tıp ve Fen vb. alanlarında son yıllarda başarı ile kullanılan bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım aynı insan beynin ve içinde barındırdığı nöronların çalışma prensibi ile çalışan canlı bir metodolojidir. En büyük özelliği öğrenmesi, öğrenmenin sınırlı verilerle kalmaması, öğrendiklerini yorumlayabilmesi ve en önemli özelliği ise geçmiş öğrenmelerden elde ettiği sonuçlar ışığında; veri tabanında olmayan bir test parametreleri ile ilgili tahmin (predict) yapabilmesi ve bu tahminlerin başarı oranlarının oldukça yüksek doğruluklarda elde edebilmesidir.

Yaprak yay modellerinin veri tabanı oluşturulmuş ve 3 farklı temel tasarım için veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı orijinal ağır vasıta araçlar için halihazırda kullanılan yay ölçü parametreleri dikkate alınarak yeni modeller tasarlanmıştır. Elde edilen modellerin SEA çözümleri bir veri tabanında toplanmış ve farklı öğrenme algoritmaları ve katman

sayıları değiştirilerek Yapay Sinir Ağı modelleri denenmiştir. Yapay Sinir Ağları Modeli Matlab içinde kod yazılarak oluşturulmuştur. Veriler farklı öğrenme algoritmaları, farklı sayılardaki gizli katman ve nöron sayıları değiştirilerek öğrenme, test ve validasyon puanları en yüksek olan model belirlenmiştir. Öğrenme algoritmaları, gizli katman sayıları ve nöron sayıları belli bir algoritma çerçevesinde iterasyona tabii tutulmuş ve modeller üretilmiştir. Elde edilen YSA modelleri arasından en iyi performansa sahip olan model Yaprak Yay Yapay Sinir Ağı modeli olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında sadece A tipi model için elde edilen Yapay Sinir Ağı modeli sunulmuş, tezde fazla yer kaplamaması açısından örneklendirilmiştir.

A tipi yaprak yay için; 3782 satırlık x 51 sütunluk bir girdi verisi ile 3782 satırlık x10 sütunluk bir çıktı elde edilmiştir. Girdilerimiz; problem tasarım parametreleri olmakla birlikte, çıktılarımız, deformasyon, gerinim, gerilme, yay sabiti K ve çok katmanlı yayalardaki eşdeğer Keş değeri biçiminde planlanmıştır. Bu inputlara karşı mühendislik hesaplamalarında elde edilebilecek tüm sonuçlar Yapay Sinir Ağı Sistemi ile hızlı ve kolay yoldan belirlenmiştir. Yapay Sinir Ağı Sistemine veriler girilirken %70 data öğrenme verisi olarak Matlab 'daki data bankasına girilmiş, geriye kalan %15 i Test ve son kısım %15 ise Doğrulama (Validasyon) için kullanılmıştır. Elde edilen modelde; 51 input+9 Tansig+13 Tansig+19 Logsig+10 Purelin +10 Output modeli belirlenmiştir. Bu model için elde edilen başarı performansı; Average Error MEP%=0.0001999333; RMS=3.60391E-05; $R^2=0.999999333$ değerleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada, 4 farklı model için (Düz, Ters ve Düz + Ters (Çift), Hibrit) yaprak yay için mühendislik yaklaşımıyla tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada derin mühendislik faaliyetlerinin yanı sıra, bilgisayar destekli tasarım ve yapay zeka teknikleri kullanılmıştır. Öncelikle parametrik yaprak yay tasarımlar boyutları ve katman sayıları belirlenerek yaprak yaylar boyutlandırılmıştır. SEA yaklaşımı ile parametrik modeller ANSYS yazılımında parametrik olarak modellenmiş ve minimum ve maksimum yük durumuna göre SEA sonuçları elde edilmiştir. SEA sonuçları bir veri tabanı haline getirilmiş ve bu veri tabanı kullanılarak Yapay Sinir Ağı Modeli belirlenmiştir. Bu amaçla birçok Yapay Sinir Ağı Modeli denenmiş ve test edilmiş, istatistiksel olarak en iyi performansa sahip yapay sinir ağı modeli, yaprak yaylar için belirlenmiştir.

Yapılan çalışma, bilgisayar destekli tasarım ve modelleme çalışmasının yanı sıra yapay zeka tekniklerini de içinde barındırmaktadır. Özellikle bir tasarımcının öncelikle problemin boyutsal ölçülerini belirlemesi ve daha sonra yapması gereken meşakkatli mühendislik hesaplamalarını gerçekleştirmesi gerekmektedir. Geliştirilen yapay zeka tekniklerine dayalı olan Yapay Sinir Ağı Modeli ile tasarımcının harcayacağı çaba ve zamandan tasarruf edilerek deneysel/ analiz sonuçlarına çok yakın değerlerde tasarım yapmasını sağlayacak bir metot ortaya konulmuştur. Mühendislik tecrübe ve bilgi gereken işlemler, basit bir yazılımla her tasarımcının kolay ve ucuz yünden tasarım yapabilme yetisi kazandırılmıştır.

Yapılan analizler modelleme ile;

- i. Orijinal katalogda boyutsal ölçüleri verilmiş olan aralıklardaki her yaprak yay için katman sayısına ve model tipine bağlı olarak gerilme analizleri SEA yazılımı vasıtasıyla modellenmiş ve çözdürülmüştür.
- ii. Elde edilen analiz sonuçları ile bir yaprak yay çözüm kataloğu oluşturulmuştur.
- iii. Model C'nin çift alt modeli en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir.
- iv. Analiz sonuçları kullanılarak Yapay Sinir Ağları Modeli geliştirilmiştir.
- v. Yapay Sinir Ağı Modeli kullanılarak tasarımcıların ve mühendislerin kolay ve hızlı bir biçimde ürün seçimi aşaması oluşturulmuş, mühendislik hesaplamaların her ürün için yapılması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır.
- vi. Yapay Sinir Ağı modeli ile, database de bulunmayan A, B ve C model tiplerindeki yaprak yaylar için YSA'nın tahmin kabiliyeti kullanılarak zaman ve maliyetler minimize edilmiştir
- vii. Gereksiz yere ürün seçimi veya tasarımı için yapılması gereken prosesler minimize edilmiştir.

7.1. Öneriler

1. Bu aşamadan sonra kompozit (metal ve plastik dahil) yaylar için bir analiz metodolojisi gerçekleştirilebilir.
2. Bu aşamadan sonra kompozit (metal ve plastik dahil) yaylar için bir için yeni YSA modelleri oluşturulabilir.
3. Kullanım türüne göre farklı tasarımlar yayarak yaylar için kullanıla bilinir.

4. Kullanım amaç ve yerine göre tasarım çeşitliliği ve malzeme farklılıkları bilimsel çalışmalarda değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

1. Sağlam, Z., Yıldız, B., Adin, M. Ş., Adin, H. ve Seven, B. (2018). Yaprak yayların nümerik metotlar yardımıyla hasar analizi. *1st International Engineering and Technology Symposium (IETS 2018)*. 310-315.
2. Çetinkaya, M.B. ve Topaç, C. (2020). Araçlarda makas sistemlerinin uzun ömür testine yönelik stant tasarımı ve prototip uygulaması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 36(1), 22-32.
3. Bildik, O. ve Işık, B. (2014). Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak polimer kompozit yaprak yayın modellenmesi. *I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14)*. 87-90.
4. Tokgönül, G., Kulaç, G., Şenocak, Ç. ve Başalan, E. (2018). Ağır ticari kamyonlar için tasarımı yapılmış tek katlı parabolik yaprak yayın üretimi ve fiziksel doğrulması. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*. 2(26), 55-61.
5. Poyraz, M. (2017). Kompozit malzemelerin yaprak yay elemanı olarak kullanılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 17(2), 781-789.
6. Şener, A. ve Maral, Y. (2019). Bozuk yol verileri kullanarak bir yaprak yayın yorulma ömrünün SEA ile değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*. 7(4), 788-801.
7. Charde, R.B. and Bhope, D.V. (2012). Investigation of stresses in master leaf of leaf spring by FEM and its experimental verification. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. 4(2), 633-640.
8. Sunar, Ö. ve Çevik, M. (2015). Tek katlı yaprak yaylarda sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma analizi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 11(1), 1-6.
9. Manchanda, S., Singh, B. and Singh, G. (2015). Design and finite element analysis of leaf spring using different material properties. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*. 4(7), 186-189.
10. Aher, V.K. and Sonawane, P.M. (2012). Static and fatigue analysis of multi leaf spring used in the suspension system of LCV. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2(4), 1786-1791.
11. Ashok, D., Mallikarjun, M.V. and Mamilla, V.R. (2012). Design and structural analysis of composite multi leaf spring. *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*. 2(5), 30-37.
12. Rajendran, I. and Vijayarangan, S. (2001). Static and modal analysis of a leaf spring assembly using contact nonlinear 3D finite element approach. *SAE Technical Papers*. 28(51), 385-392.

13. Kumar, M.S. and Vijayarangan, S. (2007). Static analysis and fatigue life prediction of steel and composite leaf spring for light passenger vehicles. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 66(2), 128-134.
14. Kelebek, O., Kuralay, N.S. ve Karaoğlu, M.U. (2018). Ağır taşıtlar için çok katlı konvansiyonel yaprak yay yerine tek katlı parabolik yaprak yay tasarımı ve analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. 20(59), 481-491.
15. Baviskar, V.R., Sarode, P.L., Wankhede, I.N. and Salunke, N.P. (2014). Static analysis of master leaf spring. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 3(8), 9-12.
16. Gowd, G.H. and Goud, E.V. (2012). Static analysis of leaf spring. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. 4(8), 3794- 3803.
17. Raghavedra, M., Hussain, S.A., Pandurangadu, V. and PalaniKumar, K. (2012). Modeling and analysis of laminated composite leaf spring under the static load condition by using FEA. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2(4), 1875-1879.
18. Kumar, K. and Aggarwal M.L. (2012). A finite element approach for analysis of a multi leaf spring using CAE tools. *Research Journal of Recent Sciences*. 1(2), 92-96.
19. Kumar, M.S. and Vijayarangan, S. (2007). Analytical and experimental studies on fatigue life prediction of steel and composite multi-leaf spring for light passenger vehicles using life data analysis. *Materials Science*. 13(2), 141-146.
20. Reddy, A.C., Sagar, V.S. and Babu, G.S. (2012). Optimal design of automobile leaf spring using finite element analysis. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 7(2), 87-94.
21. Kumar, K. and Aggarwal M.L. (2015). Simulation for optimized modelling of en45a leaf spring. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*. 4(3), 129-142.
22. Patnaik, M., Yadav, N. and Dewangan, R. (2012). Study of a parabolic leaf spring by finite element method & design of experiments. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2(4), 1920-1922.
23. Refngah, F. N. A., Abdullah, S., Jalar, A. and Chua, L.B. (2009). Fatigue life evaluation of two types of steel leaf springs. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 4(2), 136-140.
24. Jenarathanan, M.P., Ramesh, K.S., Venkatesh, G. and Nishanthan, S. (2018). Analysis of leaf spring using Carbon / Glass Epoxy and EN45 using ANSYS: A comparison. *Materials Today: Proceedings*. 5(6), 14512-14519.

25. Aggarwal, M.L., Agrawal, V.P. and Khan, R.A. (2006). A stress approach model for predictions of fatigue life by shot peening of EN45A spring steel. *International Journal of Fatigue*. 28(12), 1845-1853.
26. Emekli, M.E. (2008). *Hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sistemi tasarımı*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-10.
27. Wahl, A.M. (1944). *Mechanical Springs* (First edition). Cleveland: Penton Publishing company, 1-24.
28. Esen. Ö., Balıkoğlu, F. ve Arslan, B. (2012). Yaprak yaylarda kompozit malzeme uygulama ve yorulma analizi. 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi* .496-510.
29. Nutalapati, S. (2015). Design and analysis of leaf spring by using composite material for light vehicles. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 6(12), 36-59.
30. Milli eğitim bakanlığı. (2013). Motorlu araçlar teknolojisi süspansiyon sistemleri. Ankara: Milli eğitim bakanlığı, 46-51.
31. Kanbolat, A., Soner, M., Karaağaç, M. and Erdoğan T. (2011). Parabolic leaf spring optimization and fatigue strength evaluation on the base of road load data, endurance rig tests and non linear finite element analysis. *SAE 2011 World Congress & Exhibition*. 1-8.
32. Duruş, M., Kırkayak, L., Ceyhan, A. and Kozan, K. (2015). Fatigue life prediction of z type leaf spring and new approach to verification method. *Procedia Engineering*. 101, 143-150.
33. Karakaş, H. (2020). Kumlama işleminin yaprak yayların yorulma ömrü üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir,41-42.
34. Hoyle, J.B. (2004). Modelling the static stiffness and dynamic frequency response characteristics of a leaf spring truck suspension. *Journal of Automobile Engineering*. 218(3), 259-278.
35. Omar, M.A, Shabana, A.A, Mikkola, A., Loh, W. and Basch, R. (2004). Multibody system modeling of leaf springs. *Journal of Vibration and Control*. 10(11), 1601-1638.
36. Society of Automotive Engineers. Spring Committee. (1990). *Spring Design Manual*. ABD: Society of Automotive Engineers, 15-58.
37. Çetinkaya, S. (2005). *Taşıt mekaniği* (4. Baskı). Türkiye: Nobel yayın dağıtım, 216-221.
38. Arora, V., Bhushan, G. and Aggarwal, M.L. (2011). Eye design analysis of single leaf spring in automotive vehicles using CAE tools. *International Journal of Applied Engineering and Technology*. 1(1), 88-97.

39. Kumar, Y.N.V.S and Teja, M.V. (2013). Design and analysis of composite leaf spring. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2(3), 209-212.
40. Venu, Y. and Diwakar, G. (2013). Static and modal analysis of leaf spring with eyes using FEA packages. *International Journal of Engineering Research and Development*. 7(3), 71-77.
41. Raghvendra, G. and Dasari, S. (2010). A new approach to evaluate wear on automotive leaf spring suspension bushes. *SAE Technical Paper*. 1-7.
42. Topaç, M.M. ve Bahar, İ. (2019). Bir askeri hizmet taşıtında kullanılan parabolik yaprak yayın yay karakteristiğinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*. 22(1), 115-120.
43. Al-Obaidi, A.J., Ahmed, S.J. and Sukar, H.M. (2020). The effect of factors on the flexural of the composite leaf spring. *Materials Today: Proceedings*. 20(4), 566-571.
44. Mühürçüoğlu, B. (2009). *Sac metal kalıp tasarımı ve bek tablası bağlama sacı parçası için sac kalıp tasarımı*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-17.
45. Yıldız, Y. (2013). *Sac metal kesme işleminin modellenmesi*, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-22.
46. Chauhan, P.S. and Agrawal, C. M. (2013). A case study of the effectiveness of rolling process to manufacture the strip of leaf spring. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 1(1), 71-75.
47. Slama, S., Bouhafs, M., Bessrour, J., Jaber, M.B. and Mokdadi, H. (2018). Numerical simulation of heat transfer during leaf spring industrial quenching process. *Mechanics & Industry*. 19(3), 1-9.
48. İnternet: Prof. Dr. Sultan Öztürk. *Faz diyagramları (ders notu)*. URL: <https://www.coursehero.com/file/58794741/07-Hafta-eliklerin-ıslıı-ışlemleripdf/>, Son erişim tarihi: 05.05.2022.
49. Topbaş, M.A., (1998). *elik ve Isıl İşlem El Kitabı* (1. Baskı). İstanbul: Prestij yayıncılık, 24-549.
50. Totten, G.E., Bates, C.E. and Clinton, N.A. (1993). *Handbook of quenchants and quenching Technology* (First Edition). USA:ASM International, 1-129.
51. Saraç, E. ve Özbek, N.A. (2019). Temperleme ısııl işlem sıcaklıklarının AISI 4140 eliğinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 7(3), 1574-1586.
52. alığülü, U., Aras, M. ve Türkmen, M. (2016). Temperleme işleminin yağda soğutulan çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi. *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*. 600-607.

53. Çınar, K. ve Toktaş, G. (2019). Artık gerilmeleri ölçme yöntemleri. *Mühendis ve Makina güncel*. 48-56.
54. Avcu, E. (2018). Bilyalı dövme parametrelerinin AA7075 T6 alüminyum alaşımının yüzey altı özelliklerine etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji*. 6(4), 741-752.
55. Barış, F. (2020). *50CrV4 çeliğin yüzeyinde oluşturulan yapay yüzey kusurlarına bilyalı dövme işleminin etkilerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 3-5.
56. Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C. and Daly, J. (1999). Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*. 31(3), 179-191.
57. Ay, İ. ve Sakin, R. (1998). Kumlama ile parça temizleme ve bilyalı dövme prosesi. *Makine ve metal teknolojisi*. 79, 68-72.
58. Sevil, B. (2020). Development and characterization of pre-treatment process to enhance dye affinity and corrosion resistance for metal surfaces, Yüksek lisans tezi, Ege University Graduate School of Applied and Natural Science, İzmir, 3-17.
59. Bryson, W.E. (2009). *Heat treatment, selection, and application of tool steels* (Second edition.). München: Hanser Publishers, 1-9.
60. Yamada, Y. and Kuwabara, T. (2007). *Materials for springs* (Kindle edition). Berlin: Springer, 47-74.
61. Mrazova, M. (2013). Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *Incas Bulletin*. 5(3), 139-150.
62. Kılıç, E. (2006). *Kompozit malzemeden yapılan yaprak yayların analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-24.
63. Işık, A. (2008). Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 24-45.
64. Hou, J.P., Cherruault, J.Y., Nairne, I., Jeronimidis, G. and Mayer, R.M. (2007). Evolution of the eye-end design of a composite leaf spring for heavy axle loads. *Composite Structures*. 78(3), 351-358.
65. Esen, Ö. (2009). *Kompozit yaprak yayların sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma analizinin yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 8-21.
66. Rostislav, K., Ivo, S., Petr, K., Stanislav, R., Petr, O., Michael, M., Zdeněk, V., Miroslava, S. and Petra, V. (2015). Effect of plastic deformation on CCT diagram of spring steel 51CrV4. *Metal* 2015. 1-6.

67. Aydınoğlu, B. (2002). *Az alaşımlı krom-molibden çeliklerinin yapı kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 27-36.
68. Young, W.C. and Budynas, R.G. (2001). *Roark's Formulas for Stress and Strain* (Seventh edition). USA: Mc Graw-Hill, 9-35.
69. Beer, F.P., Johnston, E.R, Dewolf, J.T. and Mazurek, D.F. *Cisimlerin mukavemeti* (çev. Soyuçok, A. ve Soyuçok, Ö.). İstanbul: Literatür yayıncılık, dağıtım, pazarlama, sanayi ve ticaret Ltd. Şti. (Eserin orijinali 2012'de yayınlandı), 74-136.
70. Budynas, G.R. and Nisbett, J.K. *Shigley' den makine mühendisliğinde tasarım* (çev. Ergür, H.S., Dilmeç, M., Halkacı, H.S., Karadeniz, S., Kılıkış, B. ve Pancar, Y.). İstanbul: Oksijen basım. (Eserin orijinali 2008'de yayınlandı), 68-110.
71. Khurmi, R.S. and Gupta, J.K. (2005). *A text book of machine design (S.I units)* (First multicolour edition). Ram Nagar: Eurasia publishing house (pvt.) ltd., 820-884.
72. Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E. (1989). *Concept and applications of finite element analysis* (Third edition). Toronto: John wiley and sons, inc, 1-25.
73. Yavuz, B. (2015). *Nokta direnç kaynağında ısı ve yapısal analizlerin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-17.
74. Güler, M.S. ve Şen. S. (2015). Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 5(1), 56-66.
75. Nath, B. *Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri* (çev. Günay, D.). Sakarya: Sakarya üniversitesi matbaası. (Eserin orijinali 1990'da yayınlandı), 1-7.
76. Erdemir, F. ve Özkan, M.T. (2018). Esneyerek kilitlenen bağlantı elemanlarında tutma/çözme kuvvetinin malzeme cinsi ve sürtünme katsayısına göre yapay sinir ağları metodu ile modellenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 4(3), 207-215.
77. Şen, Z. (2004). *Yapay sinir ağları ilkeleri* (1. Baskı). Türkiye: Su vakfı yayınları, 7-16.
78. Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları* (1. Baskı). Türkiye: Papatya yayıncılık, 29-57.
79. Köksal, E., Özkan, M.T. ve Eldem, C. (2013). Çekme gerilmesi etkisindeki millerin çentik faktörünün yapay sinir ağları ile belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29(1), 81-89.
80. Elmas, Ç. (2003). *Yapay sinir ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama)* (1. Baskı). Türkiye: Seçkin yayıncılık San. ve Tic. A.Ş. 22-65.
81. Dündar, K., Toktaş. ve Özkan, M.T. (2014). Düz dişli çarklar için lewis form faktörünün belirlenmesi için yapay sinir ağları tabanlı bir yaklaşım. *I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14)*. 134-141.

82. Ozkan, M.T. and Erdemir, F. (2020). Determination of stress concentration factors for shafts under tension. *Materials Testing*. 62(4), 413-421.
83. Toktas, I., Ozkan, M.T., Erdemir, F. and Yuksel N. (2020). Determination of stress concentration factor (K_t) for a crankshaft under bending loading: an artificial neural networks approach. *Politeknik Dergisi*. 23(3), 813-819.
84. Ulas, H.B., Ozkan, M.T. and Malkoc, Y. (2018). Vibration prediction in drilling processes with HSS and carbide drill bit by means of artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*. 31, 5547–5562.
85. Basak, H., Ozkan, M.T. and Toktas, I. (2019). Experimental research and ANN modelling on the impact of the ball burnishing process on the mechanical properties of 5083 Al-Mg Material. *Kovové materiály- Metallic Materials*. 57 (1), 61-74.
86. Ulas, H.B., Bilgin, M., Sezer, H.K. and Ozkan, M.T. (2018). Performance of coated and uncoated carbide cermet cutting tools during turning. *Materials Testing*. 60 (9) 893–901.
87. Erdemir, F. and Ozkan, M.T. (2021). Determination of theoretical stress concentration factor for circular/elliptical holes with reinforcement using analytical, finite element method and artificial neural network techniques. *Neural Computing & Applications*. 33(17). 1-15.
88. Ozkan, M.T., Toktas, I. and Doganay, S.K. (2020). Estimations of stress concentration factors C_w/K_t s for helical circular/square cross sectional tension-compression springs and artificial neural network modelling. *Politeknik Dergisi*. 23(3), 901-908.
89. Erdemir, F. and Ozkan, M.T., (2019). Plastik parçalarda bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin modal analizi. *Politeknik Dergisi*. 22(4), 927-933.



GAZİ GELECEKTİR..