

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT YAYLARIN MEKANİK**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Cemal KOÇHAN**

**Ocak, 2016**

**İZMİR**

# **KOMPOZİT YAYLARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı**

**Cemal KOÇHAN**

**Ocak, 2016**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CEMAL KOÇHAN, tarafından YRD.DOÇ.DR. MELİH BELEVİ yönetiminde hazırlanan “KOMPOZİT YAYLARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd.Doç.Dr. Melih BELEVİ

Yönetici



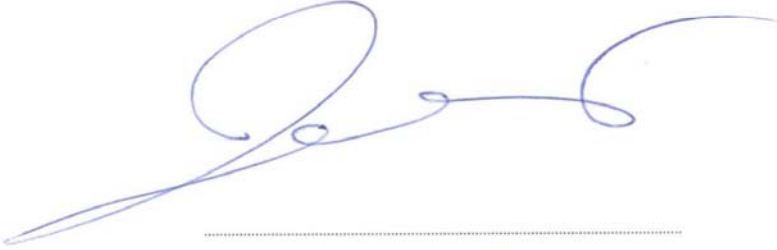
Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU

Tez İzleme Komitesi Üyesi



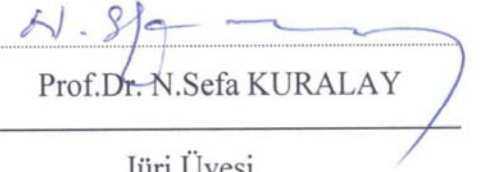
Prof.Dr. Mine DEMİRSOY

Jüri Üyesi



Prof.Dr. Sadri ŞEN

Jüri Üyesi



Prof.Dr. N.Sefa KURALAY

Jüri Üyesi



Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda danışmanlığımı üstlenen hocam Yrd.Doç.Dr. Melih BELEVİ' ye, tez komitemde yer alarak bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen hocam Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU' ya teşekkür ederim. Çalışmamın başından itibaren her ihtiyacım olduğunda desteklerini esirgemeyen hocam Doç.Dr. Bülent Murat İÇTEN' e ve tez sürecinde yaşadığım kimi sıkıntıları aşmam için desteğini esirgemeyen Maden Mühendisliği Bölümü'nden hocam Doç.Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI' ya ayrıca teşekkür ederim.

Bu doktora tezi Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından 2012.KB.FEN.038 kodlu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi üyelerine teşekkür ederim.

Bu zorlu süreç boyunca psikolojik destekleri ile beni güçlendiren, aynı zamanda kompozit yaprak yayların üretiminde özverili yardımlarını esirgemeyen başta Necla KAYAALP olmak üzere Arş.Grv.Dr. Tarık SERİNDAG, Arş.Grv. Fırat KARASU ve Yrd.Doç.Dr. Şener AKPINAR' a teşekkür ederim.

En önemlisi, beni her zaman destekleyen babama, anneme ve kardeşime teşekkür ederim.

Cemal KOÇHAN

# KOMPOZİT YAYLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZ

Bu doktora çalışmasının amacı hafif ticari araçların arka süspansiyon sistemlerinde kullanılmakta olan çelik yaprak yayların yerini alabilecek fiber takviyeli polimer matris kompozit yaprak yayların geliştirilmesidir. Bu amaca yönelik olarak üç farklı türde fiber takviyeli kompozit yaprak yay üretilmiştir. Üretilen kompozit yaprak yayların statik ve yorulma testlerinin yürütüldüğü yaprak yay test cihazının tasarımı ve üretimi de tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit yaprak yaylar düz uçludur. Bu yayların hem test cihazına hem de araca montajını sağlamak üzere bağlama gözleri de tasarlanmış ve üretilmiştir.

Tezin birinci bölümünde yaprak yaylar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kompozit yaprak yaylar konusuna giriş yapılmış ve konuyla ilgili literatür çalışmaları verilmiştir. Bölüm sonunda tez konusu problemin tanımı yapılarak önemi ortaya konulmuştur.

İkinci bölümde, yaprak yayların mekanik özelliklerini incelemek için tez kapsamında tasarlanan ve üretilen yaprak yay test cihazına ait detaylar yer almaktadır.

Üçüncü bölümde, öncelikle kompozit yaprak yayların vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARIM) ile üretilmesinde kullanılacak olan kalıbın tasarlanması ve üretimi hakkında bilgi verilmiştir. Tez kapsamında üretilen yaprak yaylar düz uçludur. Bu kompozit yaprak yayların araca bağlanması için tasarlanıp üretilen yaprak yay bağlama gözleri ile ilgili bilgiler de üçüncü bölümde bulunmaktadır. Bölüm sonunda ise E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi kompozit yaprak yayların üretim detayları yer almaktadır.

Dördüncü bölümde, kompozit yaprak yaylara uygulanan statik testlerin ve yorulma testlerinin detayları yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar da yine bu bölüm içerisinde bulunmaktadır.

Beşinci bölümde kompozit yaprak yayların Ansys 14.5 paket program kullanılarak modellenmesi ve sayısal analizi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kompozit yaprak yay, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama, mekanik özellikler, yorulma testi.

# **AN INVESTIGATION ON THE MECHANICAL BEAHEVIORS OF COMPOSTE SPRINGS**

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to develop fiber reinforced polymeric composite leaf springs in order to use in the suspension systems of the light commercial vehicles instead of steel ones. For this purpose three different type of fiber reinforced polymeric composite leaf springs were produced. Then, static and fatigue tests were conducted with produced composite leaf springs. The test machine which was used to conduct the tests was also designed and produced within the thesis. Because composite leaf springs were produced flat ended, an eye connection mechanism also designed and produced.

The first chapter of the thesis consists of general knowledge about steel leaf springs and composite leaf springs. Then literature about composite leaf springs was given. In the end of the chapter the subject of the thesis was described and its importance was emphasized.

The second chapter of the thesis is built by design and production details of the leaf spring test machine.

The third chapter of the thesis is about the composite leaf springs production. First of all, the mold design and its production is given. The mold was used in the production of composite leaf springs by VARIM process. Afterwards, design and production of the eye connection apparatus which is used to connect flat composite leaf springs to the chassis is given. At the end of the chapter production process of E-glass/epoxy, carbon/epoxy and E-glass/carbon/epoxy composite leaf springs were given in detail.

The forth chapter consist of static and fatigue tests procedures of the composite leaf springs and their results.

The fifth chapter of the thesis has numerical modeling and analysis of composite leaf springs by Ansys 14.5.

All of the analysis and experimental results were discussed in detail at the last chapter of the thesis.

**Keywords:** Composite leaf spring, vacuum assisted resin infusion molding, mechanical properties, fatigue test.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ..... <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>	
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş.....	1
1.2 Metalik Yaprak Yaylar Hakkında Genel Bilgi.....	2
1.2.1 Metalik Yaprak Yayların Hesap Yöntemi .....	7
1.2.1.1 Sertlik Faktörü .....	9
1.2.2 Yaprak Yaya Çalışma Koşullarında Gelen Yükler.....	9
1.3 Kompozit Yaprak Yaylar .....	12
1.3.1 Kompozit Yaprak Yaylar ile İlgili Literatür Çalışmaları .....	14
1.3.2 Kompozit Yaprak Yay Gözleri ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	19
<b>BÖLÜM İKİ - YAPRAK YAY YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI.....</b>	<b>23</b>
2.1 Yaprak Yay Yorulma Test Cihazı için Tasarım Sınır Şartları .....	28
2.1.1 Metalik Yaprak Yay ve Yorulma Testi Uygulama Standartları .....	28
2.1.2 Yaprak Yay Test Cihazı Özgün Tasarım Özellikleri.....	30
2.1.3 Yaprak Yay Test Cihazı Kritik Elemanların Teorik Hesaplamaları.....	32
2.1.3.1 Üst Uzun Kiriş Hesabı .....	32
2.1.3.2 Üst Kısa Kiriş Hesabı.....	36
2.1.3.3 Alt Kiriş Hesabı .....	37
2.1.3.4 Tabla Hesabı .....	38
2.1.3.5 Uzun Kolonların Hesabı .....	40

2.1.3.6. Kuvvet Uygulama Çubuğu Hesabı .....	43
<b>BÖLÜM ÜÇ - DÜZ UÇLU KOMPOZİT YAPRAK YAY VE GÖZ BAĞLANTISI ÜRETİMİ.....</b>	<b>46</b>
3.1 Kompozit Yaprak Yay Kalıp Tasarımı .....	46
3.2 Kompozit Yaprak Yayların Üretimi.....	48
3.2.1 Kompozit Yaprak Yayların Özellikleri için Hesaplamalar .....	49
3.2.2 Kompozit Yaprak Yayların VARİM ile Üretimi.....	52
3.2.3 Ortotropik Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması .....	56
3.3 Düz Uçlu Yaprak Yaylar için Göz Bağlantısı Tasarımı ve Üretimi.....	58
<b>BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>62</b>
4.1 Statik Testler.....	62
4.2 Yorulma Testleri.....	69
<b>BÖLÜM BEŞ - SAYISAL MODELLEME VE ANALİZ .....</b>	<b>80</b>
5.1 Kompozit Yaprak Yayların Modellenmesi ve Statik Analizi .....	80
<b>BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>84</b>
6.1 Sonuçlar ve Öneriler.....	84
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>87</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 Çok tabakalı yaprak yay.....	3
Şekil 1.2 Araç üzerinde yaprak yay montajı .....	3
Şekil 1.3 Çok tabakalı yaprak yay ortasının detay resmi .....	4
Şekil 1.4 Çeşitli tasarımlarda metalik yaprak yaylar.....	5
Şekil 1.5 Yay katsayısına göre yaprak yaylar .....	5
Şekil 1.6 Çeşitli göz tasarımları .....	7
Şekil 1.7 Simetrik yarı-eliptik yaprak yay.....	8
Şekil 1.8 Yaprak yaya etkiyen yükler. ....	10
Şekil 1.9 Yavaşlama anında yaprak yayın kıvrılması .....	10
Şekil 1.10 Dönme anında yaprak yayın katlanması .....	12
Şekil 1.11 Çok yapraklı çelik yay ile tek yapraklı kompozit yayın direngenliği .....	15
Şekil 1.12 Tren vagonunda (a) kompozit yaprak yay (b) çelik yaprak yay .....	16
Şekil 1.13 Göz bağlantısında bırakılan cıvata ile boşluk arası mesafe etkisi.....	21
Şekil 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı tasarım süreci akış şeması .....	24
Şekil 2.2 Üst uzun kiriş serbest cisim diyagramı .....	35
Şekil 2.3 Üst kısa kiriş serbest cisim diyagramı.....	36
Şekil 2.4 Alt kiriş serbest cisim diyagramı.....	37
Şekil 2.5 Tabla serbest cisim diyagramı.....	39
Şekil 2.6 Uzun kolon serbest cisim diyagramı .....	40
Şekil 2.7 Kuvvet uygulama çubuğu serbest cisim diyagramı .....	43
Şekil 2.8 Yaprak yay yorulma test cihazı.....	45
Şekil 3.1 Kompozit yaprak yay VARIM kalıbı.....	46
Şekil 3.2 VARIM ile üretime hazırlık aşaması. ....	52
Şekil 3.3 VARIM ile üretim elemanları .....	53
Şekil 3.4 Üretim aşamasından bir görüntü .....	54
Şekil 3.5 Üretim sonrası düz uçlu E-camı/epoksi kompozit yaprak yaylar .....	54
Şekil 3.6 Su jeti ile kesim işleminden bir görüntü .....	54
Şekil 3.7 E-camı/epoksi kompozit yaprak yay numunesi son hali.....	55
Şekil 3.8 Çekme testinden bir görüntü .....	57

Şekil 3.9	V-çentikli kesme testinden bir görüntü .....	57
Şekil 3.10	Yapıştırma bağlantıları .....	58
Şekil 3.11	Cıvatalı bağlantılar .....	58
Şekil 3.12	Yapıştırılmalı cıvatalı bağlantı .....	59
Şekil 3.13	Cıvatalı bağlantılarda hasar türleri .....	60
Şekil 3.14	Düz uçlu yaprak yay için göz bağlantısı .....	61
Şekil 4.1	E-camı/epoksi düz uçlu yaprak yayın statik testinden bir görüntü. ....	62
Şekil 4.2	E-camı/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği .....	64
Şekil 4.3	E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği.....	64
Şekil 4.4	Karbon/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği.....	65
Şekil 4.5	Üç farklı kompozit yaprak yayın statik karakteristiği.....	65
Şekil 4.6	E-camı/epoksi yaprak yayda statik test sonrası hasarlar .....	67
Şekil 4.7	E-camı-karbon/epoksi yaprak yayda statik test sonrası hasarlar.....	68
Şekil 4.8	Karbon/epoksi yayda statik test sonrası hasarlar.....	68
Şekil 4.9	E-camı/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma test sonuçları .....	70
Şekil 4.10	EG 9 numunesine ait yorulma test grafiği.....	71
Şekil 4.11	EG 10 numunesine ait yorulma test grafiği.....	71
Şekil 4.12	E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.....	72
Şekil 4.13	HB 4 numunesine ait yorulma test grafiği .....	73
Şekil 4.14	HB 8 numunesine ait yorulma test grafiği .....	73
Şekil 4.15	Karbon/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma test sonuçları.....	74
Şekil 4.16	Cb 6 numunesine ait yorulma test grafiği. ....	74
Şekil 4.17	Cb 9 numunesine ait yorulma test grafiği. ....	75
Şekil 4.18	EG 9 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar.....	77
Şekil 4.19	HB 8 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar .....	77
Şekil 4.20	Cb 6 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar .....	78
Şekil 5.1	Sınır şartları uygulanmış kompozit yaprak yay.....	80
Şekil 5.2	E-camı/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği.....	81
Şekil 5.3	E-camı-karbon/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği .....	81
Şekil 5.4	Karbon/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği. ...	82

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı çizim planı .....	25
Tablo 2.2 St37 mekanik özellikleri .....	32
Tablo 2.3 Üst uzun kiriş için Marin Denklemi faktörleri .....	34
Tablo 2.4 Kabul edilebilir emniyet katsayısı değerleri.....	34
Tablo 2.5 Burkulma olayı için kabul edilebilir emniyet katsayısı değerleri .....	41
Tablo 2.6 Uzun kolon için Marin Denklemi faktörleri.....	42
Tablo 2.7 34CrNiMo6 mekanik özellikleri .....	43
Tablo 2.8 Kuvvet uygulama çubuğu için Marin Denklemi faktörleri .....	44
Tablo 3.1 Yaprak yay VARIM kalıbı çizim planı .....	47
Tablo 3.2 Çift yapraklı çelik yaprak yayın özellikleri.....	48
Tablo 3.3 Kompozit yaprak yay üretiminde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	48
Tablo 3.4 Ön hesap sonucu kompozit yaprak özellikleri .....	51
Tablo 3.5 Kompozit yaprak yayların üretim sonrası ölçülen özellikleri .....	55
Tablo 3.6 0/90 <sup>0</sup> oryantasyon açılı ortotropik malzemenin mekanik değerleri .....	56
Tablo 3.7 Düz uçlu yaprak yay için göz bağlantısı çizim planı .....	61
Tablo 4.1 Kompozit yaprak yaylara uygulanan kodlamalar .....	63
Tablo 4.2 Kompozit yaprak yaylara uygulanan testlerin sınırları. ....	63
Tablo 4.3 Üç farklı kompozit yaprak yayın ortalama statik test sonuçları.....	67
Tablo 4.4 E-camı/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları .....	75
Tablo 4.5 Karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.....	76
Tablo 4.6 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.....	76
Tablo 5.1 Kompozit yaprak yayların deneysel ve sayısal analiz sonuçları.....	82

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Hareket halindeki bir aracın tekerleklerine gelen yük eğer doğrudan araç şasisine iletilmiş olsaydı, şasi üzerindeki bileşenlerin önemli derecede hasar görmesinin yanı sıra şasinin kendisi de büyük yorulma yüklerine maruz kalırdı. Bu nedenle araç bileşenlerini yol düzensizliklerinden gelen ani darbe ve titreşimlerden mümkün olduğunca izole edip aracın stabilitesini ve konforunu iyileştirmek için süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır.

Tarihte Romalılar tarafından Pilentum adı verilen at arabalarının süspansiyon sisteminde ağaçtan üretilip kullanılmaya başlanan yaprak yaylar, çelik olarak ilk Fransızlar tarafından 18.yy da taşıtlarda kullanılmıştır. Kimi üreticiler tarafından hala arka süspansiyon sistemlerinde kullanılan yarı-eliptik yaprak yaylar ise 1804 yılında Obadiah Elliott tarafından icat edilip patenti alınmıştır.

Kullanılacak yay türüne maliyet, yayın enerji sönümlenme faktörü, yorulma ömrü gibi etkenler göz önüne alınarak karar verilir. Günümüzde araç süspansiyon sistemlerinde dört çeşit yay kullanılmaktadır. Bunlar; yaprak yaylar, helisel yaylar, burulma çubuğu ve havalı (gazlı) yaylardır.

- a. Yaprak yaylar: Tek ya da çok tabakalı olabilirler. Çok tabakalı olanlarda sürtünmeyi önlemek amacı ile tabakalar arasına plastik elemanlar yerleştirilir. Konfor seviyesi yüksek olup bakım gerektirmezler. Boylamasına ya da enlemesine yerleştirilerek kullanılabilirler. Ağırlıkları en büyük dezavantajlarıdır.
- b. Helisel yaylar: Yanal ve kesme kuvvetlerini karşılayamadıkları için gergi kolları ile beraber kullanılırlar. Hafif olmaları ve az yer kaplamaları başlıca avantajlarıdır.

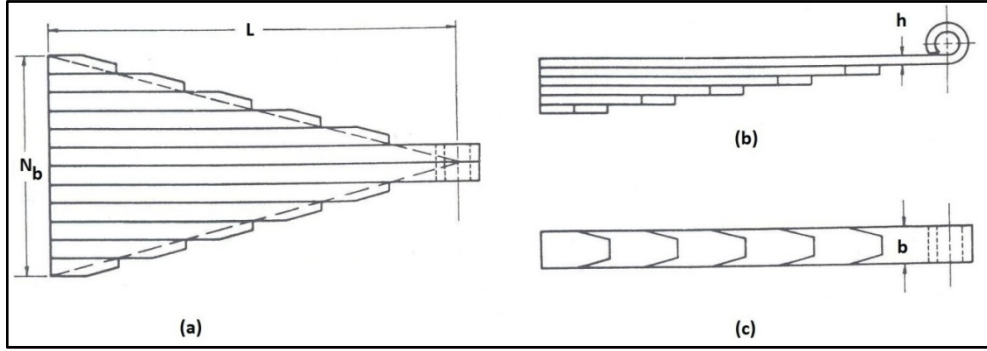
- c. Burulma çubuğu: Hafifliği en büyük özelliğidir. Araç altına monte edildikten sonra yüksekliği bir yay ile ayarlanabilir.
- d. Havalı yaylar: Enerji sönümlenme özelliği bakımından en yüksek kapasiteye sahip yaylardır. Ancak beraberinde kullanılması gereken kompresör, rezervuar, gaz kurutucu, buz çözücü, kablolar, valfler, amortisör ve filtreler göz önüne alındığında hem ağırlık yönünden hem de maliyet yönünden dezavantajlı duruma gelmektedir.

Belli bir gerilme değeri ya da belli bir ağırlık için metalik yaprak yayların enerji sönümlenme kapasiteleri, helisel yaylara ya da burulma çubuğuna göre neredeyse dörtte bir oranındadır (Garrett, Newton ve Steeds, 2001). Bununla beraber araç bir engebeye ya da çukura geldiğinde karşılaştığı zorlanma türü eğilme zorlanmasıdır. Kullanılan bu süspansiyon yaylarından helisel yaylar ve burulma çubuğu çalışma şekli olarak esasta burulmaya çalışırlar yani araca gelen eğilme zorlamasını burularak karşılarlar. Oysa yaprak yayların çalışma şekli esasta eğilme zorlanmasını karşılayacak şekildedir. Bunun yanı sıra yaprak yaylar araç üzerinde bağlandığı aks ile gövdeyi bir birine bağlayan bir yapı elemanı olarak da görev yapar. Ön gerilmesi sayesinde tekerleğin sürekli olarak yol ile temas etmesi de üstlendiği diğer bir görevidir. Sonuç olarak yaprak yayların ağırlık dezavantajı ortadan kaldırıldığı ve enerji sönümlenme kapasitesi arttırıldığı takdirde süspansiyon sistemi için ideal bir yay olduğu ortaya çıkmaktadır.

## **1.2 Metalik Yaprak Yaylar Hakkında Genel Bilgi**

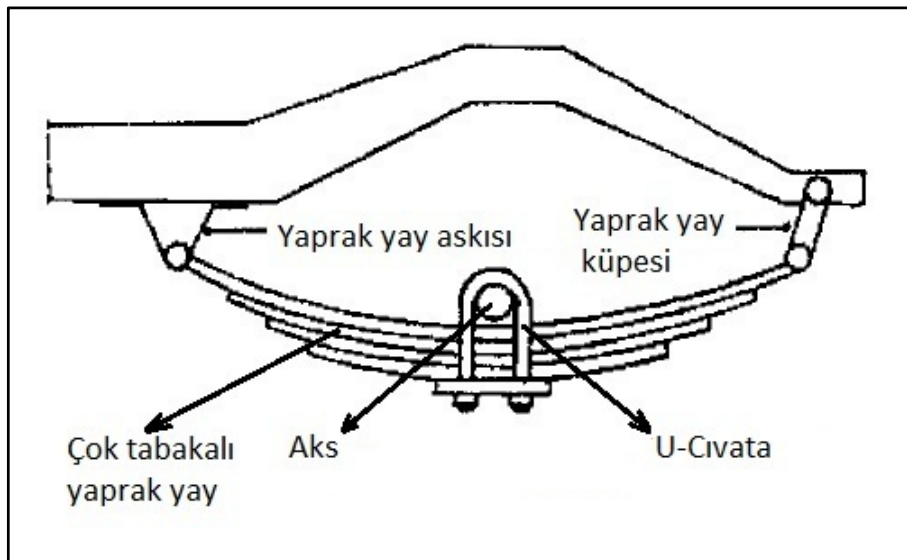
Yaprak yaylar, tüm diğer yaylar gibi, önce enerjiyi depolaması ve sonra geri vermesi için kullanılırlar. Günümüzde yaprak yaylar; hafif ticari araçlar, ağır ticari araçlar gibi karayolu araçlarında ve tren gibi demiryolu araçlarında süspansiyon yayı olarak kullanılmaktadır. Kullanılan yaprak yay tek tabakalı olabileceği gibi çok tabakalı da olabilir. Şekil 1.1' de görülen çok tabakalı yaprak yaylar genellikle farklı boylardaki yayların uzun olan diğerinin üstüne gelecek şekilde üst üste istiflenmesi ve ortasından bir civata ile bağlanmasıyla oluşturulur. En üstteki yay ana yay olarak

isimlendirilirken, alta kalan yaylar yardımcı yay olarak isimlendirilir. Böylece eğilmeye direnç gösteren kalın bir orta kısım ve yayın bağlanmasını sağlayan ince uç kısımlar elde edilir.



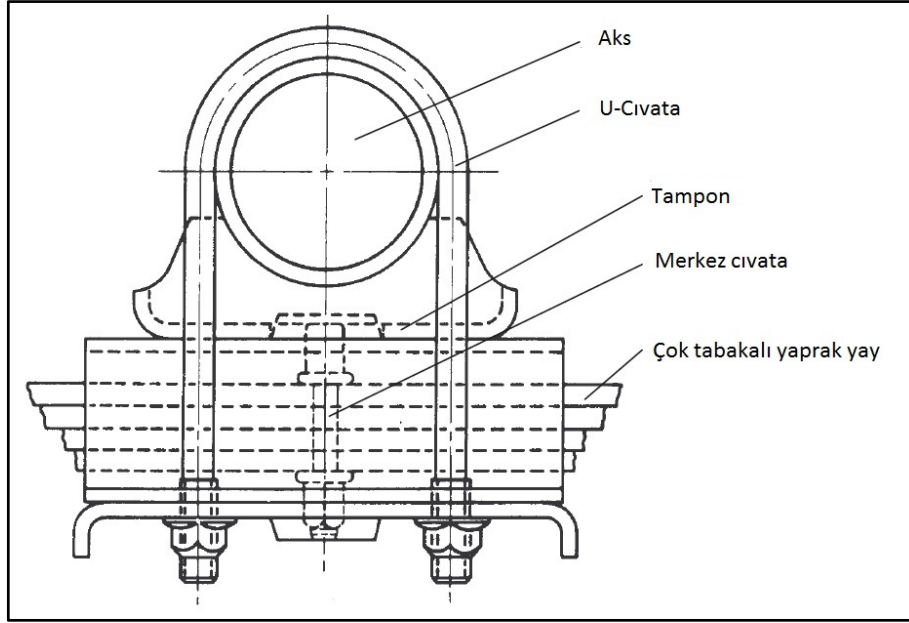
Şekil 1.1 Çok tabakalı yaprak yay h:tabaka kalınlığı, b:tabaka genişliği, L:yaprak yay boyu  $N_b$ :  $N$  sayıda tabaka genişliği a) istiflenmeden önce farklı boylarda tabakalar b) ön görünüş, c) üst görünüş (Society of Automotive Engineers, [SAE], 1982).

Çok tabakalı yaprak yayın araç üzerine montajı, ortasından bir U-cıvata yardımı ile yapılır. Yay gözlerinden biri sabit yay askısına bağlanırken diğer göz yaylanma sırasında gerçekleşecek boydaki uzama ve kısalmalara izin vermesi için hareket serbestliğine sahip yay küpesine bağlanır. Yaprak yayın araç üzerine monte edilmiş durumu Şekil 1.2' de yay ortasının detay resmi ise Şekil 1.3' te verilmiştir.



Şekil 1.2 Araç üzerinde yaprak yay montajı (SAE, 1982).

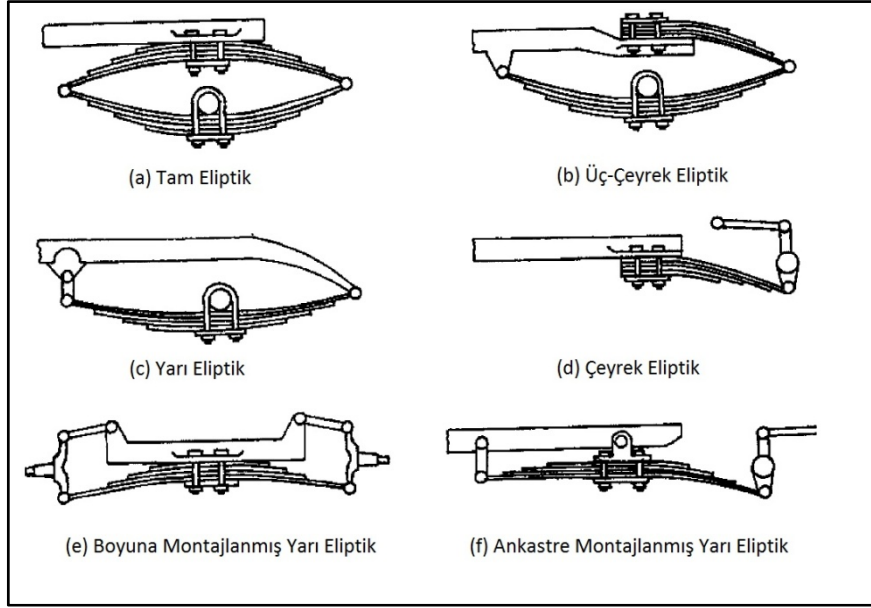




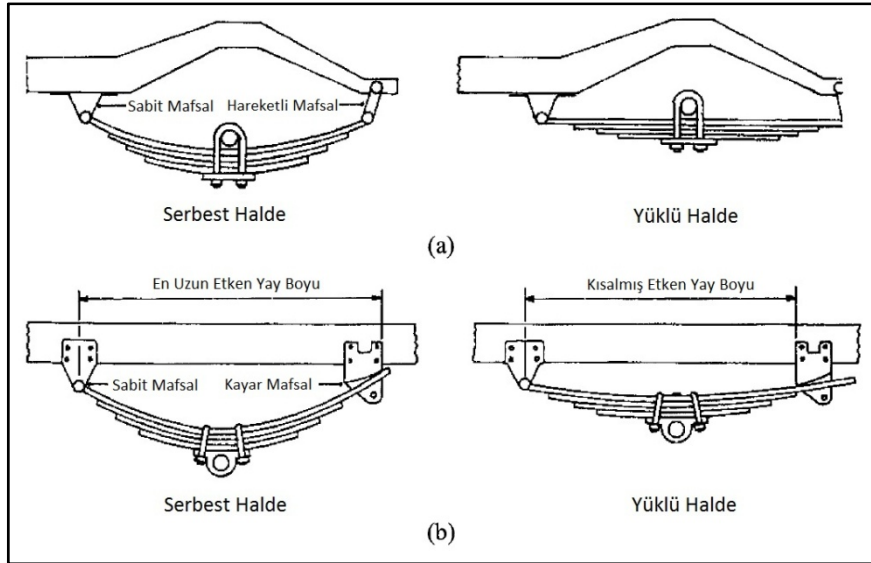
Şekil 1.3 Çok tabakalı yaprak yay ortasının detay resmi (SAE, 1982).

Yaprak yayların tasarım şekillerine göre sınıflandırılması Şekil 1.4' te verilmiştir. İlk kez at arabalarının süspansiyon sistemlerinde kullanılmaya başlayan tam eliptik yaprak yaylar, günümüzde ticari araçlarda da kullanılmaktadır. Üç-çeyrek eliptik yaprak yaylar yumuşak bir süspansiyon sağlarken tam eliptik tasarıma göre daha direngen desteklenmiş yapıdadır. Yarı eliptik tasarım ise günümüzde en fazla kullanılan şekildir. Otomobil arka süspansiyonlarında, kamyonet ve kamyonların ön ve arka süspansiyon sistemlerinde kullanılır. Çeyrek eliptik tasarım küçük spor arabalarda kullanılmaktadır. Boyuna yarı eliptik yaprak yaylar ön ve arka bağımsız süspansiyon sistemleri için üst kol bağlantı, arka kol bağlantı ya da ikisini de oluşturmak için kullanılır. Ankastre monte edilmiş yarı eliptik yaprak yaylar ise artık kullanılmamaktadır (Omar, 2003; Heisler, 1999).

Yaprak yaylar ayrıca yay katsayısına göre de sabit yay katsayılı ve değişken yay katsayılı yaprak yaylar olarak sınıflandırılabilir (Omer, 2003; Heisler, 1999). Şekil 1.5' te sabit yay katsayılı ve değişken yay katsayılı yaprak yayların serbest ve yüklü hali görülmektedir.



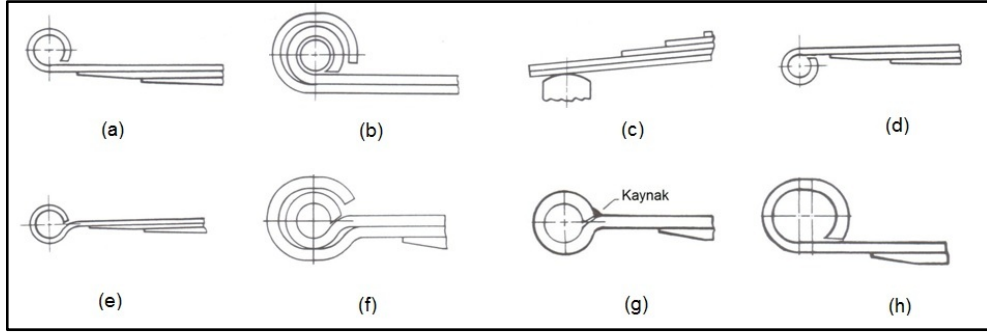
Şekil 1.4 Çeşitli tasarımlarda metalik yaprak yaylar (Omer, 2003; Heisler, 1999).



Şekil 1.5 Yay katsayısına göre (a) Sabit yay katsayılı (b) Değişken yay katsayılı yaprak yaylar (Omer, 2003; Heisler, 1999).

Yaprak yayların araç üzerine monte edildiği boşluklar göz olarak isimlendirilir. Yay gözleri gelen yük ile deformasyona uğrayan yaprak yay için deformasyon güzergâhını belirleyen bir uzuv gibi de görev yapar. Bu nedenle göz tasarımı, yaprak yayın çalışma şartlarında önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 1.6' da çeşitli göz bağlantıları verilmiş olup her birinin özelliklerinden söz edilmiştir (SAE, 1982).

- a) Yukarı Dönük Göz: Bu tasarım en fazla kullanılandır. Gerektiği takdirde ikinci yay göze destek verecek şekilde uzatılabilir (Şekil 1.6a).
- b) Asker Sargılı (Military Wrapper): Tasarım yükü altında ikinci yaprağın göz olarak kullanılması için herhangi bir çaba sarf edilmemiştir, fakat yaylanmada harekete geçer ve esas yaya destek olur. Ayrıca esas yayın kırılması gibi durumda acil destek sağlar. Bu tasarım genellikle kötü kullanım şartlarının olduğu askeri araçlarda kullanılır (Şekil 1.6b).
- c) Düz Uçlu: Bu tasarım eğri yaylanma desteği üzerinde düz yaprak olarak tasarlanmıştır. Yaprak uçları darbelere karşı lastik izolasyon içerir. Kimi zaman boyuna yönde gelen yüklerden kaynaklı hareket için T uç ya da dairesel delik bırakılır (Şekil 1.6c).
- d) Aşağı Dönük Göz: Aks veya direksiyon mili kontrolünü iyileştirecek yay geometrisi gerektirdiğinden bu tasarım nadiren kullanılır (Şekil 1.6d).
- e) Berlin Göz: Boyuna yükler esas yaya ortasından uygulandığı için gözün açılma eğilimi azalır (Şekil 1.6e).
- f) Asker Sargılı Berlin Göz: Bu tasarım (Şekil 1.6b) tasarımının bir türüdür (Şekil 1.6f).
- g) Kaynaklı Göz: Bu tasarım ağırlıklı olarak yatay yükün büyük olduğu moment çubukları (rod) gibi uygulamalarda kullanılır. Kaynak, uygun yöntem ile ısıtılma işleminden önce yapılmalıdır (Şekil 1.6g).
- h) Oval Göz: Bu göz tasarımı yatay ve düşey doğrultuda farklı yay katsayısına sahip kauçuk burçların kullanılmasına izin verir. Bu tasarım süspansiyon sistemlerinde özellikle yatay kuvvet girişlerinin büyüklüğünü azaltmak için geliştirilmiştir (Şekil 1.6h).



Şekil 1.6 Çeşitli göz tasarımları a) Yukarı dönük göz, b) Asker sargılı c) Düz uçlu d)Aşağı dönük göz e) Berlin göz f) Asker sargılı Berlin göz g) Kaynaklı göz, h) Oval göz (SAE, 1982).

### 1.2.1 Metalik Yaprak Yayların Hesap Yöntemi

Yaprak yaylar, eşit kalınlığa ve mukavemete sahip yaprakların bileşiminden oluşmuş kiriş uzunluğu boyunca düzgün gerilme dağılımı olan kiriş olarak düşünülebilir. Bu yaklaşım ile birçok yaprak yay için ön hesap yapılırken uygun düzeltme katsayılarının kullanılması ile yeterli kesinlikte sonuç alınabilmektedir. Bu yaklaşım ayrıca daha detaylı hesaplamalar için temel oluşturan bir yaklaşımdır (SAE, 1982).

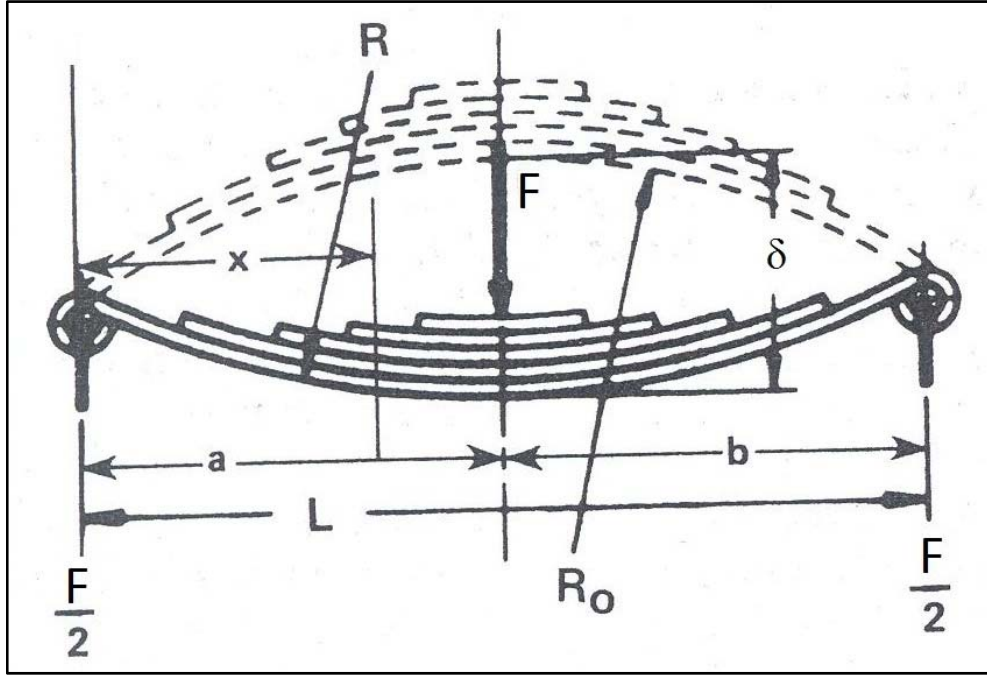
Şekil 1.7' de yüksüz ve yüklü durumda gösterilmiş simetrik yarı-eliptik bir yaprak yay görülmektedir. Bu yaprak yay hesabı için kullanılan denklemler Denklem 1.1 ile Denklem 1.8 arasında verilmiştir (SAE, 1982).

Yaprak yayın uzunluk oranı  $Y$ , Denklem (1.1) ile verilmiştir.

$$Y = \frac{b}{a} \quad (1.1)$$

Eğrilik yarıçapındaki değişim ile çökme hesabı için Denklem (1.2) verilmiştir.

$$\delta = \frac{L^2}{8} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (1.2)$$



Şekil 1.7 Simetrik yarı-eliptik yaprak yay. R: yüksüz durumda  $R_0$ :yüklü durumda eğrilik yarıçapı, F: yük, L: yaprak yay boyu, a:yaprak yay ilk yarısı, b: yaprak yay ikinci yarısı, x: yaprak yay boyunca herhangi bir uzaklıktaki kesit,  $\delta$ : çökme miktarı, h: yaprak kalınlığı (SAE, 1982).

Eğer çökme değeri biliniyorsa gerilme hesabı, E: Elastisite modülü,  $\delta$ : çökme miktarı, SF: Sertlik Faktörü olmak üzere Denklem (1.3) ile hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{4Eh}{L^2} \delta SF \quad (1.3)$$

Yaprak yaya gelen yük biliniyorsa herhangi bir x kesitinde oluşan gerilme hesabı I:atalet momenti olmak üzere Denklem (1.4) ile yayın ortasında oluşan gerilme hesabı ise Denklem (1.5) ile hesaplanabilir.

$$\sigma_x = \frac{xh}{4 \sum I_x} F \quad (1.4)$$

$$\sigma = \frac{ah}{4 \sum I} F = \frac{Lh}{8 \sum I} F \quad (1.5)$$

Yay karakteristiği yaya gelen yüke karşılık yayın yaptığı çökme miktarı olarak tanımlanır. Karakteristik hesabı için formül Denklem (1.6) verilmiştir.

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (1.6)$$

Yaylarda birim hacimde depolanabilen enerji miktarına hacimden faydalanma faktörü denir. Yaprak yaylar için hacimden faydalanma faktörü Denklem (1.7) ile verilmiştir.

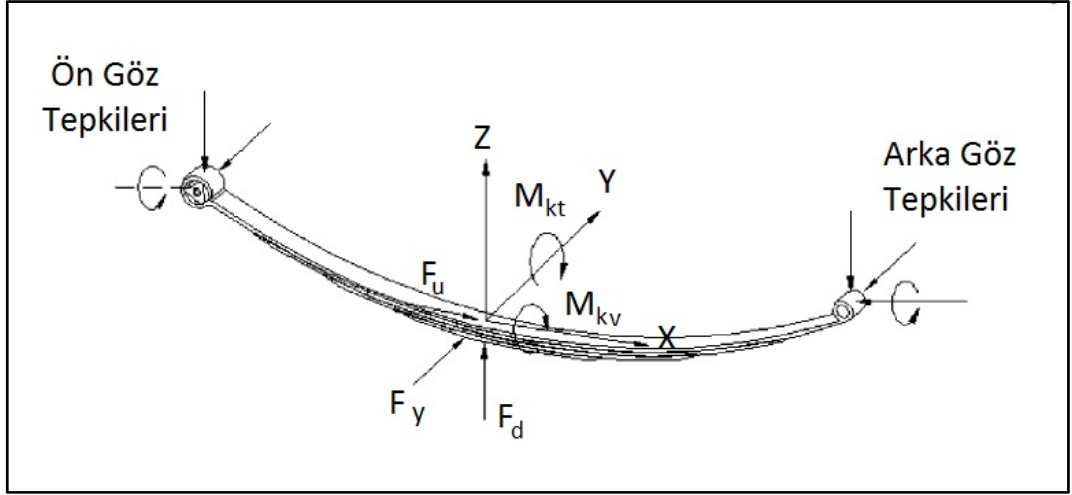
$$\frac{W_0}{V} = \frac{\sigma_{\text{maks}}^2}{6E} \quad (1.7)$$

#### *1.2.1.1 Sertlik Faktörü*

Yaprak yayın uzunluğu ve yay uçlarının şeklinden ötürü yapılan kimi kabuller ‘‘sertlik faktörü’’ ile hesaba katılmaktadır. Sertlik faktörü (SF) değerı 1 ila 1,5 arasında değişmektedir. Yay uzunluğu ve kalınlığı düzgün dağılımlı mukavemete sahip yaprak yay tasarımı oluşturacak şekilde seçildiği durumda sertlik faktörü 1 kabul edilir. Diğer taraftan tüm yapraklar ana yay ile eşit uzunlukta olduğunda veya tek yapraklı, sabit genişlik ve kalınlıkta yay olduğunda yani sabit kesit durumunda sertlik faktörü maksimum değerı olan 1,5 kabul edilir.

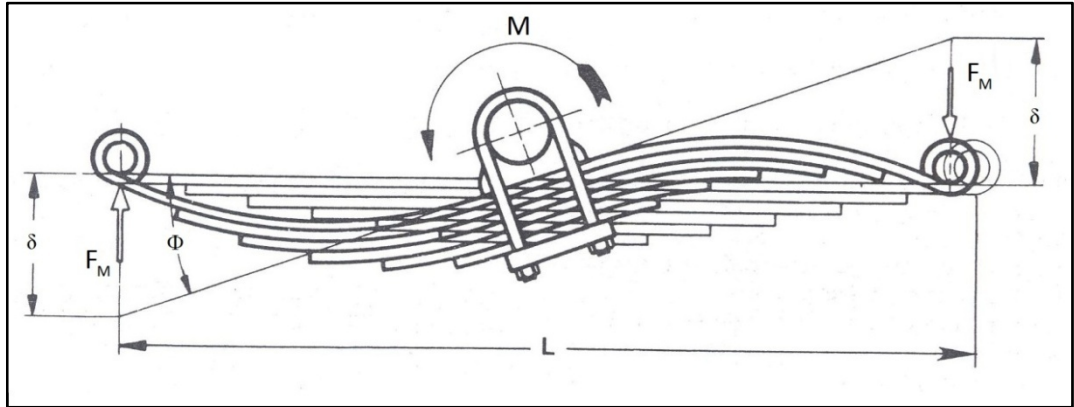
#### *1.2.2 Yaprak Yaya alışma Koşullarında Gelen Yükler*

Yaprak yay araç üzerinde kullanım sırasında maruz kaldığı yükler şekil 1. 8' de gösterilmiştir. Yaprak yaylar sadece düşey yüklere değil yatay yüklere ve momentlere de maruz kalmaktadır. Bunlardan ilki araç bir çukurdan ya da tümsekten geçtiğinde gerçekleşen ( $F_d$ ) düşey yöndeki yüktür. İkincisi aracın yavaşlaması ya da sratlenmesi sırasında yaprak yayı kıvırmaya alışan ( $M_{kv}$ ) kıvrıma (windup) momentı ve ( $F_u$ ) yay uzunlamasına etkiyen kuvvettir. Son olarak araç bir virajı aldığı sırada yaprak yayı katlamaya alışan ( $M_{kt}$ ) katlama (twist) momentı ve ( $F_y$ ) yanal kuvvettir.



Şekil 1.8 Yaprak yaya etkiyen yükler (Shokrieh ve ark., 2003).

Yaprak yaya uzunlamasına düşey düzlemede etki eden kıvrılma (windup) momenti yayın ortası bağlantısının üst ya da alt kısmından gelen uzunlamasına kuvvet tarafından oluşturulur. Yavaşlama anında yaprak yayın kıvrılma momenti etkisi altındaki durumu Şekil 1.9' da verilmiştir. Yaprak yayın taşıdığı düşey yük ve kıvrılma momentini hesaplamak için gerekli formüller Denklem (1.8) ile Denklem (1.15) arasında verilmiştir (SAE, 1982).



Şekil 1.9 Yavaşlama anında yaprak yayın kıvrılması (windup) (SAE, 1982).

Moment etkisiyle gözlerde oluşan kuvvet Denklem (1.8) ile verilmiştir.

$$F_M = \frac{M}{L} \quad (1.8)$$

Uçlarda gerçekleşen çökme miktarı, k yay katsayısı olmak üzere Denklem (1.9) ile verilmiştir.

$$\delta = \frac{2F_M}{k} = \frac{2M}{kL} \quad (1.9)$$

Yayda gerçekleşen kıvrılma açısı Denklem (1.10) ile verilmiştir.

$$\varphi \approx \tan \varphi = \frac{2\delta}{L} = \frac{4M}{kL^2} \quad [\text{rad}] \quad (1.10)$$

Süratlenme ya da yavaşlama durumunda kıvrılma momentine karşı direnç oluşturan kıvrılma direnci (kat sayısı) Denklem (1.11) ile verilmiştir.

$$\omega = \frac{M}{\varphi} = \frac{kL^2}{4} \quad (1.11)$$

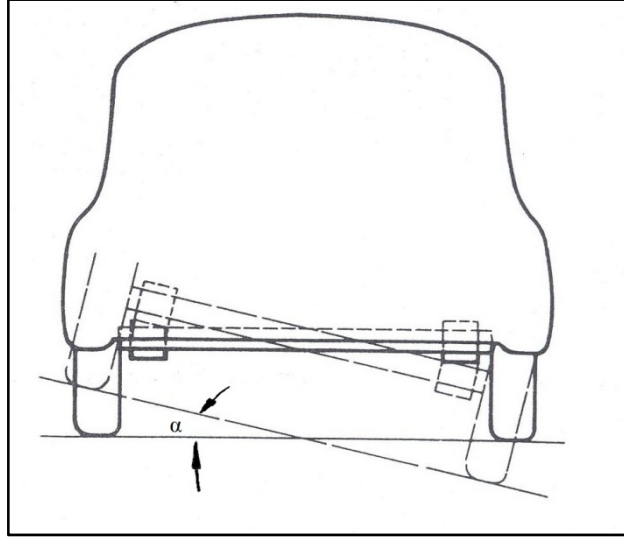
Yayda kıvrılma momentinden meydana gelen gerilme, E elastisite modülü, t yay kalınlığı, SF sertlik faktörü,  $\sigma$  çökmeden kaynaklanan gerilme,  $\delta$  çökme olmak üzere kıvrılma açısı cinsinden Denklem (1.12) ile moment cinsinden ise Denklem (1.13) ile verilmiştir.

$$\sigma_\omega = \frac{2Et}{L} \varphi SF \quad (1.12)$$

$$\sigma_\omega = \frac{8Et}{kL^3} M SF = \frac{2M}{kL} \frac{\sigma}{\delta} \quad (1.13)$$

Yaprak yayların bir virajı dönerken ya da aks üzerindeki bir tekerleğin engelle karşılaştığında katlanması Şekil 1.10' da verilmiştir.





Şekil 1.10 Dönme anında yaprak yayın katlanması (twist) (SAE, 1982).

Yaprak yay katlanmaya maruz kaldığında,  $\alpha$  katlanma açısı,  $l$  yay gözü ile ortası arası uzunluk ( simetrik yayda yay uzunluğunun yarısı),  $b$  yay genişliği ve  $t$  yay kalınlığı olmak üzere oluşan kesme gerilmesi Denklem (1.14) ile moment ise Denklem (1.15) ile yaklaşık olarak elde edilir (SAE, 1982).

$$\tau = \frac{1400 t \alpha}{l} \quad (1.14)$$

$$M = \frac{420 b t^3 \alpha}{l} \quad (1.15)$$

### 1.3 Kompozit Yaprak Yaylar

Günümüzde yaprak yaylar geleneksel olarak çelik malzemeden imal edilmektedir. Ancak doğal kaynakların korunması ve enerji tasarrufu amacı ile otomobil üreticileri son yıllarda ağırlık azaltılmasını temel amaç olarak ele almaktadır. Ağırlık azaltılması esas olarak daha iyi malzemelerin kullanılması, tasarım optimizasyonu ve daha verimli üretim süreçlerinin kullanılması ile mümkündür (Shivashankar ve Vijayarangan, 2006). Ağırlık azaltılması ile yakıt tasarrufu sağlamanın yanı sıra aracın sürüş karakteristiğinde ve konforunda da iyileşme elde edilir. Bahsi geçen bu

ağırlık azaltılması çabasında esas hedef, süspansiyon sistemi tarafından desteklenmeyen ağırlık olarak bilinen yaylandırılmamış kütlenin azaltılmasıdır. Otomobillerdeki süspansiyon sistemlerinde kullanılan yaprak yaylar örnek alınacak olursa, araç üzerindeki toplam yaylandırılmamış kütlenin % 10'u ila % 20'sine sahiptirler. Bu nedenle yaprak yaylar ağırlık azaltılmasında oldukça iyi potansiyele sahiptir (Rajendran ve Vijayarangan, 2001, Subramanian ve Sentilvelan, 2009). Günümüz kullanım alanlarından örnek vermek gerekirse; Daimler (Almanya) firmasının Mercedes-Benz'in Sprinter modeli olan hafif ticari aracının ön aks yaprak yayları 25 kg ağırlığındaki çeklik yerine 5,5 kg ağırlığındaki kompozit yaprak yaylar ile yer değiştirmiş durumdadır (Wood, 2014). Diğer bir örnek General Motors firmasının 1981 yılında Chevrolette C4 modelindeki uygulamasıdır. 10 tabakalı 18,6 kg ağırlığındaki çelik yaprak yay yerine, tek yapraklı 3,7 kg ağırlığında cam fiber yaprak yay kullanarak aynı yay katsayısını elde etmiş ve yaylandırılmamış kütleden yaklaşık 15 kg azaltmayı başarmışlardır. Günümüzde Corvette Coupe modelinde General Motors ön ve arka süspansiyon sisteminde kompozit yaprak yayları kullanmaya devam etmektedir (Wood, 2014).

Genel olarak yaylar, enerjiyi sönümleyip daha sonra geri vermesi için tasarlanan makina elemanlarıdır. Bundan dolayı malzemenin şekil değiştirme enerjisi yay tasarımında temel etken olmaktadır. Malzemenin özgül şekil değiştirme enerjisi Denklem (1.16) ile verilmiştir.

$$U = \frac{\sigma^2}{\rho E} \quad (1.16)$$

Burada  $\sigma$ ,  $\rho$  ve  $E$  sırasıyla, yay malzemesine ait mukavemet, yoğunluk ve elastisite modülüdür. Bu ilişkiden açıkça görüldüğü gibi düşük elastisite modülüne ve yoğunluğuna sahip bir malzeme yüksek özgül şekil değiştirme enerjisine sahip olmakta ve yay malzemesi için tercih edilmektedir (Al-Qureshi, 2001).

Yaylar için ideal malzemenin yüksek özgül şekil değiştirme enerjisine sahip olması gerekliliğinden yola çıkılırsa, fiber takviyeli kompozit malzemelerin yay

uygulaması için güçlü adaylar olduğu rahatlıkla görülmektedir (Al-Qureshi, 2001). Fiber takviyeli kompozit malzemelerin çeliklere nazaran önemli ölçüde hafiflik (çeliğe göre 5 kat daha fazla mukavemet / ağırlık oranına sahip olması) sağlar. Bunun yanında yüksek darbe kabiliyeti ile çalışma koşullarında oluşan gürültünün, titreşiminin, yol düzgünlüklerinin azaltılması ve bu sayede konforlu sürüş sağlaması, yüksek korozyon direnci, tabakalar arası sürtünmenin olmaması, üstün yorulma mukavemeti gibi avantajları da vardır (Talib, Ali, Goudah, Lah ve Golestaneh, 2010; Shokrieh ve Rezaei, 2003).

Motorlu taşıt üzerindeki bileşenler çalışma şartlarında dinamik yüklere maruz kaldığından yorulma hasarı, uğradıkları baskın hasar türüdür. Yaylar bu yüklerden diğer bileşenlere göre daha fazla etkilenir. Örneğin bir otomobilde kullanılan yaprak yaylar yol düzensizliklerinden gelen ani yükleri sönmülemenin yanı sıra, yandan gelen yükler, süratlenmede / yavaşlamada oluşan momentler gibi çeşitli dış yükleri de taşımaktadır. Bu yükler içerisinde en önemlisi değişken düşey yüklerdir (Shivashankar ve Vijayarangan, 2006; Shokrieh ve Rezaei, 2003; Senthilkumar ve Vijayarangan, 2007).

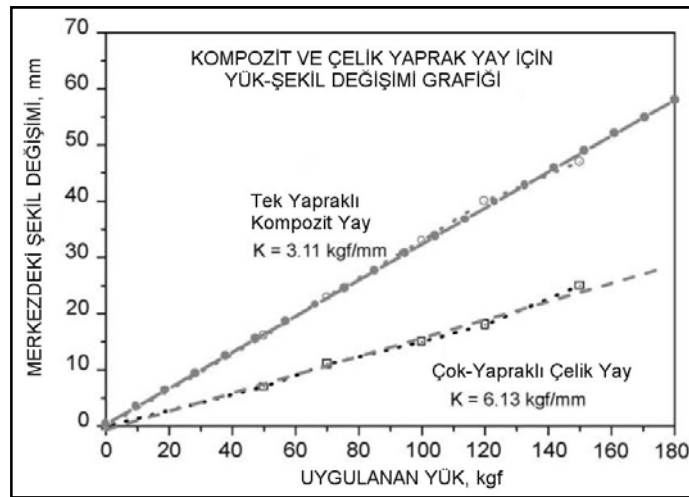
Yaprak yayın araç üzerine bağlanmasını sağlayan boşluklara yay gözü denmektedir. Yay gözlerinin önemi, yaprak yay tasarımında en az yayın kendisi kadardır. Ayrıca yay gözleri aks ile araç gövdesini birleştiren bir yapı elemanı olarak da görev yapar (Shokrieh ve Rezaei, 2003). Bundan ötürü bağlama gözlerinin mukavemeti, yaprak yayın süspansiyon sistemindeki performansında önemli rol oynar. Şöyle ki; yaprak yay süspansiyon sisteminde verimli çalışabilmesi için yaprak yay ile yay gözlerinin bağlantı mukavemeti, yayın kendi mukavemetinden daha üstün olmalıdır (Subramanian ve Senthilvelan, 2010; Subramanian ve Senthilvelan, 2010).

### ***1.3.1 Kompozit Yaprak Yaylar ile İlgili Literatür Çalışmaları***

Sancaktar ve Gratton (1999) çalışmalarında güneş enerjisi ile çalışan hafif bir aracın süspansiyon sistemini oluşturacak E-camı/epoksi kompozit yaprak yayın üretimini yapmıştır. Kompozit yaprak yay tek eksenli örgülü E-camı ile epoksi

reçineden imal edilmiştir. Kompozit yaprak yay 87,6 N/mm yay katsayısına (istenen 70 N/mm) ve 1179 g (izin verilen maksimum yay sistem ağırlığı 1300 g) sistem ağırlığına sahip olarak gerekli şartları sağlamıştır.

Literatürdeki diğer çalışmada bir jipde kullanılmak üzere 18,7 kg ağırlığındaki çelik yaprak yaya denk niteliklerde kompozit yaprak yay üretilmek istenmiştir. Beklenen özellikleri sağlayan polimer kompozit yaprak yay 3,5 kg ağırlığıyla önemli ölçüde hafiflik de sağlamıştır. Diğer taraftan çelik yay E-cami/epoksi yaya göre daha yüksek direngenliğe sahip olduğu Şekil 1.11' de görülmektedir. Çelik yaprak yay ile kompozit yaprak yay araç üzerinde test edildikten sonra kompozit yaprak yayın daha esnek olduğu görülmüştür. Testler süresince kompozit yaprak yayın gürültüyü ve yol düzgünlüklerini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Al-Qureshi, 2001).



Şekil 1.11 Çok yapraklı çelik yay ile tek yapraklı kompozit yayın direngenliği (Al-Qureshi, 2001).

Kompozit yaprak yayın araç üzerinde oluşturduğu yaylandırılmamış kütlelerin azaltılması amacı ile tasarım optimizasyonu için genetik algoritma yöntemini kullanılmış ve tasarım için sınır şartlarına göre yay ağırlığında % 75,6 ya varan azalma sağlanabilmiştir. Yaylandırılmamış kütlelerin azalması ile yorulma gerilmesinin yaprak yay üzerine olan etkisinin de azaldığı belirtilmiştir (Rajendran ve Vijayarangan, 2001).



Mahdi ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada eliptik kompozit yaylarda eliptiklik oranının yay performansına etkisini incelemişlerdir. Bunun için eliptik kompozit yaylar üretip sayısal analizini ve ömür testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak kompozit yayların ağırlıkta azalma sağlayarak çelik yayların yerini alabileceğini bildirmişlerdir.

Yedi-yapraklı çelik yaprak yay ile eşit boyut ve yaprak sayısında tasarlanmış yedi-yapraklı cam elyaf / epoksi kompozit yaprak yay üretilmiştir. E-camı / epoksi kompozit yaprak yay ile 3250 N yük altında yapılan deneyler ve ömür analizi sonuçlarında çelik yaprak yaya nazaran % 67,35 daha az gerilme oluştuğu, % 64,95 daha direngen olduğu, % 126,98 daha yüksek doğal frekansa sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında 13,5 kg ağırlığındaki çelik yaprak yaya göre 4,3 kg olan kompozit yaprak yay ile % 68,15 oranında hafiflik de sağlanmıştır. Test sonuçlarında kompozit yaprak yayda 222 MPa, çelik yaprak yayda ise 680,05 MPa maksimum bası gerilmesi görülmüştür. Cam fiber / epoksi kompozitin bası mukavemeti 680 MPa iken çeliğin akma mukavemeti 1175 MPa' dır. Buradan çelik yayın emniyet katsayısı 1,73 elde edilirken kompozit yayda bu değer 2,75 olmaktadır. Yorulma testi  $20 \times 10^3$  çevrim sürdürülmüş ve herhangi bir hasar görülmemiştir. Ömür analizi ile de kompozit yaprak yayın çelik yaya göre daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu belirtilmiştir (Sentilkumar ve Vijayarangan, 2007).

Yaprak yaylarda fiber oryantasyon açısının, enerji sönümlemesine etkisinin incelendiği bir çalışmada  $[(0/15)_3]$ ,  $[(0/90)_3]$  tek yönlü E-camı ve  $[(0/15)_3]$ ,  $[(0/90)_3]$  E-camı örgülü takviye malzemesi ile epoksi reçine ile vakum destekli reçine infüzyon (VARIM) yöntemi kullanılarak farklı kavis yüksekliklerinde üretilmiştir. Üretilen numunelere yay ortasından düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır.  $[(0/90)_3]$  oryantasyon açısıyla üretilen numunelerin darbe emme kapasitelerinin diğer numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, kavis yüksekliğinin çok etkisi olmamakla beraber düşük hızlı darbe davranışında kumaş yapısının ve fiber oryantasyon açısının önemli rol oynadığı bildirilmektedir (Shakour, Ropp ve Liu, 2009).

Subramanian ve Senthilvelan (2009), kompozit yaprak yay üzerine yaptıkları çalışmada termoplastik (PP-polipropilen) reçine ve cam elyaf takviye elemanı kullanmışlardır. Çalışmalarının esası takviye elemanının boyunun yaprak yayın mekanik özelliklerine nasıl etkidiğidir. Bunun için kısa ve uzun elyaf ile imal edilen yaprak yayları karşılaştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda, uzun elyaf ile PP reçine kristalizasyonunun iyileştiğini, termal bozunmanın azaldığını, statik yüklemelerde mukavemetin ve elastisite modülünün arttığını, dinamik testlerle de uzun elyafın kısımlara göre enerji depolama kapasitesinin daha gelişmiş olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla beraber darbe davranışı bakımından kısa elyafli yapı uzun elyafli yapıya göre daha iyidir. Enerji depolama kapasitesi bakımından ise uzun fiberli yayın kısa fiberli yaya göre yaklaşık %39 oranında daha fazla enerji depoladığı belirtilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada örülmüş cam elyaf/epoksi kompozit eliptik yay konu edilmiş, yorulma durumu için sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılmıştır. Çalışmada ayrıca kompozitin nötr eksenine etrafındaki cam elyaf tabakaları karbon elyaf ile değiştirilip hibritleştirilmenin etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak hibritleştirme ile oluşan gerilmelerin azaldığı, yorulma mukavemetinin arttığı ve şekil değişiminin azaldığı (yay kat sayısının arttığı) bildirilmiştir (Talib ve ark., 2010).

Subramanian ve Senthilvelan (2010) yaptıkları bir çalışmada polipropilen reçine ve cam takviyeli yaprak yayların yorulma performansına takviye elemanı uzunluğunun etkisini incelemiştir. Bunun için kısa, uzun ve takviye elemanı kullanmadan reçine enjeksiyon yöntemi ile yaprak yaylar üretmişlerdir. Sonuç olarak takviye elemanı olmadan ve kısa uzunlukta takviye elemanı kullanılarak üretilen kompozit yaprak yayların yay katsayılarında uzun fiber takviyeli yaprak yaylara göre % 10 düşüş olduğunu bildirmişlerdir. Buradan yola çıkarak takviye elemanı uzunluğunun kompozit yaprak yayın yorulma performansına önemli ölçüde etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Subramanian ve Senthilvelan (2011) yaptıkları diğer bir çalışmada ise polipropilen reçine ve iki farklı uzunlukta cam fiber takviyeli kompozit yaprak yayların kısa dönem sürünme davranışlarını incelemiştir. Yaptıkları sürünme testlerinin sonuçlarında kısa dönem sürünme açısından kompozit yaprak yayların yeterli olduğunu vurgulamaktadırlar.

Karbon/epoksi, cam/epoksi ve cam-karbon/epoksi olmak üzere üç farklı tipte kompozit yaprak yaylar üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda karbon-cam/epoksi yaprak yayların yay katsayısının diğerlerine göre daha yüksek olduğunu ancak sürüş konforu açısından dezavantajlı olduğunu bildirmişlerdir. Bunun dışında eliptiklik oranının yayın enerji emme kapasitesi üzerine önemli etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca  $1,15 \times 10^6$  çevrimden sonra yay stroğunun ilk stroktan sadece % 2 oranında azaldığını ve hasar görülmediğini bildirmişlerdir (Mahdi ve Hamouda, 2013).

### ***1.3.2 Kompozit Yaprak Yay Gözleri ile İlgili Literatür Çalışmaları***

Yaprak yay gözleri üretimde birleşik olarak ve yaydan ayrı olarak üretilip sonradan yapıştırarak iki farklı şekilde tasarlanmıştır. İkinci tasarımın kompozit yaprak yayın mukavemetini ve verimini arttırdığı saptanmıştır (Al-Qureshi, 2001).

Farklı bir çalışmada yaprak yay gözleri için de farklı iki türde bağlantı şekli incelenmiştir. Birinci grup yaprak yay için gözler imalat sırasında yapıştırma ile üretilmiş, diğer grupta ise yaprak yay imal edildikten sonra gözler cıvata ile birleştirilmiştir. Bu iki farklı göz bağlantısından cıvatalı bağlama yerine yapıştırma ile bağlanan gözlerin yaprak yayın performansını daha iyi etkilediği belirtilmiştir (Shivashankar ve Vijayarangan, 2006).

Üç yay gözünün tasarlandığı çalışmada, birleşik olarak tasarlanan yay gözlerinden ilk iki tasarım maksimum yük olan 150 kN statik yüke dayanabilmiş ancak yay gözleri ile yay gövdesi arasındaki kritik kesitte tabakalar arası ayrılmalar görülmüştür. İkinci göz tasarımındaki amaç kesme gerilmesinin fazla olduğu kesiti

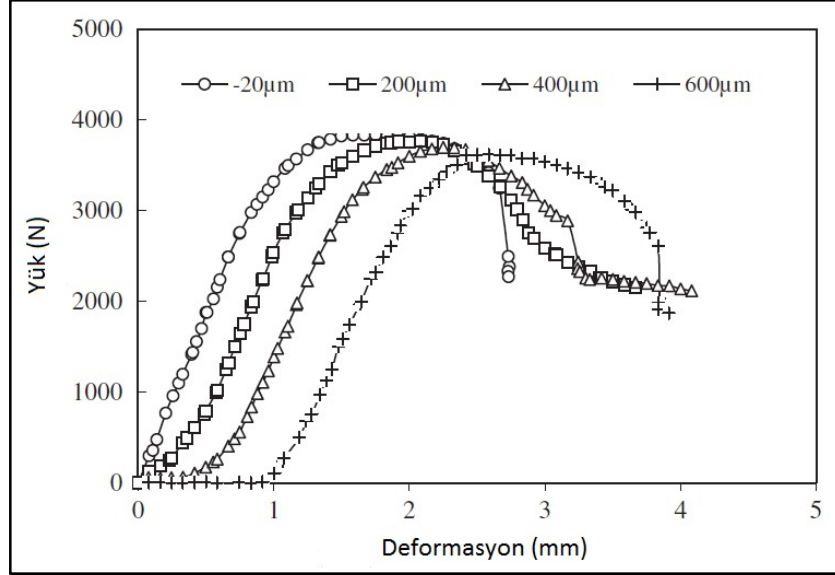


sararak desteklemektir. Statik test sonucunda kritik kesiti sarmanın, oluşan tabakalar arası ayrılmaları engellemediği görülmüştür. Tabakalar arası ayrılmalar sarma tabakası ile yay yüzeyi arasında oluşmuştur. Üçüncü göz tasarımı da 150 kN statik yüke dayanmış ve göz ucu açık bırakıldığından kritik kesitteki tabakalar arası yerel kesme gerilmelerinin oluşumu engellenmiştir. Böylece herhangi bir tabakalar arası ayrılma ya da hasar görülmemiştir. Testler sırasında açık tasarlanan gözde herhangi bir açılma de görülmemiştir (Hou, Cherruault, Jeronimidis, ve Mayer, 2007).

Subramanian ve Senthilvelan (2011), yaptıkları diğer bir çalışmada cam fiber takviyeli polipropilen kompozit yaprak yayda cıvatalı bağlantı için cıvata-delik boşluğunun bağlantı performansına etkilerini incelemiştir. Bunun için cıvata-delik arasında 200, 400, 600 µm boşluklar kullanılıp hem statik hem dinamik durumlarda testler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda;

- Test edilen bağlantı ile kompozit yaprak yayın yatak mukavemetinin statik yükleme durumunda yaprak yay tasarım yükünden beklenilenin üstünde olduğunu belirtmişlerdir. Hasar davranışı olarak kompozitin delik etrafından kopması ile yatak hasarı gözlemlenmiştir.
- Şekil 1.13' te statik yüklemde göz bağlantısının yatak mukavemetinde cıvata ile kompozit plaka deliği arasındaki boşluk grafiği verilmiştir. Bu boşluk değerinin oldukça önemli olduğu ve boşluk miktarının artması ile bağlantı mukavemetinin azaldığı belirtilmiştir.
- Düşük çevrim sayılarındaki yorulma durumunda bağlantı gözünün hasar davranışının statik yüklemde olduğu gibi göz deliklerinin etrafından kompozitin kopması ve yatak hasarı olarak bildirilmiştir. Yüksek çevrim sayılarında ise göz delikleri etrafından kompozitin yırtılması ile yatak hasarı olarak belirtilmiştir.
- Göz bağlantısına tek eksenli yük uygulanmasına rağmen göz şekliinden ötürü gelen yük iki eksen de etkidiğinden yatak yüzeyinde hem statik hem

de dinamik yükleme şartlarında matris çözülmesi (matrix fibrillation) ve deformasyonu gözlemlenmiştir.



Şekil 1.13 Göz bağlantısında bırakılan cıvata ile boşluk arası mesafe etkisi (Subramanian ve Senthilvelan, 2011).

Literatürde yer alan çalışmalardan görüldüğü gibi yaylandırılmamış ağırlığın dolayısıyla araç ağırlığının azaltılması açısından çelik yaprak yaylar yerine kompozit yaprak yayların kullanılmasının mümkün olduğu açıktır. Ancak kompozit yaprak yayın çakıllı / mıcırlı yol koşulları gibi kötü yol koşullarında düşük darbe direncinin (çakılların çarpması ile kompozit yaprak yayın ufalanması) en önemli dezavantajı olduğu da yine literatürde yer almaktadır (Shivashankar ve Vijayarangan, 2006). Yapılan literatür çalışmaları ve pazar araştırmaları endüstrinin maliyet yönünden etkili, minimum ağırlıkta ve yüksek mukavemete sahip kompozit yay ihtiyacı doğduğunu göstermektedir (Richard, 2003).

Bu doktora tezinin amacı hafif ticari araçların arka süspansiyon sistemlerinde kullanılan çelik yaprak yayların yerini alabilecek fiber takviyeli kompozit yaprak yayların geliştirilmesidir. Bu nedenle tezin ilk bölümünde metalik yaprak yaylar hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında kompozit yaprak yaylar hakkında literatürde yer almış çalışmalar incelemiştir. İkinci bölümde öncelikle polimer matrisli kompozit

yaprak yayın üretiminde kullanılan kalıp tasarımı ve imalatı verilmiştir. Arkasından vakum destekli reçine infüzyon (VARIM) yöntemi ile polimerik kompozit yaprak yayların üretilmesi verilmiştir. Tez kapsamında üretilen polimer kompozit yaprak yayların statik, yorulma testlerinin yapılacağı test cihazının tasarımı ve üretilmesi hakkında bilgiler tezin üçüncü bölümünde verilmiştir. Dördüncü bölümde uygulanan testler ve test sonuçları verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde kompozit yaprak yayın modellenmesi ve sayısal analizi verilmiştir. Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise test sonuçları ve sayısal analiz sonuçları literatürde yer alan çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

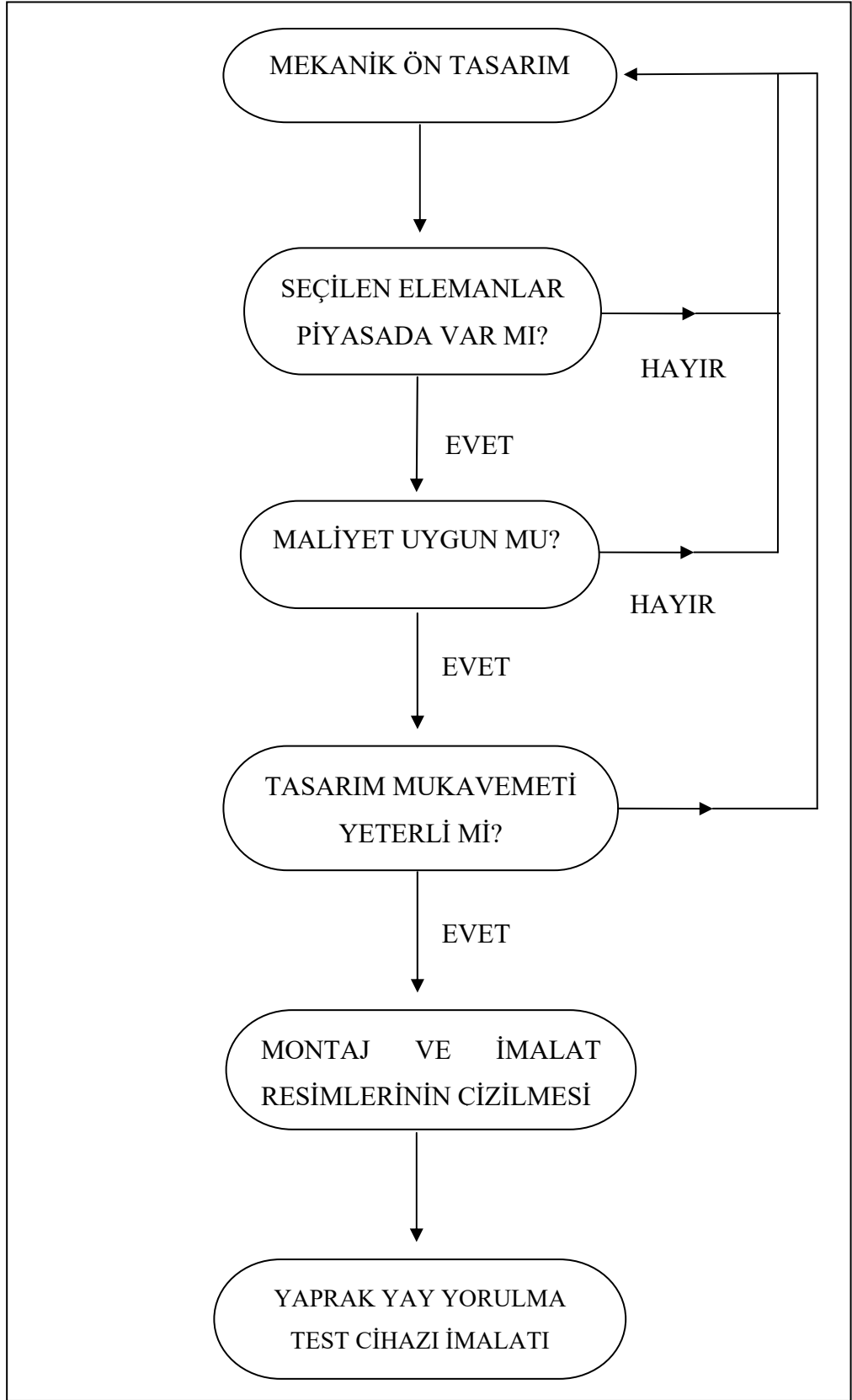
## **BÖLÜM İKİ**

### **YAPRAK YAY YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI**

Yaprak yay yorulma test cihazı tasarlanırken yaprak yayın araç üzerinde maruz kaldığı; süratlenme / yavaşlama, virajda dönme (sağ / sol) ve çukurdan / tümsekten geçme durumlarını tek tek, üçü aynı anda veya bu durumların ikili kombinasyonları (virajda dönerken çukura girme, yavaşlarken tümsekten geçme gibi) aynı anda gerçekleştirebilecek özgün bir tasarım ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Tasarım aşaması bitirildikten sonra yaprak yay yorulma test cihazı için Türk Patent Enstitüsü'ne 2014/0519 dosya numarası ile uluslar arası Avrupa Patent Ofisi' ne ise PCT/TR2015/000048 başvuru numarası ile patent başvurusu yapılmıştır

Yaprak yay yorulma test cihazı tasarım süreci akış şeması Şekil 2.1' de verilmiştir. Tasarım sürecinin her kademesinde geri dönüşler olduğundan bu akış şemasında her adımda kontrol yapılmaktadır. İlk olarak tasarımdaki özgünlük noktası olan yaprak yayın araç üzerinde maruz kaldığı tüm deformasyonları gerçekleştirebilecek bir mekanik ön tasarım yapılmıştır. Bu mekanik ön tasarım aşamasında test cihazının yapması gereken hareketler düşünülüp gerekli serbestliği ve yüklemeleri sağlayan mekanizma tasarlanmıştır. Bu mekanizmada kullanılacak makine elemanları araştırılmıştır. Piyasada hazır olarak elde edilecek ve üretimi yapılacak olan elemanlar belirlenmiştir. Bir sonraki adımda seçilen elemanlar için mukavemet kontrolü yapılmıştır. Mukavemetinin yeterli olduğu görüldükten sonra imalatı yapılacak elemanların imalat resimleri hazırlanmıştır. Test cihazının tüm bileşenleri için akış şemasında verilen süreç takip edilmiş ve gereklilikler sağlandıktan sonra cihaz genel montaj resmi ve detay resimleri çizilip üretime hazır hale getirilmiştir.

Yaprak yay yorulma test cihazı genel montaj resminin ve detay resimlerinin çizim planı Tablo 2.1' de verilmiştir. Gizlilik nedeni ile ilgili resimler teze eklenmemiştir.



Şekil 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı tasarım süreci akış şeması.

Tablo 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı çizim planı.

Resim Numarası	Resim Adı	Resmin Cinsi	Resim Boyutu	Resim Adedi
YDC-0-0-0-0-0	Yorulma Deney Cihazı	Genel Montaj Resmi	A0	1
YDC-1-0-0-0-0	Gövde Grubu	1.Grup Alt Montaj Resmi	A2	1
YDC-1-0-0-0-1	Alt Tabla	1.Grup 1.Kısım İmalat Resmi	A3	22
YDC-1-0-0-0-2	Kolon Grubu Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım Alt Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-1-0-0	Çift Kısa Kolon Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım 1.Organ Alt Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-1-1-0	Kısa Kolon Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım 1.Organ 1.Parça Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-1-1-1	Kısa Kolon	1.Grup 2.Kısım 1.Organ 1.Alt Parça İmalat Resmi	A4	
YDC-1-2-1-1-2	İç Kapak	1.Grup 2.Kısım 1.Organ 2.Alt Parça İmalat Resmi	A4	
YDC-1-2-1-1-3	Kısa Kolon Üst Kapak	1.Grup 2.Kısım 1.Organ 3.Alt Parça İmalat Resmi	A4	
YDC-1-2-1-0-2	Alt Kiriş	1.Grup 2.Kısım 1.Organ 2. Parça İmalat Resmi	A3	
YDC-1-2-2-0-0	Çift Uzun Kolon Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım 2.Organ Alt Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-2-1-0	Uzun Kolon Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım 2.Organ 1.Parça Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-2-1-1	Uzun Kolon	1.Grup 2.Kısım 2.Organ 1.Alt Parça İmalat Resmi	A3	
YDC-1-2-3-0-0	Kızak Tablası Alt Montaj	1.Grup 2.Kısım 3.Organ Alt Montaj Resmi	A3	
YDC-1-2-3-0-1	Kızak Tablası	1.Grup 2.Kısım 3.Organ İmalat Resmi	A3	
YDC-1-0-0-0-3	Üst Ara Kiriş	1.Grup 3.Kısım İmalat Resmi	A4	
YDC-1-0-0-0-4	Braket	1.Grup 4.Kısım Alt Montaj Resmi	A3	

Tablo 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı çizim planı (devamı).

Resim Numarası	Resim Adı	Resmin Cinsi	Resim Boyutu	Resim Adedi
YDC-1-4-0-0-1	Braket Yan Parçası	1.Grup 4.Kısım 1.Grup İmalat Resmi	A4	
YDC-1-4-0-0-2	Braket Üst Parçası	1.Grup 4.Kısım 2.Grup İmalat Resmi	A4	
YDC-1-4-0-0-3	Braket Payandası	1.Grup 4.Kısım 3.Grup İmalat Resmi	A4	
YDC-1-0-0-0-5	Üst Kısa Kiriş	1.Grup 5.Kısım İmalat Resmi	A3	
YDC-1-0-0-0-6	Üst Uzun Kiriş	1.Grup 6.Kısım İmalat Resmi	A3	
YDC-1-0-0-0-7	Üst Tabla	1.Grup 7.Kısım İmalat Resmi	A4	
YDC-1-0-0-0-8	Yan Kuşak	1.Grup 8.Kısım İmalat Resmi	A3	
YDC-0-0-0-0-2	Ara Bağlantı Parçası	2.Grup İmalat Resmi	A4	1
YDC-0-0-0-0-3	Ara Bağlantı Parçası	3.Grup İmalat Resmi	A4	1
YDC-0-0-0-0-4	Ara Bağlantı Parçası	4.Grup İmalat Resmi	A4	1
YDC-0-0-0-0-5	Piston Ucu	5.Grup İmalat Resmi	A3	1
YDC-0-0-0-0-6	Kuvvet Uygulama Aksı	6.Grup İmalat Resmi	A4	1
YDC-0-0-0-0-7	Yaprak Yay Bağlama Grubu	7.Grup Alt Montaj Resmi	A3	1
YDC-7-0-0-0-1	Yaprak Yay Tutucu Üst Parça	7.Grup 1.Kısım İmalat Resmi	A3	
YDC-7-0-0-0-2	Yaprak Yay Tutucu Alt Parça	7.Grup 2.Kısım İmalat Resmi	A4	
YDC-7-0-0-0-3	Kelepçe	7.Grup 3.Kısım İmalat Resmi	A4	4

Tablo 2.1 Yaprak yay yorulma test cihazı çizim planı (devamı).

Resim Numarası	Resim Adı	Resmin Cinsi	Resim Boyutu	Resim Adedi
YDC-7-0-0-0-4	Basma Yatağı	7.Grup 4.Kısım İmalat Resmi	A4	
YDC-0-0-0-0-8	Göz Bağlama Grubu	8.Grup Alt Montaj Resmi	A3	1
YDC-8-1-0-0-0	Göz Bağlama Aparatı	8.Grup 1.Kısım Alt Montaj Resmi	A4	5
YDC-8-1-0-0-1	Göz Bağlama Aparatı Alt Parça	8.Grup 1.Kısım 1.Organ İmalat Resmi	A3	
YDC-8-1-0-0-2	Göz Bağlama Aparatı Yan Parça	8.Grup 1.Kısım 2.Organ İmalat Resmi	A4	
YDC-8-1-0-0-3	Göz Bağlama Aparatı Kulak	8.Grup 1.Kısım 3.Organ İmalat Resmi	A4	
YDC-8-0-0-0-2	Göz Bağlama Pernosu	8.Grup 2.Kısım İmalat Resmi	A4	



## 2.1 Yaprak Yay Yorulma Test Cihazı için Tasarım Sınır Şartları

### 2.1.1 Metalik Yaprak Yay ve Yorulma Testi Uygulama Standartları

Kullanımdaki metalik yaprak yayların tasarımında sağlaması gereken minimum mekanik gereksinimler Amerikan Otomotive Mühendisleri Birliği (SAE) tarafından 1982 yılında yayınlanmış olan HS 788 kılavuzunda yer almaktadır. Bunun yanında yaprak yayın statik ve dinamik testlerinin uygulanmasında takip edilecek standartlar yine SAE tarafından 1990 yılında yayınlanmış olan J 1528 numaralı standartta yer almaktadır.

HS 788 yaprak yay kılavuzuna göre, yaprak yay ağırlığını minimumda tutabilmek için kullanılan yaprak yayın izin verilebilen maksimum gerilme değerinde çalışması beklenir. Bu maksimum gerilme değeri hafif ticari araçlar için 350 MPa ile 550 MPa aralığında tavsiye edilmiştir. Bununla beraber kabul edilen maksimum gerilme değerleri kullanılan yay malzemesinin minimum akma mukavemetini geçmemelidir (SAE, 1982).

Yorulma ömrü, yaprak yayın hasara uğramadan dayanabildiği çökme çevrim sayısı olarak tanımlanabilir. Uygulanan yorulma ömrü testi de yaprak yay tasarımının yeterliliğini görmek ve kalite kontrol için hızlı bir yöntemdir. Metalik yaprak yaylar için yorulma ömrü en az  $50 \times 10^3$  çevrim, tercihen  $100 \times 10^3$  çevrim olarak tavsiye edilmektedir (SAE, 1982).

Yorulma testinde uygulanacak olan çökme miktarına (test stroğuna) ön test ile karar verilmektedir.  $50 \times 10^3$  ila  $100 \times 10^3$  çevrim arasında yorulma ömrü istenen yaprak yaylara uygulanacak olan çökme miktarını belirlerken; yaprak yayın sıkıştırma (tasarım yükünden maksimum yüke kadar) yaptığı çökmeye, serbest bırakmada (tasarım yükünden test başlangıç yüküne kadar) yaptığı çökme miktarının yarısını eklemek sık uygulanan bir yöntemdir (SAE, 1982).

SAE J 1528 yaprak yayların yorulma testi standardına göre;

- i. Statik testin uygulanışı: yay sıfır konumundan maksimum çökme değerine kadar yüklenip ve geri sıfır konumuna dönmesi şeklindedir. Yük kademeli de uygulanabilir. Yük ve çökme ölçümleri yay ortasından yapılmalıdır.
- ii. Yorulma testi uygulanışı: minimum yorulma yükü değeri yayın tasarım yükünün yarısı olarak alınır. Maksimum yorulma yükü değeri ise aracın gerçekte yüklendiği maksimum yük ( genelde tasarım yükünün iki katıdır) alınarak belirlenir. Yorulma testinin doğrulanması için en az altı yay hasara uğrayana ya da istenilen çevrim sayısına ulaşana kadar test edilir.
- iii. Testi uygulayacak olan cihaz maksimum/minimum test yükünü  $\pm$  % 2 hassasiyetle uygulayabilmelidir.
- iv. Yaprak yay, test cihazına yay ortasından bağlanmalıdır.
- v. Uygulanan test frekansı 0,5 Hz ile 2 Hz arasında olmalıdır. Bunun yanında seçilen test frekansı test süresince yaprak yayın yüzey sıcaklığını  $90^{\circ}\text{C}$  üzerine çıkartmamalıdır.
- vi. Test süresince ölçüm yapılacak çevrim aralıkları  $2 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $10 \times 10^3$  olarak başlar. Sonrasında  $50 \times 10^3$  çevrime kadar her  $10 \times 10^3$  çevrimde bir ölçüm alınır. Test devam ediyor ise test sonlanana kadar her  $50 \times 10^3$  çevrimde bir ölçüm yapılmalıdır.
- vii. Tek tabakalı yaprak yaylarda yorulma testi, ilk çevrimdeki maksimum toplam çökmenin %5 ila %10 'undan fazla çökme olduğunda veya yaprak yayın çevrim sayısı  $50 \times 10^3$  iken taşıdığı yük ilk çevrimde taşıdığı yükün %5'inden az ise yaprak yay hasara uğramış kabul edilerek sonlandırılır.
- viii. Çok tabakalı yaprak yaylarda yorulma testi, ana yayda veya iki destek tabakasında gözle görünür çatlak oluşumu ile yaprak yay hasara uğramış kabul edilerek sonlandırılır.

### **2.1.2 Yaprak Yay Test Cihazı Özgün Tasarım Özellikleri**

Yaprak yay test cihazı yükleme kapasitesi 50 kN (5 ton)'dur. Cihaz iki adet 63 mm çaplı ve iki adet 80 mm çaplı olmak üzere toplam dört adet servo hidrolik silindir ile tahrik edilmektedir. Test cihazının yüklemdeki hassasiyeti SAE J 1528 standardına uygun olarak, uygulanan yükün  $\pm \% 2$ ' si bandında kalmaktadır.

Deney cihazında kullanılan servo-hidrolik pistonların her biri ayrı ayrı çalışabilmektedir. Pistonların çalışma kombinasyonları yaprak yayın gerçek kullanım (yol) koşullarında oluşan zorlanma durumlarını temsil etmektedir. Deney numunesi yayın, Y-ekseninde (düşey yönde) yaylanmasını temsil eden hareket için;  $\Phi 63$  mm' lik iki piston aynı anda eşit miktarda Y-ekseninde aşağı yukarı hareket eder. Deney numunesi yayın X- ekseninde dönme hareketini temsil için;  $\Phi 63$  mm olan iki piston aynı anda eşit miktarda zıt yönlerde ( biri aşağı hareket ederken diğeri eşit miktarda yukarı) hareket eder. Bu hareketi takiben pistonların hareket yönü değişir ve aynı miktarda ters yönde hareket ederler. Sonuç olarak aynı pistonun bir yukarı bir de aşağı hareket etmesi ile (diğer pistonun da ters hareketi ile) bir çevrim tamamlanmış olur. Bu pistonlar hem yukarı hem aşağı hareket sırasında yüktedir. Deney numunesi yayın Z-ekseni etrafında (sayfa düzlemine dik eksen) dönme hareketini temsil etmek için;  $\Phi 80$  mm olan iki piston aynı anda eşit miktarda zıt yönlerde ( biri aşağı hareket ederken diğeri eşit miktarda yukarı) hareket eder. Bu hareketi takiben pistonların hareket yönü değişir. Sonuç olarak aynı piston bir yukarı bir de aşağı hareket etmesi ile (diğer pistonun da ters hareketi ile) bir çevrim tamamlanmış olur. Bu pistonlardan biri aşağı yönde hareket edip yaya basarken (yükte) yayın ortasından bağlandığı aparatın diğer pistonu çarpmaması için piston yukarı yönlü (geri çekilme) boşta hareket eder.

Servo-hidrolik dört pistonun çalışma frekansı SAE J 1528 standardına uygun olarak 500 mm strok için minimum 0,5 Hz ile maksimum 2 Hz arasında (0,5 Hz ve 2 Hz dahil) ayarlanabilmektedir.

Deney süresince; uygulanan yük, yay ortasındaki deplasman, yay yüzeyindeki sıcaklık, çevrim sayısı ve zaman ölçülmektedir. Bu ölçümler deney sonlanana kadar hem liste halinde hem grafiksel olarak anlık görülebilmekte hem de deney sonlandıktan sonra raporlama alınabilmektedir. Deney sonuçları hem cihaz hafızasında kayıt edilebilmekte hem de taşınabilir bellek (USB) ile cihazdan alınabilmektedir.

Deney cihazı hem statik hem dinamik koşullarda çalışabilmektedir. Statik koşullarda çalışma şekli; cihaza bağlanan yay numunesi sıfır konumundan (yüksüz konumdan) maksimum çökmeye kadar yüklenip geri sıfır konumuna dönerek veya sıfır konumundan istenilen yük değerine kadar yükleme yapıp sıfır konumuna geri dönerek gerçekleşir. Yük kademeli de uygulanabilmektedir. Deney devam ederken yay numunesinin hasara uğraması halinde deney cihazı durmakta, o ana kadarki ölçümler saklanmaktadır.

Dinamik koşullarda çalışma şekli; deney cihazında bulunan dört pistonun her biri istenildiğinde yük istenildiğinde deplasman girdisiyle, istenilen çevrim sayısında (tekrarda) çalışabilmektedir.

Deney istenirse belli bir çevrim sayısına kadar istenirse numune dinamik olarak hasara uğrayana kadar sürdürülebilmektedir.

Aşağıdaki durumlardan biri gerçekleştiğinde;

- i. Deney devam ederken, başlangıcındaki (ilk çevrimdeki) maksimum çökmenin % 5' i ile % 10' undan fazla çökme olduğunda,
- ii. Çevrim sayısı  $50 \times 10^3$  iken yayın taşıdığı yük miktarında, deneyin başında (ilk çevrimde) taşıdığı yük miktarından % 5 azalma olmuş ise

yay hasara uğramış kabul edilir ve deney sonlandırılır. Deney sonlanana kadar elde edilen veriler kaydedilir.

### 2.1.3 Yaprak Yay Test Cihazı Kritik Elemanların Teorik Hesaplamaları

#### 2.1.3.1 Üst Uzun Kiriş Hesabı

Üst uzun kiriş için 260x260x10 boyutlarında St37 malzemeden kutu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.2 ile verilmiştir.

Tablo 2.2 St37 mekanik özellikleri (DIN 1710).

Elastisite modülü, E (MPa)	207x10 <sup>3</sup>
Akma gerilmesi, $\sigma_{Ak}$ (MPa)	230
Kopma gerilmesi, $\sigma_K$ (MPa)	330
Sürekli mukavemet değeri $\sigma_D^1$ (MPa)	170

Üst uzun kirişin statik ve dinamik durum için hesapları Denklem (2.1) - (2.8) kullanılarak yapılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W} \quad (2.1)$$

$$W = \frac{I}{y} \quad (2.2)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.3)$$

$$y = \frac{h}{2} \quad (2.4)$$

Burada;

$\sigma_e$  : Eğilme gerilmesi

$M_e$  : Eğilme momenti

W: Mukavemet momenti

I: Atalet momenti

b: Profil kenar uzunluğu

h: Profil yüksekliği

y: Tarafsız eksene uzaklığı şeklinde simgelenmektedir.

Sürekli mukavemet (yorulma) hesabı için Marin denklemi Denklem 2.5 kullanılır.

$$\sigma_D = \sigma_D^l \cdot k_y \cdot k_b \cdot k_g \cdot k_e \cdot k_d \cdot k_f \quad (2.5)$$

Burada;

$\sigma_D$  ; Makine elemanının sürekli mukavemet değeri,

$\sigma_D^l$  ; Malzemeye ait sürekli mukavemet değeri,

$k_y$  ; Yüzey düzgünlük faktörü,

$k_b$  ;Büyükölçüm faktörü,

$k_g$  ; Güvenilirlik faktörü,

$k_e$  ; Gerilme yığılması faktörü,

$k_d$  ; Sıcaklık faktörü,

$k_f$  ; Bilinmeyen etki faktörü şeklinde ifade edilmektedir.

Gerilme yığılması faktörü Denklem 2.6 ile hesaplanmaktadır.

$$k_e = \frac{1}{K_\zeta} = \frac{1}{1+q \cdot (K_t-1)} \quad (2.6)$$

Burada;

$K_\zeta$  ; Çentik faktörü,

q: Çentik hassasiyeti,

$K_t$  ; Teorik gerilme yığılma faktörü şeklinde ifade edilmektedir.

Üst uzun kiriş için Denklem (2.5)' te yer alan faktörler Tablo 2.3' te verilmiştir.

Tablo 2.3 Üst uzun kiriş için Marin Denklemi faktörleri.

Yüzey düzgünlük faktörü, $k_y$	0,82
Büyükölük faktörü, $k_b$	0,56
Güvenilirlik faktörü, $k_g$	0,814
Gerilme yığılması faktörü, $k_e$	Denklem (2.6)' dan
Sıcaklık faktörü, $k_d$	1
Bilinmeyen etki faktörü, $k_f$	1
Çentik hassasiyeti, $q$	0,4
Teorik gerilme yığılması faktörü, $K_t$	2

Statik durum emniyet katsayısı sünek malzemeler için Denklem (2.7) ile dinamik durum emniyet katsayısı ise Denklem (2.8) ile hesaplanır. Statik durum ve dinamik durum için kabul edilebilir emniyet katsayıları Tablo 2.4' te verilmiştir.

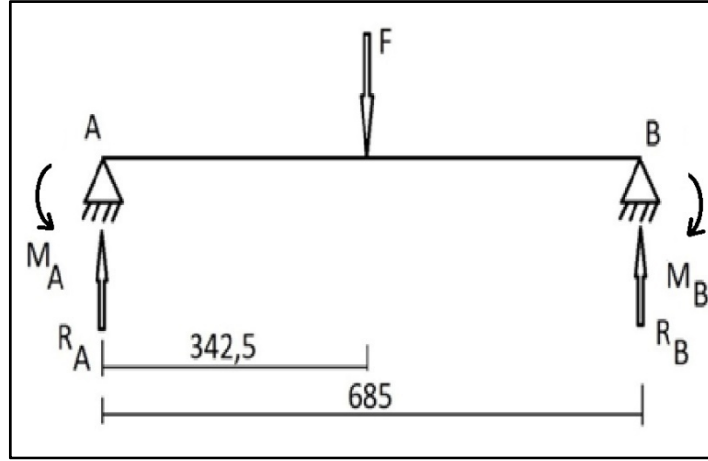
$$s_{\text{statik}} = \frac{\sigma_{Ak}}{\sigma_e} \quad (2.7)$$

$$s_{\text{dinamik}} = \frac{\sigma_D}{\sigma_e} \quad (2.8)$$

Tablo 2.4 Kabul edilebilir emniyet katsayısı değerleri. (Babalık, 2008).

Statik durum ( $T_{i\text{şletme}} < T_{rekristalizasyon}$ ) için	$1,2 \leq s_{\text{statik}}$
Dinamik( sürekli mukavemet) durum için	$2 \leq s_{\text{dinamik}}$

Üst uzun kirişin yükleme şeklini gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.2' de verilmiştir. Test cihazında iki adet üst uzun kiriş olduğundan her bir üst uzun kirişe gelen yük 17,5 kN' dur. Üst uzun kiriş cihaz üzerinde çift taraftan kaynaklı olduğundan lineer ekleme prensibi uygulanmıştır. Statik denge denklemleri, A ve B noktalarındaki ankastre mesnet sınır şartları kullanılarak çözüm yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 2.2 Üst uzun kiriş serbest cisim diyagramı.

Şekil 2.2' de verilen yükleme şartlarında üst uzun kirişte meydana gelecek eğilme gerilmesi için Denklem (2.1) – (2.4) kullanılır ve;

$$\sigma_e = 3,74 \text{ MPa}$$

elde edilir.

Statik emniyet katsayısı Denklem (2.7) ile;

$$s_{statik} = 61,2$$

elde edilir. Statik durum Tablo 2.4' te göre emniyetlidir.

Dinamik durum için Tablo 2.3, Denklem (2.5)-(2.6) ve Denklem (2.8) kullanılır.

$$\sigma_D = 43,3 \text{ MPa} \quad \text{ve}$$

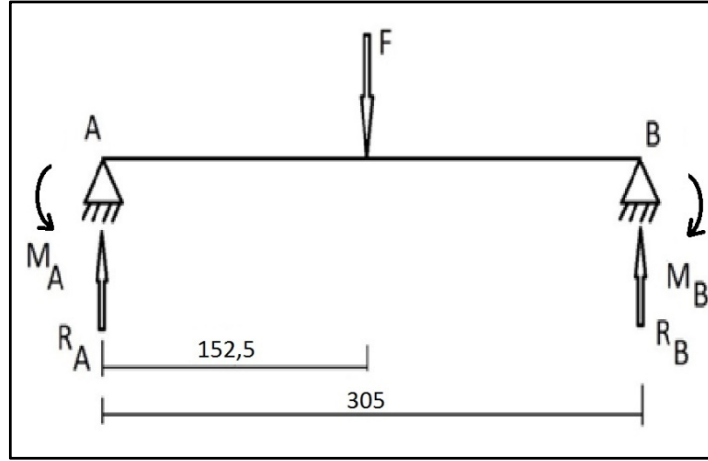
$$s_{dinamik} = 11,56$$

elde edilir. Dinamik durum için emniyet katsayısı Tablo 2.4' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.



### 2.1.3.2 Üst Kısa Kiriş Hesabı

Üst kısa kiriş için 260x260x10 boyutlarında St37 malzemeden kutu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.2' de verilmiştir. Üst kısa kirişin yükleme şeklini gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.3' te verilmiştir. Üst kısa kirişe gelen yükleme süratlenme/yavaşlama durumlarını oluşturmak için uygulandığından üst kısa kirişe gelen yük 35 kN' dur. Üst kısa kiriş cihaz üzerinde çift taraftan kaynaklı olduğundan lineer ekleme prensibi uygulanmıştır. Statik denge denklemleri, A ve B noktalarındaki ankastre mesnet sınır şartları kullanılarak çözüm yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 2.3 Üst kısa kiriş serbest cisim diyagramı.

Şekil 2.3' te verilen yükleme şartlarında üst kısa kirişte meydana gelecek eğilme gerilmesi için Denklem (2.1) – (2.4) kullanılır ve;

$$\sigma_e = 3,33 \text{ MPa} \quad \text{elde edilir.}$$

Statik emniyet katsayısı Denklem (2.7) ile;

$s_{statik} = 19,12$  elde edilir. Statik durum Tablo 2.4' te verilen değerlere göre emniyetlidir.

Dinamik durum için üst kısa kiriş, üst uzun kiriş ile aynı özelliklere sahip olduğundan Tablo 2.3' te verilen değerler geçerlidir. Tablo 2.3, Denklem (2.5)-(2.6) ve Denklem (2.8) kullanılarak;

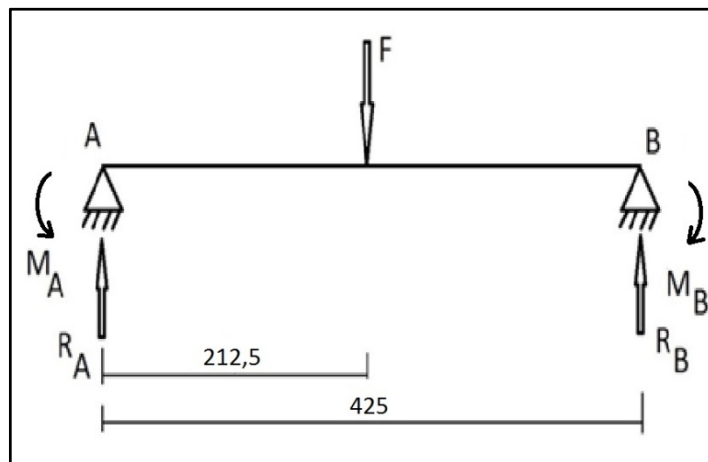
$$\sigma_D = 43,3 \text{ MPa} \quad \text{ve}$$

$$S_{\text{dinamik}} = 13$$

elde edilir. Dinamik durum için emniyet katsayısı Tablo 2.4' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.

### 2.1.3.3 Alt Kiriş Hesabı

Alt kiriş için 260x260x10 boyutlarında St37 malzemeden kutu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.2' de verilmiştir. Alt kirişin yükleme şartlarını gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.4' te verilmiştir. Test cihazı üzerinde dört adet alt kiriş olduğundan her bir alt kirişe gelen yük 8,75 kN' dur. Alt kiriş cihaz üzerinde çift taraftan kaynaklı olduğundan lineer ekleme prensibi uygulanmıştır. Statik denge denklemleri, A ve B noktalarındaki ankastre mesnet sınır şartları kullanılarak çözüm yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 2.4 Alt kiriş serbest cisim diyagramı.

Şekil 2.4' te verilen yükleme şartlarında alt kirişte meydana gelecek eğilme gerilmesi için Denklem (2.1) – (2.4) kullanılır ve;

$$\sigma_e = 1,16 \text{ MPa}$$

elde edilir.

Statik emniyet katsayısı Denklem (2.7) ile;

$$s_{statik} = 198,24$$

elde edilir. Statik durum Tablo 2.4' te göre emniyetlidir.

Dinamik durum için alt kiriş, üst uzun kiriş ile aynı özelliklere sahip olduğundan Tablo 2.3' te verilen değerler geçerlidir. Tablo 2.3, Denklem (2.5)-(2.6) ve Denklem (2.8) kullanılarak;

$$\sigma_D = 43,3 \text{ MPa} \quad \text{ve}$$

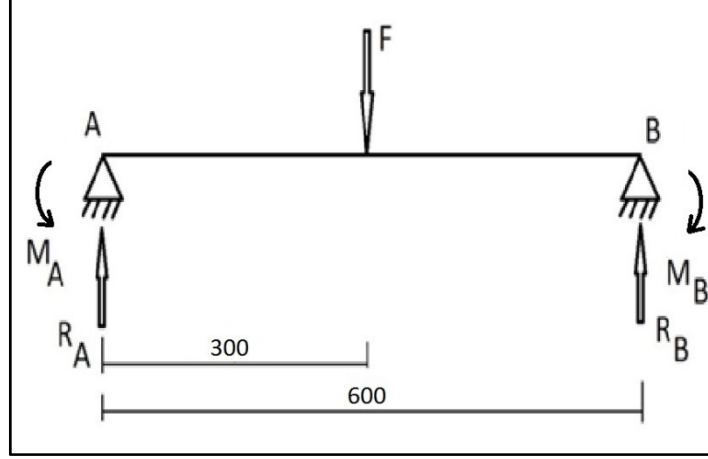
$$s_{dinamik} = 37,32$$

elde edilir. Dinamik durum için emniyet katsayısı Tablo 2.4' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.

#### 2.1.3.4 Tabla Hesabı

Tabla için 260x260x10 boyutlarında St37 malzemeden kutu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.2' de verilmiştir. Tablanın yükleme şartlarını gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.5' te verilmiştir. Test cihazı üzerinde iki adet tabla olduğundan her bir tablaya gelen yük 17,5 kN' dur. Tabla cihaz üzerinde çift taraftan kaynaklı olduğundan lineer ekleme prensibi

uygulanmıştır. Statik denge denklemleri, A ve B noktalarındaki ankastre mesnet sınır şartları kullanılarak çözüm yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 2.5 Tabla serbest cisim diyagramı.

Şekil 2.5' te verilen yükleme şartlarında tablada meydana gelecek eğilme gerilmesi için Denklem (2.1) – (2.4) kullanılır ve;

$$\sigma_e = 3,28 \text{ MPa} \quad \text{elde edilir.}$$

Statik emniyet katsayısı Denklem (2.7) ile;

$$s_{statik} = 70,2$$

elde edilir. Statik durum Tablo 2.4' te göre emniyetlidir.

Dinamik durum için tabla, üst uzun kiriş ile aynı özelliklere sahip olduğundan Tablo 2.3' te verilen değerler geçerlidir. Tablo 2.3, Denklem (2.5)-(2.6) ve Denklem (2.8) kullanılarak;

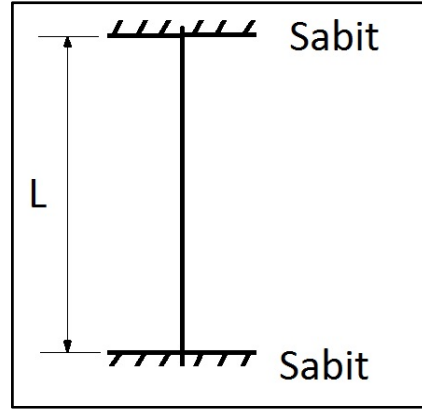
$$\sigma_D = 43,3 \text{ MPa} \quad \text{ve}$$

$$s_{dinamik} = 1,32$$

elde edilir. Dinamik durum için elde edilen emniyet katsayısı Tablo 2.4' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.

#### 2.1.3.5 Uzun Kolonların Hesabı

Uzun kolonlar için 260x260x10 boyutlarında 2500 mm uzunluğunda St37 malzemeden kutu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.2' de verilmiştir. Kolonların yükleme şartlarını gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6 Uzun kolon serbest cisim diyagramı.

Şekil 2.6' da verilen yükleme şartlarında kolonlarda meydana gelecek bası gerilmesi nedeniyle burkulma kontrolü için Denklem (2.9) – (2.15) kullanılır. Burkulma olayının elastik bölgede mi yoksa elastik olmayan bölgede mi gerçekleştiğini görmek için çubuğun narinlik katsayısının ( $\lambda$ ), çubuğun sınır narinlik katsayısı ( $\lambda_0$ ) ile arasındaki ilişkiye bakılır. Şekil 2.6' da görülen yükleme şartları için kritik burkulma boyu ( $L_k$ ), serbest boyun ( $L$ ), yarısı kadar alınır (Babalık, 2008)

$$i^2 = \frac{I}{A} \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{L_k}{i} \quad (2.10)$$

$$\lambda_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Ak}}} \quad (2.11)$$

Denklem (2.10) ve (2.11) den

$\lambda = 12,2 < \lambda_0 = 94,2$  olduğundan burkulma olayı elastik olmayan bölgede gerçekleşir ve malzemenin dayanabileceği en büyük burkulma yükü hesabı için Johnson yaklaşımı, Denklem (2.12) kullanılır (Babalık, 2008).

$$\sigma_{Br} = \sigma_{Ak} - \left(\frac{\sigma_{Ak}}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{E} \cdot \lambda^2 \quad (2.12)$$

Bası yükü ile statik durumda oluşan gerilme Denklem (2.13) ile hesaplanır.

$$\sigma_{Bası} = \frac{F_{Bası}}{A} \quad (2.13)$$

Burkulma açısından statik ve dinamik yüklemde emniyet katsayısı hesabı sırasıyla Denklem (2.14) ve Denklem (2.15) ile yapılır.

$$s_{statik} = \frac{\sigma_{Br}}{\sigma_{Bası}} \quad (2.14)$$

$$s_{dinamik} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{Bası}} \quad (2.15)$$

Statik durum ve dinamik durum için burkulmada kabul edilebilir emniyet katsayıları Tablo 2.5' te verilmiştir.

Tablo 2.5 Burkulma olayı için kabul edilebilir emniyet katsayısı değerleri (Babalık, 2008).

Burkulma kontrolü için	$3 \leq s$
Burkulma kontrolü (büyük makineler) için	$10 \leq s$

Denklem (2.12) ve (2.13) kullanılarak burkulmaya neden olacak gerilme değeri ve profilde meydana gelen bası gerilmesi;

$$\sigma_{Br} = 229 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Bası} = 0,875 \text{ MPa}$$

elde edilir.

Statik durum için emniyet katsayısı Denklem (2.14) ile

$$s_{statik} = 260$$

elde edilir. Statik durum Tablo 2.5' te verilen kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Uzun kolon için Denklem (2.5)' te yer alan faktörler Tablo 2.6' de verilmiştir.

Tablo 2.6 Uzun kolon için Marin Denklemi faktörleri.

Yüzey düzgünlük faktörü, $k_y$	0,82
Büyüklik faktörü, $k_b$	0,56
Güvenilirlik faktörü, $k_g$	0,814
Gerilme yığılması faktörü, $k_e$	Denklem (2.6)' dan
Sıcaklık faktörü, $k_d$	1
Bilinmeyen etki faktörü, $k_f$	1
Çentik hassasiyeti, $q$	0,4
Teorik gerilme yığılması faktörü, $K_t$	2,7

Tablo 2.6, Denklem (2.5)-(2.6), Denklem (2.12) ve Denklem (2.15) kullanılarak;

$$\sigma_D = 37,8 \text{ MPa} \quad \text{ve}$$

$$s_{dinamik} = 43,2$$

elde edilir. Dinamik durum için emniyet katsayısı Tablo 2.5' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.

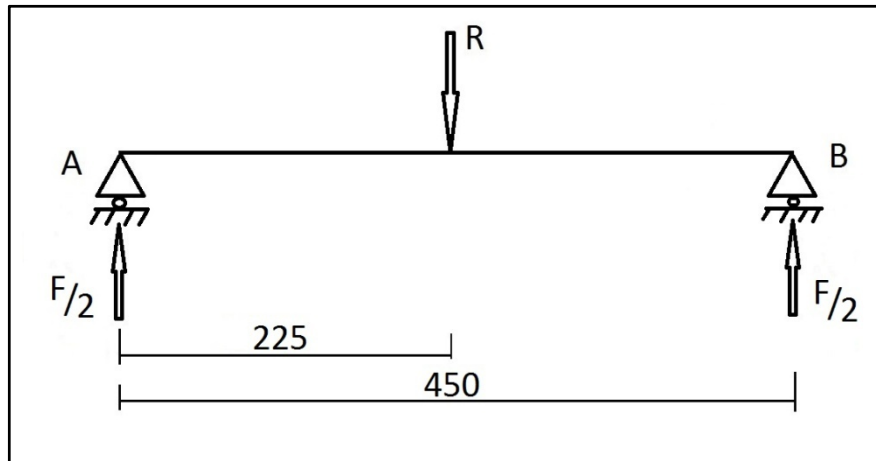
### 2.1.3.6. Kuvvet Uygulama Çubuğu Hesabı

Kuvvet uygulama çubuğu için 100 mm çapında 34CrNiMo6 alaşımlı çelik malzemeden içi dolu profil kullanılacaktır. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 2.7' de verilmiştir.

Tablo 2.7 34CrNiMo6 mekanik özellikleri (DIN 17200).

Akma gerilmesi, $\sigma_{Ak}$ (MPa)	900
Kopma gerilmesi, $\sigma_K$ (MPa)	1100
Sürekli mukavemet değeri $\sigma_D^1$ (MPa)	550

Kuvvet uygulama çubuğunun yükleme şartlarını gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 2.7' de verilmiştir. Test cihazının maksimum yükleme kapasitesi 35 kN ve cihaz üzerinde bir adet kuvvet uygulama çubuğu olduğundan gelen yük 35 kN'dur.



Şekil 2.7 Kuvvet uygulama çubuğu serbest cisim diyagramı.



Şekil 2.7' de verilen yükleme şartlarında kuvvet uygulama çubuğunda meydana gelecek eğilme gerilmesi hesabı için Denklem (2.1) – (2.2), (2.4) ve dairesel kesit için atalet momenti Denklem (2.16) kullanılarak

$$I = \frac{\pi.D^4}{64} \quad (2.16)$$

$\sigma_e = 81 \text{ MPa}$  elde edilir.

Statik emniyet katsayısı Denklem (2.7) ile;

$$s_{statik} = 11,1$$

elde edilir. Statik durum Tablo 2.4' de göre emniyetlidir.

Kuvvet uygulama çubuğu için Denklem (2.5)' te yer alan faktörler Tablo 2.8' de verilmiştir.

Tablo 2.8 Kuvvet uygulama çubuğu için Marin Denklemi faktörleri.

Yüzey düzgünlük faktörü, $k_y$	0,68
Büyükölçüm faktörü, $k_b$	0,6
Güvenilirlik faktörü, $k_g$	0,814
Gerilme yığılması faktörü, $k_e$	Denklem (2.6)' dan
Sıcaklık faktörü, $k_d$	1
Bilinmeyen etki faktörü, $k_f$	1
Çentik hassasiyeti, $q$	1
Teorik gerilme yığılması faktörü, $K_t$	3

Tablo 2.8, Denklem (2.5)-(2.6) ve Denklem (2.8) kullanılarak;

$\sigma_D = 182,6 \text{ MPa}$  ve

$s_{dinamik} = 2,24$  elde edilir. Dinamik durum için Tablo 2.4' e göre emniyetli olduğundan seçilen profil uygundur.

Üretimi biten yaprak yay yorulma test cihazının resmi Şekil 2.8' de verilmiştir.



Şekil 2.8 Yaprak yay yorulma test cihazı.

## BÖLÜM ÜÇ

### DÜZ UÇLU KOMPOZİT YAPRAK YAY VE GÖZ BAĞLANTISI ÜRETİMİ

#### 3.1 Kompozit Yaprak Yay Kalıp Tasarımı

Kompozit yaprak yaylar vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARİM) kullanılarak üretilecek olduğundan öncelikle üretim yöntemine uygun bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıp boyutları, üretim sonrası kalıptan çıkacak kompozit yaprak yayların boy, en ve kavisi çelik yaprak yaya eşit olacak şekilde alınmıştır. Şekil 3.1' de görüldüğü gibi üretim kolaylığı ve verimliliği açısından kalıp, aynı anda beş adet yaprak yay üretilebilecek tasarıma sahiptir. Üretim sonrası kalıptan çıkarılacak kompozit yapı, istenilen genişlikte kesilerek yaprak yay numuneleri elde edilmiştir. Kalıp tasarımında çizilen teknik resimlerin çizim planı Tablo 3.1' de verilmiştir. Kompozit yaprak yaylar düz uçlu üretildiğinden hem test cihazına hem de araç üzerine montajını sağlamak için göz bağlantısı tasarımı ve üretimi de yapılmıştır.



Şekil 3.1 Kompozit yaprak yay VARİM kalıbı.

Tablo 3.1 Yaprak yay VARIM kalıbı çizim planı.

Resim Numarası	Resim Adı	Resmin Cinsi	Resim Boyutu	Resim Adedi
YYK-0-0	Yaprak Yay VARIM Kalıbı	Genel Montaj Resmi	A3	1
YYK-0-1	Uzun Kolon Alt Montaj	1. Grup Alt Montaj Resmi	A4	1
YYK-1-1	Ayak	1. Grup 1. Kısım İmalat Resmi	A4	2
YYK-1-2	Uzun Kolon	1. Grup 2. Kısım İmalat Resmi	A4	
YYK-0-2	Kısa Kolon Alt Montaj	2. Grup Alt Montaj Resmi	A4	1
YYK-2-1	Kısa Kolon	2. Grup 1. Kısım İmalat Resmi	A4	1
YYK-0-3	Yaprak Yay Alt Kalıp	3. Grup İmalat Resmi	A3	1
YYK-4-0	Cetvel Sürgüsü Alt Montaj	4. Grup Alt Montaj Resmi	A4	1
YYK-4-1	Sürgü	4. Grup 1. Kısım İmalat Resmi	A4	2
YYK-4-2	Kovan Yatağı	4. Grup 2. Kısım İmalat Resmi	A4	
YYK-5-0	Göz Kovanı Alt Montaj	5. Grup Alt Montaj Resmi	A4	1
YYK-5-1	Göz Kovanı	5. Grup 1. Kısım İmalat Resmi	A4	2
YYK-5-2	Kovan Kapağı	5. Grup 2. Kısım İmalat Resmi	A4	
YYK-0-6	Yaprak Yay Üst Kalıp	6. Grup İmalat Resmi	A3	1

### 3.2 Kompozit Yaprak Yayların Üretimi

Kompozit yaprak yayların üretim sonrası boyu ve eni araç üzerindeki konstrüksiyonu bozmaması için çelik yaprak yay ile aynı alınmıştır. Yaprak yay kalınlığı ise çelik yaprak yay karakteristiğini sağlayacak ölçüde olmalıdır. İlk üretim kalınlığı kullanılan malzemelerin üretici firmalarından elde edilen mekanik özellikler ile teorik hesaplama yapılarak belirlenmiştir. Sonrasında uygulanan statik testlerden alınan sonuçlar kullanılarak kompozit yaprak yay kalınlığı tespit edilmiştir. Kompozit yaprak yayın referans boyutları ve ağırlığı Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2 Çift yapraklı çelik yaprak yayın özellikleri.

Yay katsayısı, k (N/mm)	Boy, L (mm)	En, b (mm)	Kavis (mm)	Ağırlık (kg)
97 ±7	1346	70	116	26

Kompozit yaprak üretiminde kullanılan malzemeler şunlardır: Hunstman firmasının ürettiği XB 3585 epoksi ve XB 3486 sertleştirici, Cam Elyaf firmasının ürettiği 600 gr/m<sup>2</sup> [0/90<sup>0</sup>] (plain woven) E-camı dokuma kumaş ve DowAksa firmasının ürettiği 200 gr/m<sup>2</sup> [0/90<sup>0</sup>] (plain woven) karbon dokuma kumaş. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3.3' te verilmiştir.

Tablo 3.3 Kompozit yaprak yay üretiminde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	E-Camı [0/90 <sup>0</sup> ] Dokuma	Karbon [0/90 <sup>0</sup> ] Dokuma	Epoksi Reçine
Mekanik Özellik			
Elastisite Modülü, E (GPa)	81,5	240	2,8
Çekme Mukavemeti, $\sigma$ (MPa)	2.306	3.800	72
Yoğunluğu, $\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	2.400	1.780	1.175
Maksimum şekil değişimi, $\epsilon$ (%)	2,97	1,6	6

### 3.2.1 Kompozit Yaprak Yayların Özellikleri için Hesaplamalar

Kompozit yaprak yaylardan istenilen karakteristik değerler için, üretim sonrası kalınlığın ne olması gerektiği ön hesap ile bulunmuştur. Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin (SAE 788, 1982) standartı dikkate alarak Denklem (3.1) - (3.2) ile yay kalınlığı hesaplanmıştır. Yaprak yayda ortaya çıkacak eğilme gerilmesi için de SAE 788 standardından alınan Denklem (3.3) kullanılmıştır.

$$\sum I = \frac{k.L^3}{32.E.SF} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{b.h^3}{12} \quad (3.2)$$

$$\sigma_e = \frac{L.h.F_{maks}}{8.I} \quad (3.3)$$

Denklem (3.1) - (3.3)' te yer alan terimler sırası ile;

I: Yaprak yayın atalet momenti (N/mm<sup>4</sup>)

k: Yay katsayısı (N/mm),

L: Yay boyu (mm),

E: Elastisite modülü (N/mm<sup>2</sup>)

SF: Emniyet katsayısı (SAE 788 e göre tek yapraklı sabit genişlik ve kalınlıktaki yaprak yayları için SF 1,5 alınır.)

b: yaprak yay genişliği (mm)

h: yaprak yay kalınlığı (mm)

$\sigma_e$ : Eğilme gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>)                      şeklinde simgelenmiştir.

Denklem (3.1) 'de verilen ilişkide malzemenin elastisite modülü yer almaktadır. Üretilen kompozit malzemenin elastisite modülü hesabı için ise denklem (3.4) kullanılmıştır. Bu denklem kompozitler için temel yöntemlerden biri olan karışım kuralı olmakla beraber, takviye malzemesinin oryantasyon açısının etkisi de denklemde Krenchel verimlilik katsayısı kullanılarak göz önüne alınmıştır (Harris, 1999).

$$E_1 = \eta_\theta (E_f \cdot V_f) + E_m \cdot V_m \quad (3.4)$$

Burada;

$E_1$ : Kompozitin yük doğrultusundaki elastisite modülü,

$\eta_\theta$ : Krenchel verimlilik katsayısı (  $[0/90^0]$  oryantasyon için 0,5 alınır),

$E_f$ : Cam fiberin elastisite modülü,

$V_f$ : Cam fiberin hacimsel oranı,

$E_m$ : Matrisin (epoksi) elastisite modülü,

$V_m$ : Matris hacimsel oranı olarak ifade edilmiştir.

Kompozit yaprak yayın elastisite modülü hesabı için fiber ve matris hacimsel oranlarının bilinmesi gereklidir. Fiber ve matris hacimsel oranlarının hesabı için sırasıyla Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) kullanılır (Jones, 1999).

$$v_f = \frac{\rho_{komp}}{\rho_f} \cdot m_f \quad (3.5)$$

$$v_f + v_m = 1 \quad (3.6)$$

Burada;

$V_f$ : Fiber hacimsel oranı,

$V_m$ : Matris hacimsel oranı,

$\rho_{komp}$ : Kompozitin yoğunluğu,

$m_f$ : Fiber kütle oranı,

$\rho_f$ : Fiberin yoğunluğu şeklinde simgelenmiştir.

Kompozitin yoğunluğunun, fiber ve matrisin kütle oranlarının hesabı için Denklem (3.7)- (3.11) kullanılır (Jones, 1999).

$$\rho_{comp} = \rho_f \cdot m_f + \rho_m \cdot m_m \quad (3.7)$$

$$m_f = \frac{n \cdot M_f}{M_{komp}} \quad (3.8)$$

$$m_m = \frac{n \cdot M_m}{M_{komp}} \quad (3.9)$$

$$M_f = V_{komp} \cdot \rho_f \quad (3.10)$$

$$M_m = V_{komp} \cdot \rho_m \quad (3.11)$$

Burada;

$M_f$ : Fiberin kütlesi,

$M_m$ : Matrisin kütlesi,

$M_{komp}$ : Kompozit kütlesi,

$V_{komp}$ : Kompozitin hacmi,

$\rho_f$ : Fiberin yoğunluğu,

$\rho_m$ : Matrisin yoğunluğu,

$n$ : Tabaka sayısı anlamındadır.

Tablo 3.4' te ön hesap sonucu elde edilen elastisite modülleri verilmiştir.

Tablo 3.4 Ön hesap sonucu kompozit yaprak özellikleri.

	Elastisite modülü, $E_1$ (MPa)	Yay kalınlığı, $h$ (mm)
E-camı/epoksi	23.670	31,1 < $h$ < 33,7
Karbon/epoksi	67.260	22,7 < $h$ < 23,8
E-camı-karbon/epoksi	33.630	28,5 < $h$ < 29,9

İlk üretim öncesi kompozit yaprak yay kalınlığının ön hesabında, E-camı/epoksi ve karbon/epoksi yaprak yaylar için fiber hacimsel oranı % 55, matris hacimsel oranı % 45 kabul edilmiştir. E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylarda ise fiber hacimsel



oranı % 50 E-camı, % 5 karbon ve yine % 45 matris olarak kabul edilmiştir. Takviye malzemesi ve matris hacimsel oranlarındaki kabul, vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile ortalama olarak elde edilen hacimsel oranlara dayanmaktadır. Ön hesap sonucu elde edilen yay kalınlıkları Denklem (3.1), elastisite modülleri Denklem (3.4) ile hesaplanmış ve sonuçları Tablo 3.4' te verilmiştir.

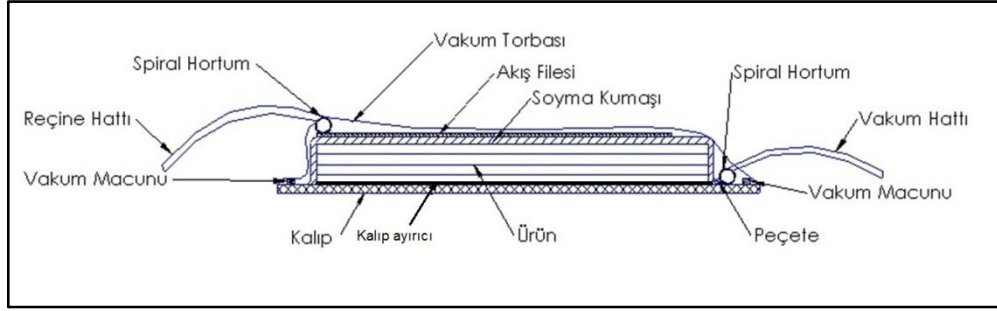
### 3.2.2 Kompozit Yaprak Yayların VARIM ile Üretimi

Şekil 3.2' de hazırlanan üretim hattı görülmektedir. Tasarlanan kalıba uygun olarak bir şablon hazırlanmış ve takviye elemanı kumaşlar bu şablona göre kesilerek tabaka tabaka kalıba serilmiştir.



Şekil 3.2 VARIM ile üretime hazırlık aşaması.

Düz uçlu kompozit yaprak yay üretimi için teorik hesap ile elde edilen ve Tablo 3.4' te verilen aralıktaki kalınlık değerleri referans alınmıştır. Bu kalınlıkları sağlayacak tabaka sayısı E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi hibrit kompozit yaylar için sırasıyla  $[0/90]_{63}$ ,  $[0/90]_{100}$ ,  $[(0/90)_6^{Karbon}(0/90)_{45}^{Cam}(0/90)_6^{Karbon}]$  olarak hazırlandıktan sonra vakum takviyeli reçine transfer metodu (VARIM) ile üretim için gerekli elemanlar uygulanmıştır. Şekil 3.3' te VARIM ile üretim elemanları sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3 VARIM ile üretim elemanları.

Bu elemanlar sırasıyla; son ürün ile diğer VARIM elemanlarının üretim sonrası bir birinden ayrılmasını sağlayan soyma kumaşı, ürünün kalıptan ayrılmasını sağlayan kalıp ayırıcı, reçinenin hızlı ilerlemesini sağlayan akış filesi, akış filesinin üzerine reçinenin içinden geçtiği spiral hortum, reçine hattı, karşı tarafa reçineyi çeken spiral hortum ve vakum hattı şeklindedir. Reçinenin çekilmesi için vakum tarafında spirale sarılan breather yerine peçete kullanılmıştır. Diğer taraftan reçinenin hazırlanmasında firma kullanım kılavuzunda belirtilen oranlar dikkate alınarak % 100 reçineye % 33 sertleştirici dahil edilerek karıştırılmıştır.

Üretim aşamasından bir görüntü Şekil 3.4' te verilmiştir. Reçine verilme işlemi ardından kompozit, 80 °C' de 8 saatlik kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme sonrası kalıptan çıkarılmış ürün Şekil 3.5' te gösterilmiştir. Kalıptan çıkan kompozit yaylar su jeti ile istenilen ölçülerde kesilerek numune üretimi tamamlanmıştır. Kesim işleminden bir görüntü Şekil 3.6' da kesim sonrası üretimi bitmiş bir E-camı/epoksi düz uçlu yaprak yay ise Şekil 3.7' de verilmiştir.



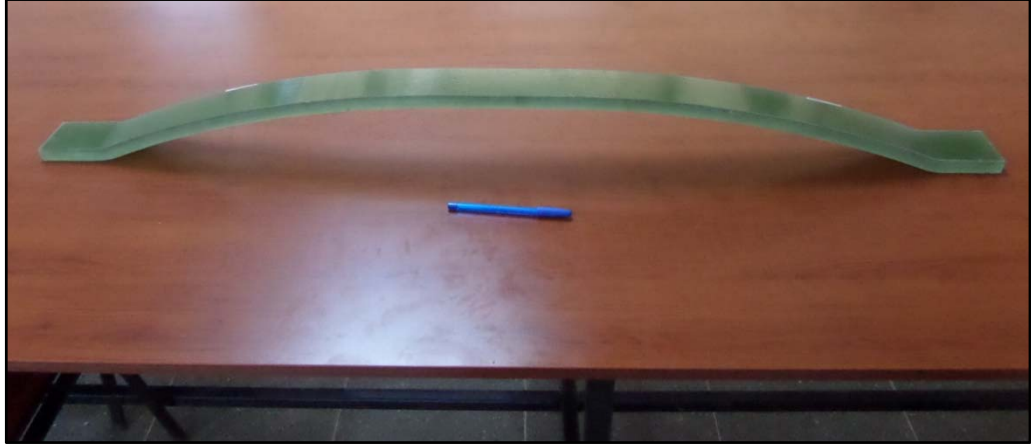
Şekil 3.4 Üretim aşamasından bir görüntü.



Şekil 3.5 Üretim sonrası düz uçlu E-camı/epoksi kompozit yaprak yaylar.



Şekil 3.6 Su jeti ile kesim işleminden bir görüntü.



Şekil 3.7 E-camı/epoksi kompozit yaprak yay numunesi son hali.

Üretim sonrası E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların ölçülen özellikleri ortalama değerler olarak Tablo 3.5' te verilmiştir.

Tablo 3.5 Kompozit yaprak yayların üretim sonrası ölçülen özellikleri.

	E-camı/epoksi	Karbon/epoksi	E-camı-karbon/epoksi
Yaprak yay ortalama ağırlığı [kg]	4,875	2,810	4,259
İçerdiği fiber ağırlığı [kg]	3,440	1,867	2,552 + 226 = 2,778
Ortalama yay kalınlığı [mm]	28,2	20,9	24,3
Yaprak yay yoğunluğu, $\rho_{komp}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,907	1,459	1,852
Ortalama fiber hacimsel oranı, $v_f$ [%]	52,9	53,8	46,2 + 5,5 = 51,7

Üretim sonrası ölçülen yaprak yay kalınlıkları ile ön hesap sonucu olması beklenen kalınlıklar arasında E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylar için sırasıyla -%15,5, -%11,2, -%17,2 oranlarında fark vardır.

### 3.2.3 Ortotropik Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması

Kompozit yaprak yayların sayısal modelleme ve analizinde kullanılacak olan  $0/90^0$  sarım açılı örgülü ortotropik malzeme mekanik özellikleri yapılan çekme ve V-çentikli kesme testleri ile tespit edilmiştir. Testler 100 kN kapasitesindeki Shimadzu marka AG X model universal çekme cihazı ile yapılmıştır. Çekme testi ASTM D 3039 standardına göre, V-çentikli kesme testi ise ASTM D 5379 standardına göre ve her malzeme için üçer defa uygulanmıştır. Çekme testi için 1 mm/dk, V-çentikli kesme testi için ise 2 mm/dk çekme hızı uygulanmıştır. Numunelere straingage bağlanarak alınan veriler datalogger aracılığı ile toplanmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Uygulanan testler sonucunda elde edilen standart numunelere ait malzeme mekanik değerleri Tablo 3.6' da verilmiştir. Çekme testi ile V-çentikli kesme testinden birer görüntü de sırasıyla Şekil 3.8' de ve Şekil 3.9' da verilmiştir.

Tablo 3.6  $0/90^0$  oryantasyon açılı ortotropik malzemenin mekanik değerleri.

	E-camı/epoksi	Karbon/epoksi	E-camı-karbon/epoksi
$E_{11} = E_{22}$ (MPa)	22.885	43.736	26.795
$G_{12}$ (MPa)	3.080	3.957	3.205
$\nu_{12}$	0,194	0,123	0,120



Şekil 3.8 Çekme testinden bir görüntü.



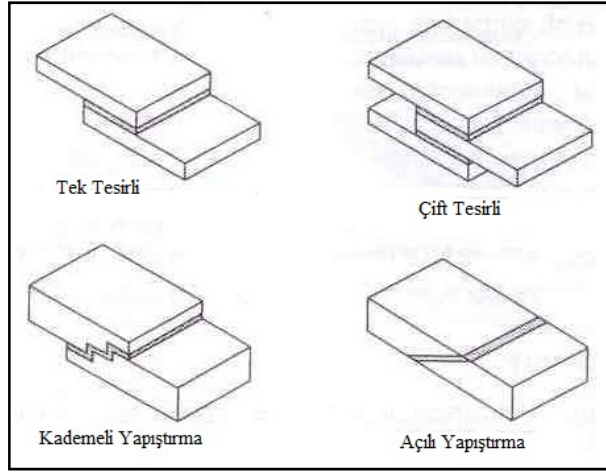
Şekil 3.9 V-çentikli kesme testinden bir görüntü.

Numunelerden deneysel olarak saptanan elastisite modülü değerleri ile teorik hesapla Denklem (3.4) - (3.11) kullanılarak bulunan değerler arasında E-camı/epoksi,

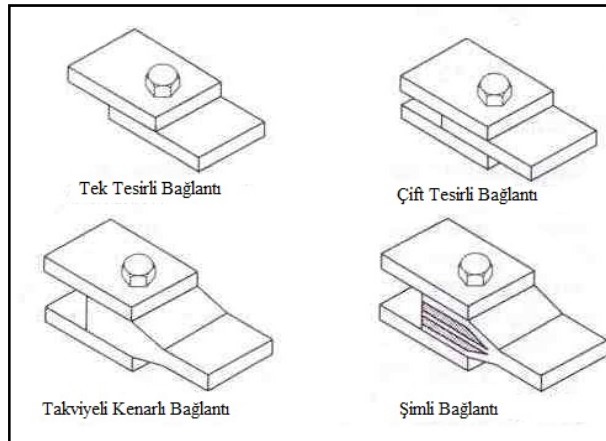
karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylarda sırasıyla % 0,9, % 33,9 ve % 1,1 sapma görülmektedir.

### 3.3 Düz Uçlu Yaprak Yaylar için Göz Bağlantısı Tasarımı ve Üretimi

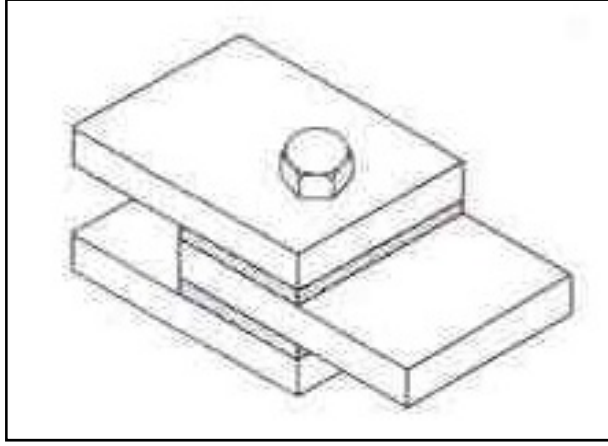
Kompozit malzemeden yapılan elemanların bağlantılarında genellikle yapıştırma (Şekil 3.10) ve cıvatalı (Şekil 3.11) bağlantılar kullanılır. Bunun yanında kimi zaman da Şekil 3.12' de verildiği gibi iki yöntem beraber uygulanarak hem yapıştırılmış hem de cıvata ile birleştirilmiş bağlantılar oluşturulur (Jones, 1999).



Şekil 3.10 Yapıştırma bağlantıları (Jones, 1999).



Şekil 3.11 Cıvatalı bağlantılar (Jones, 1999).

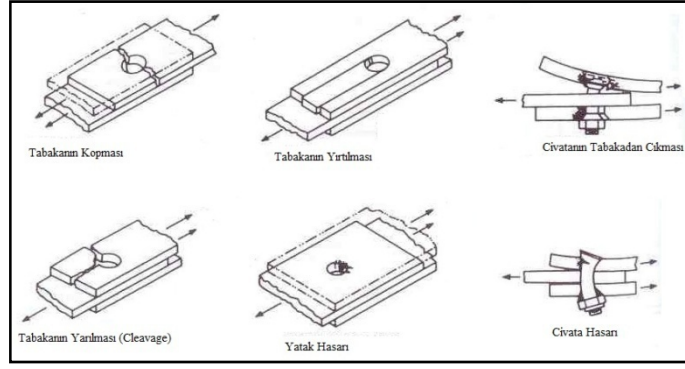


Şekil 3.12 Yapıştırırmalı cıvatalı bağlantı (Jones, 1999).

Yapıştırma bağlantılarında temel sorun, oluşan kesme gerilmesini karşılayacak yeterli yapıştırma yüzeyini elde etmektir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı tabakası ince olduğunda bağlantı esnekliğine etkisi olmamakta oysa kalın olduğunda esnek bir bağlantı elde edilmektedir. Ayrıca eş kalınlıkta izotropik tabakalarda, yapıştırılan tabakaların serbest kenarlarındaki (doğal süreksizlik bölgesi) yüksek gerilme hariç, yapıştırma tabakasında kesme gerilmesinin neredeyse düzgün dağılımlı olduğu saptanmıştır (Jones, 1999). Bununla beraber yapıştırıcı tabakasının kalınlığını arttırmak bağlantıyı her zaman güçlendirmemektedir. Malzemelerin birleşme bölgesindeki gerilmeyi azaltmak için bağlantının çift tesirli yapıştırma ile yapılması da tavsiye edilmiştir (Jones, 1999).

Cıvatalı bağlantılarda görülen hasarlar Şekil 3.13' te verilmiştir. Bu hasarlar, cıvata deliği çevresinde kesit daralmasından kaynaklanan tabakanın çekme gerilmesi etkisi ile kopması, tabakanın kesme gerilmesi etkisi ile kenardan yırtılması veya yarılması, cıvata deliğinin uzamasından dolayı yatak hasarı, cıvata hasarı ve bu hasarların birleşimi şeklindedir. Cıvatalı bağlantıda yatak mukavemetini arttırmanın bir yolu bağlantıya şim (kalibre edilmiş pul) eklemek, bir başka yolu ise bağlantı yapılacak kesiti kalınlaştırarak güçlendirmektir.





Şekil 3.13 Cıvatalı bağlantılarda hasar türleri (Jones, 1999).

Yapıştırırmalı cıvatalı bağlantılarda ise, yük etkidiğinde yapıştırma bağlantısı hasara uğrayana kadar cıvata yük almaz. Yapıştırma bağlantısı hasar gördükten sonra ise tüm yükü cıvatalı bağlantı karşılar. Yapıştırma ile gerçekleşen hasar davranışında değişiklik olur ve yorulma hasarına karşı iyileşme sağlanır. Bu nedenle genel olarak sadece yapıştırırmalı veya sadece cıvatalı bağlantılara göre daha iyi performans gösterirler. Yapıştırma bağlantısı, cıvata bağlantısındaki kesilme eğilimini düşürmeye yarar. Cıvatalı bağlantı ise, yapıştırma bağlantısındaki yüzeyler arası kesme gerilmesi ile ayrılma riskini azaltır. Yapıştırırmalı cıvata bağlantısının hasar davranışı genel olarak delik çevresinden cıvata ile kopması, tabakalar arası kesme gerilmesi ya da bunların birlikte oluşması şeklindedir (Jones, 1999).

Kompozit yaprak yay üretimi söz konusu olduğunda ise göz boşlukları ile beraber üretilen kompozit yaprak yaylarda, yay gövdesinden gözlere geçiş bölgesini oluşturan kesit kritik kesittir. Fiberlerin göz formunu oluştururken doğrultu değiştirmesi ve eğilmesi bu durumun oluşmasında önemli etkindir. Göz formunu oluştururken açığa çıkan bu dezavantajlı durumu ortadan kaldırmak adına Şekil 3.14' te verilen düz uçlu üretilen kompozit yaprak yayların araç üzerine bağlantısını sağlayacak özgün bir göz bağlantı tasarımı yapılmıştır. Yapılan özgün tasarımın çizim planı Tablo 3.9' da verilmiştir. Yapılan bu özgün tasarım için 2014/05721 başvuru numarası ile Türk Patent Enstitüsü'ne, PCT/TR2015/000047 başvuru numarası ile de Avrupa Patent Enstitüsü' ne patent başvurusu yapılmıştır.



Şekil 3.14 Düz uçlu yaprak yay için göz bağlantısı.

Tablo 3.7 Düz uçlu yaprak yay için göz bağlantısı çizim planı.

Resim No'su	Resim Adı	Resmin Cinsi	Resim Boyutu	Resim Adedi
YYG-0	Yaprak Yay Gözü	Genel Montaj Resmi	A4	1
YYG-1	Yaprak Yay Gözü Alt Parça	1.Grup İmalat Resmi	A4	3
YYG-2	Yaprak Yay Gözü Üst Parça	2.Grup İmalat Resmi		
YYG-3	Göz Burcu	3.Grup İmalat Resmi		

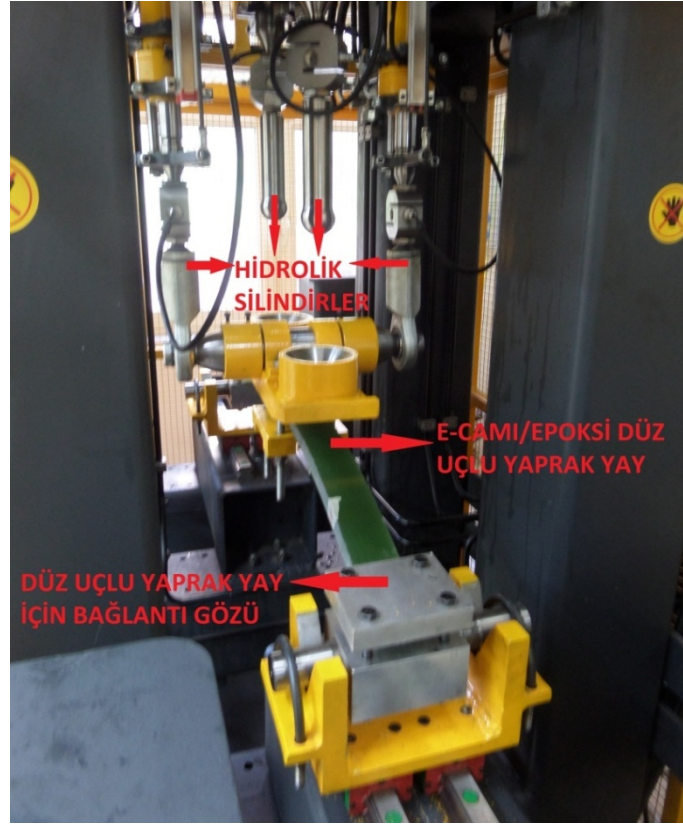
Göz bağlantı tasarımını özgün kılan iki noktadan ilki; yaprak yay üzerine delik açılmadan yaprak yay bağlantısını sağlamasıdır. Delik açılması yaprak yay üzerinde hem yük taşıyan kesiti daralttığından hem de delik etrafında gerilme yığılmasına sebep olduğundan yaprak yay mukavemetini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. İkinci nokta ise üç parçalı olarak tasarlanan göz bağlantısı sayesinde, yaprak yayın araca montajı sırasında gözler arası mesafenin ayarlanması kolaylıkla yapılabilecektir. Bu nedenle yaprak yay üzerine delik açılmadan bağlantı sağlanması tercih edilmiştir.

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME

#### 4.1 Statik Testler

Üretilen kompozit yaprak yaylara uygulanan statik testler, Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin Süspansiyon Yaprak Yaylarının Yorulma Testi (SAE J 1528) standardında belirttiği şartlarda gerçekleştirilmiştir. Yaprak yay iki ucundan test cihazına bağlanıp ortasından yükleme yapılmıştır. Test süresince yaya uygulanan yük ve yay ortasındaki deplasman kayıt edilmiştir. Statik testin hızı için literatürde standart bir değer olmadığından uygulanan statik testlerde 100 mm/dk ortalama ilerleme hızı uygulanmıştır. Her malzemeden kompozit yaprak yaylara uygulanan statik test üçer defa tekrarlanmıştır. Şekil 4.1' de E-camı/epoksi düz uçlu yaprak yay numunesinin statik testine ait bir görüntü paylaşılmıştır.



Şekil 4.1 E-camı/epoksi düz uçlu yaprak yayın statik testinden bir görüntü.

Test edilen kompozit yaprak yaylara uygulanan kodlamalar Tablo 4.1' de verilmiştir. Tablo 4.2' de uygulanan statik testlerin ve yorulma testlerinin sınırları verilmiştir.

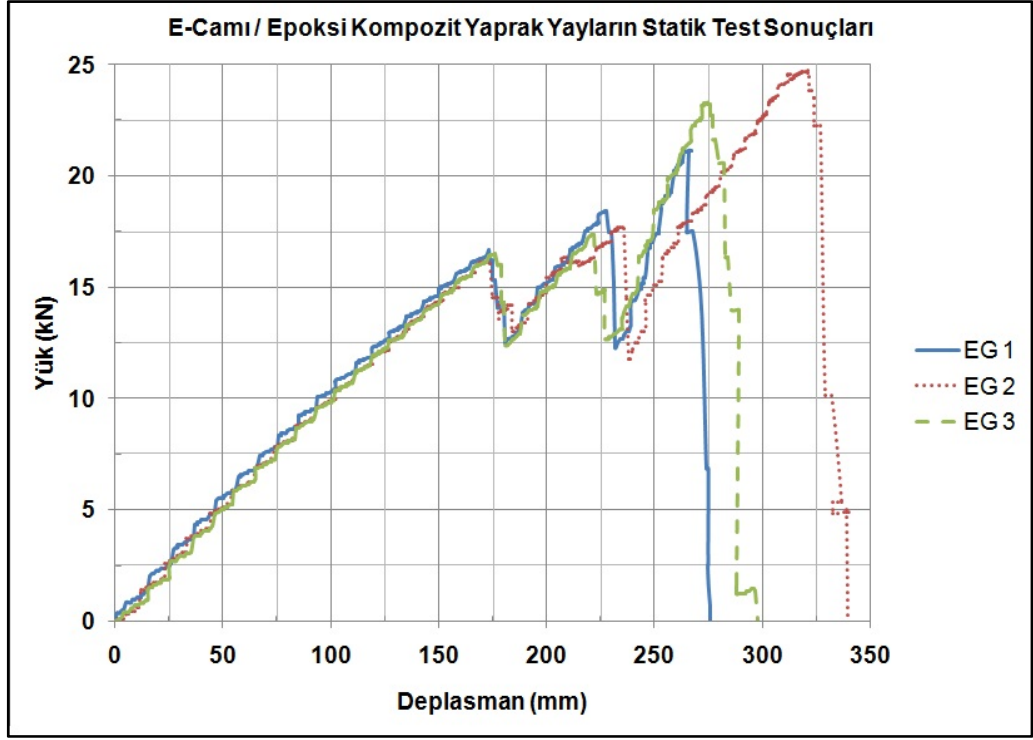
Tablo 4.1 Kompozit yaprak yaylara uygulanan kodlamalar.

	<b>Harflerin anlamı</b>	<b>Sayının anlamı</b>
<b>EG 1</b>	E-camı / epoksi yaprak yay	Kaçıncı numune olduğu
<b>HB 1</b>	E-camı-karbon/ epoksi yaprak yay	Kaçıncı numune olduğu
<b>Cb 1</b>	Karbon/epoksi yaprak yay	Kaçıncı numune olduğu

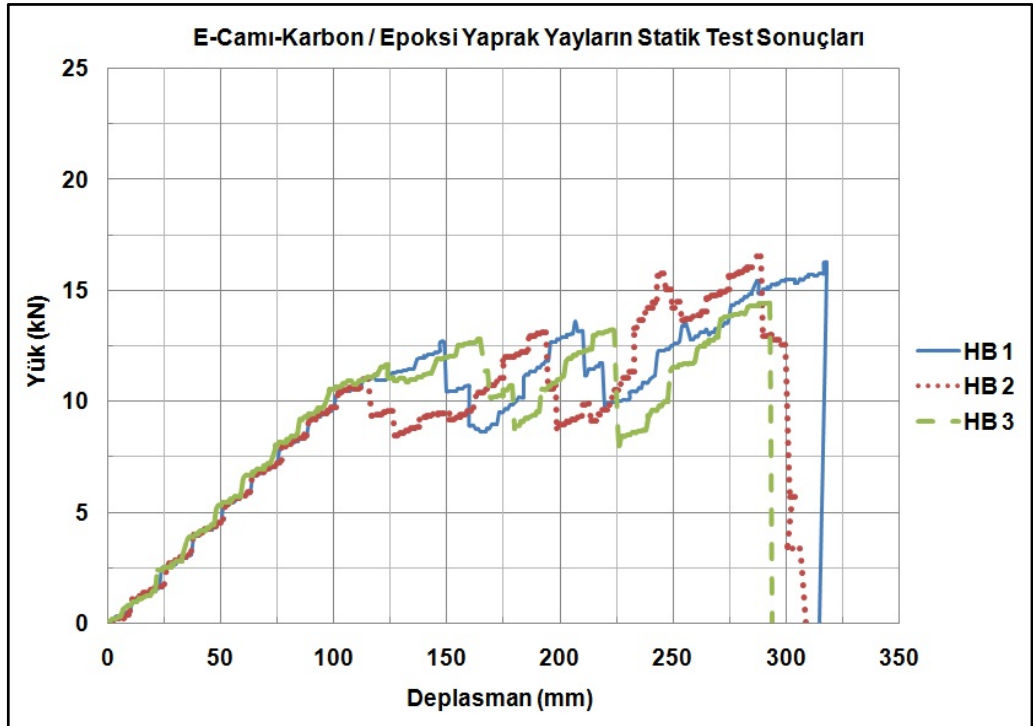
Tablo 4.2 Kompozit yaprak yaylara uygulanan testlerin sınırları.

	<b>Test Girdisi</b>	<b>Ölçülen Veri</b>
<b>Statik Test</b>	Yaprak yay hasara uğrayana kadar devam eden yükleme	- Yaprak yayın taşıdığı yük - Yay ortasındaki çökme
<b>Yorulma Testi</b>	63±19 mm çökme (ön testler ile belirlenmiştir)	- Alt ve üst çökme noktalarında yaprak yayın taşıdığı yük - Yay yüzeyindeki sıcaklık - Çevrim sayısı

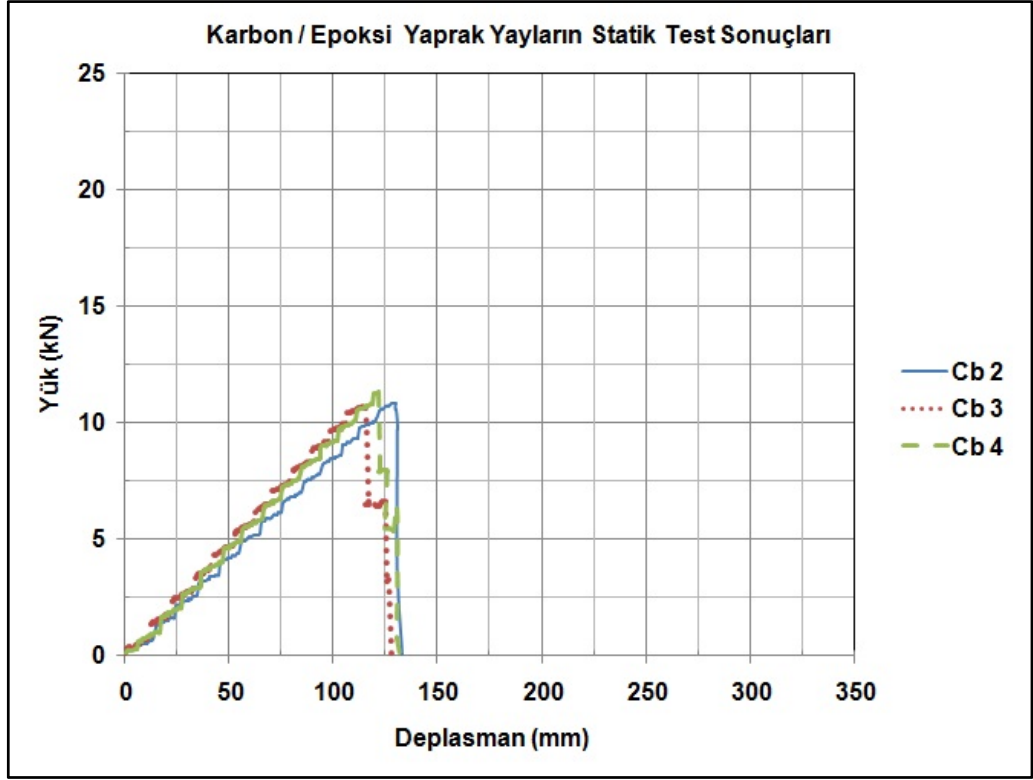
E-camı/epoksi, E-camı-karbon/epoksi ve karbon/epoksi kompozit yaprak yayların her birine ait statik karakteristiklerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.2 - 4.4 arasında verilmiştir. Üç farklı tür kompozit yaprak yaydan birer örnek seçilerek statik karakteristiklerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.5' te verilmiştir.



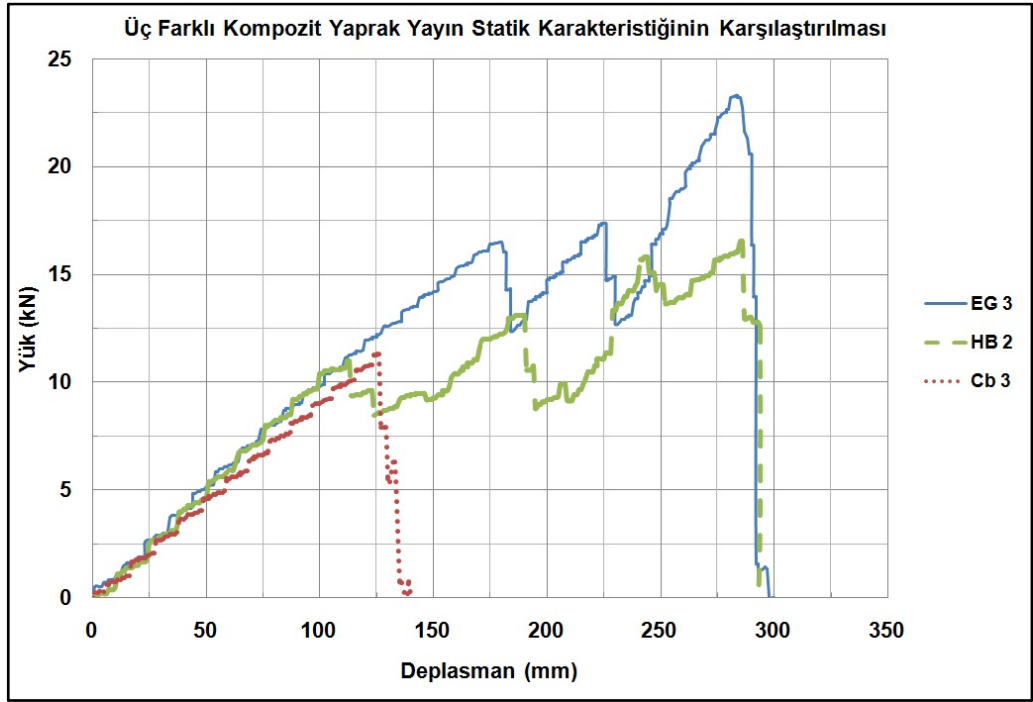
Şekil 4.2 E-camı/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği.



Şekil 4.3 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği.



Şekil 4.4 Karbon/epoksi yaprak yayların yük deplasman grafiği.



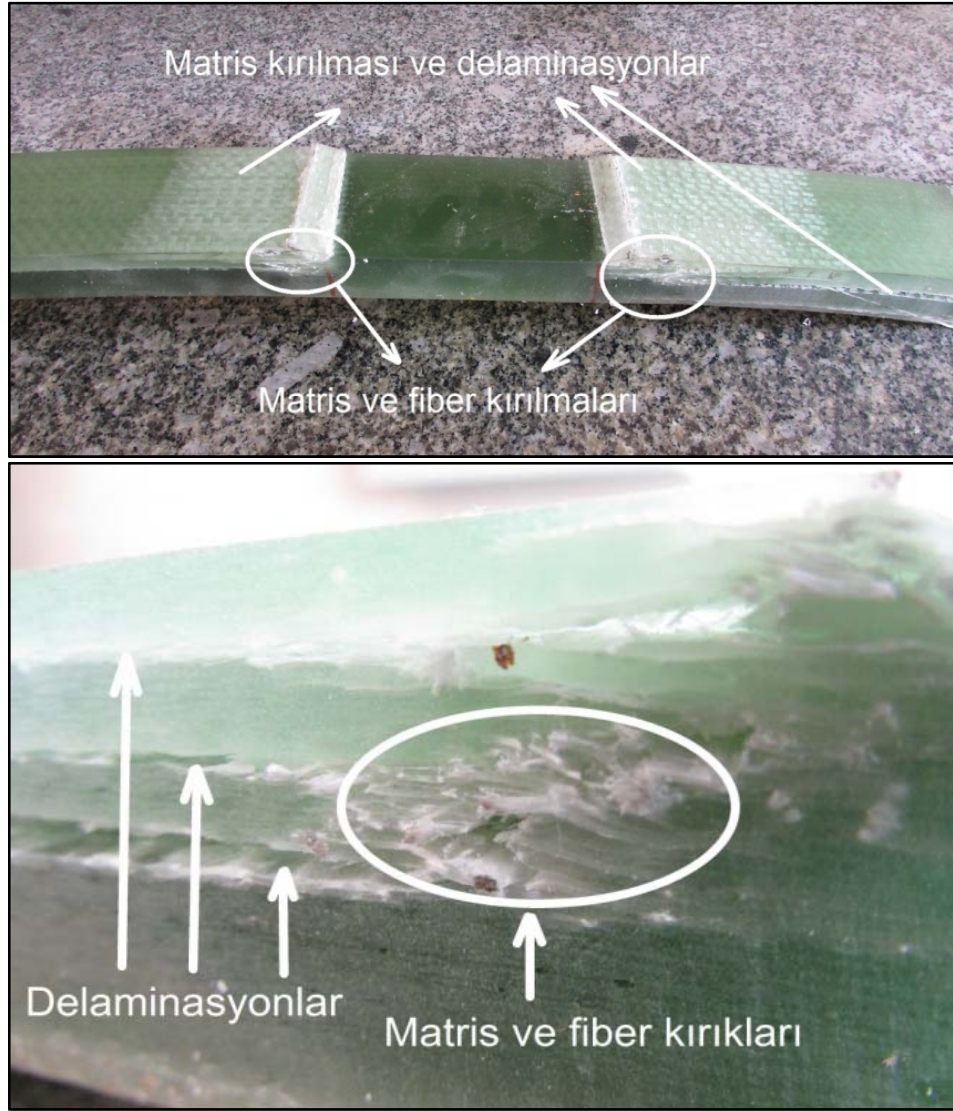
Şekil 4.5 Üç farklı kompozit yaprak yayın statik karakteristiği.

Şekil 4.5 incelenecek olursa E-camı/epoksi yayların ilk hasar gördüğü yük değeri 16,25 kN olmakla beraber maksimum yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak 21 kN olarak görülmektedir. Benzer bir durum E-camı-karbon/epoksi yaylar için de ilk hasar yükü 11,6 kN maksimum taşıdığı yük ise yaklaşık 15 kN olarak gerçekleşmiştir. Bu kademeli hasar durumu E-camı/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yayların Şekil 4.2' de ve Şekil 4.3' te verilen her numuneye ait yük-deplasman grafiklerinde de net olarak görülmektedir. Kademeli hasar durumunda artan yük üst bölgede (yükleme şartlarında basıya maruz kalan bölge) matris ve fiberlerde ilk hasar oluşumuyla düşüşe geçer. Alt tabakaların yük taşımaya devam etmesi ile yükte tekrar bir artış görülür. Yeni çatlakların oluşup ilerlemesi ile yeni kademe hasarlar meydana gelir ve bu durum yük-deplasman grafiğinde görülen inişli çıkışlı durumu oluşturur. Bunun yanı sıra her kademe sonrasında yük seviyesinin artmasının bir nedeni de yaprak yayın üç nokta eğme durumunda gösterdiği davranıştır. Test sırasında artan yük ile ilk düşüş yaprak yay kavisinin üst tabakalarında matris ve fiberlerde bası yükü etkisiyle oluşan ilk kademe hasar kaynaklıdır. Deplasmanın ilerlemesi ile yaprak yay kavisinin iç tarafı çeki yükünü taşımaya başlamaktadır. Fiber takviyeli kompozitler fiber doğrultusundaki çeki yüküne, bası yüküne göre daha dayanıklı olduğundan ikinci kademe hasara kadar yük miktarı ilk kademeyi aşmaktadır. Bu durum ise yük taşıyan kesitin iyice daralması ile sonlanmakta ve nihai hasar oluşmaktadır. Karbon/epoksi yaprak yaylarda ise ilk hasar oluşumu 10,5 kN yük değerinde görülmekte ve diğer iki yaydan farklı olarak ani kırık ilerlemesi ile yay kopmaktadır. Karbon/epoksi yaprak yaylarda takviye malzemesi daha mukavemetli olmasına rağmen daha düşük bir yük değerinde ilk hasarı görmesi E/camı/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylara göre sırasıyla yaklaşık % 26 ve %14 daha ince olmasındandır.

Her üç malzemeden kompozit yaprak yayaya ait statik test sonuçları ve bu sonuçlar kullanılarak Denklem (3.1)-(3.3) yardımıyla hesaplanan yay ortasındaki gerilme ve yay katsayısı Tablo 4.3' te verilmiştir. Bu değerler üçer defa tekrarlanan testlerin ortalamasıdır. Statik testler sonrası E-camı/epoksi, E-camı-karbon/epoksi ve karbon/epoksi yaprak yaydan birer hasarlı numune fotoğrafı sırasıyla Şekil 4.15-4.17 arasında verilmiştir.

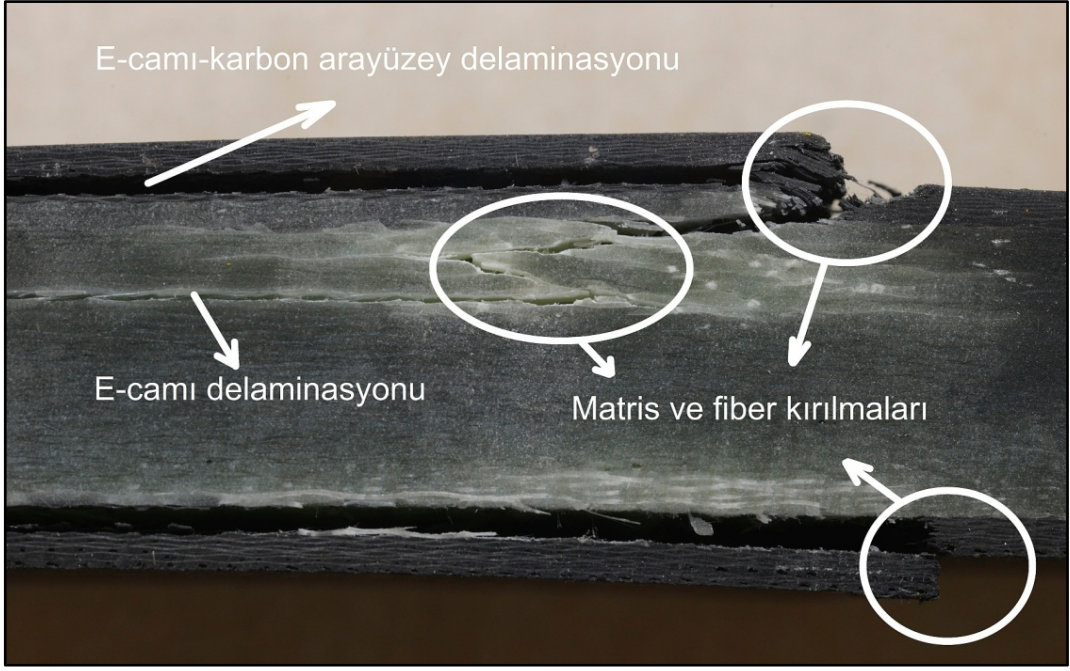
Tablo 4.3 Üç farklı kompozit yaprak yayın ortalama statik test sonuçları.

	E-camı/epoksi	E-camı- karbon/epoksi	Karbon/epoksi
İlk hasar yükü, $F_{ilk}$ (kN)	16,3	11,6	10,5
Yay ortasındaki çökme (mm)	175	116	121
İlk hasarda yay ortasındaki gerilme (MPa)	598	551	685
Yay katsayısı (N/mm)	98,4	97,1	91,2

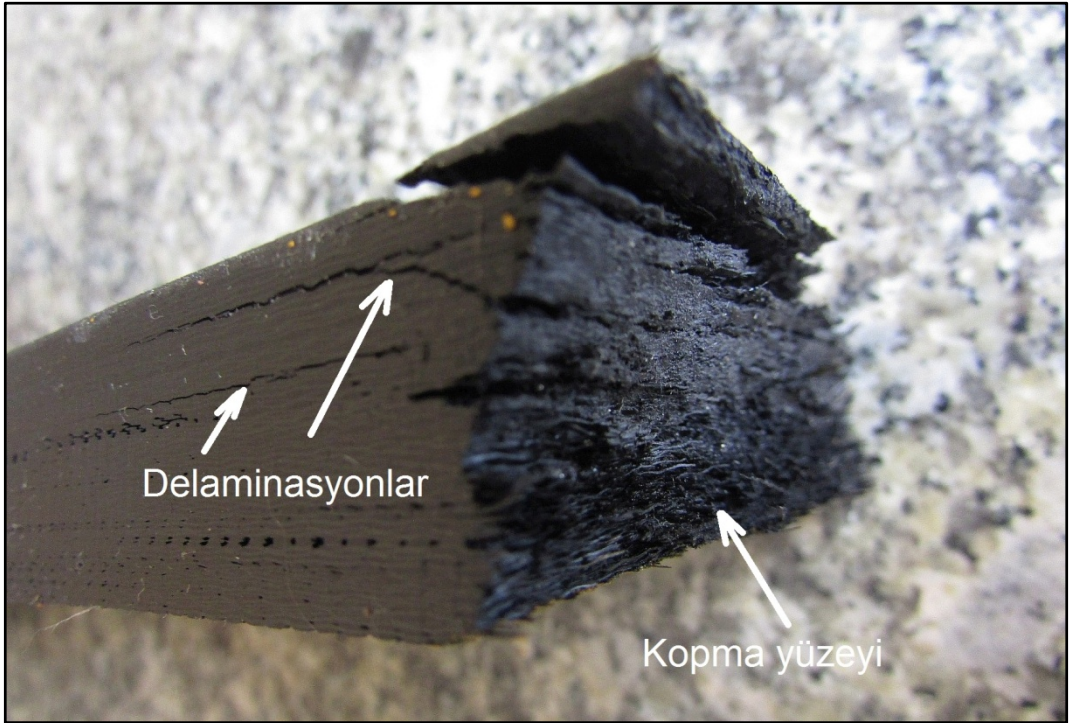


Şekil 4.6 E-camı/epoksi yaprak yayda statik test sonrası hasarlar.





Şekil 4.7 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayda statik test sonrası hasarlar.



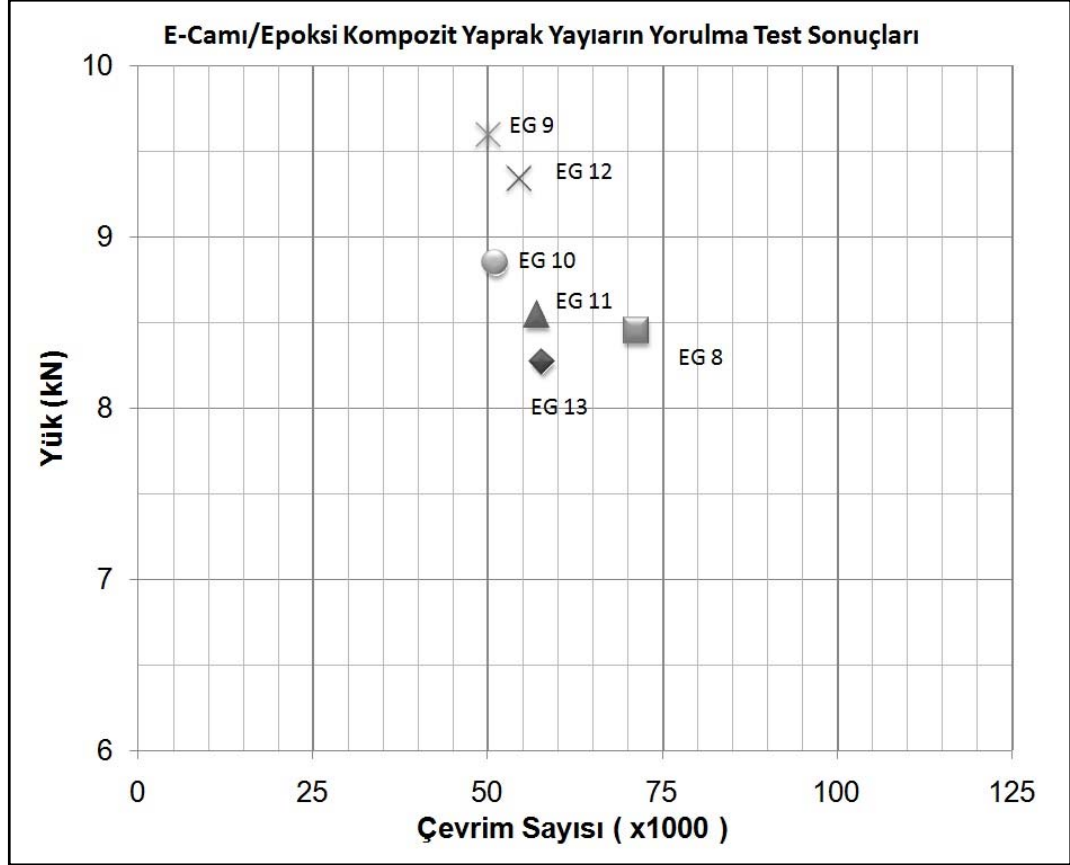
Şekil 4.8 Karbon/epoksi yayda statik test sonrası hasarlar.

Şekil 4.6' da E-camı/epoksi yaprak yayın ortasında üst bölgede oluşan hasar modları görülmektedir. Beyaz renkle görülen bölgelerde matris kırılması ve tabakalar arası ayrılmalar oluşmuştur. Yayın yan yüzeyinden bakıldığında da fiber kırıkları görülmektedir. Şekil 4.7' de E-camı-karbon/epoksi yaprak yayda oluşan hasarlar görülmektedir. Üst ve alt tabakaların karbon olması nedeniyle E-camından farklı olarak karbon tabakalarda tabakalar arası ayrılmalar oluşmamış, karbon fiberlerin kırılmasından sonra karbon-cam ara yüzey ayrılmaları gerçekleşmiştir. Artan deplasman ile çatlak ilerlemesi altta yer alan E-camı/epoksi tabakalara ulaşmıştır. Matris ve fiber kırıkları ile E-camı/epoksi tabakalar arası ayrılmalar da yine Şekil 4.7' de net olarak görülmektedir. Şekil 4.8' de karbon/epoksi yayda oluşan ani kırılma sonrası hasar bölgesi ve tabakalar arası ayrılmalar görülmektedir.

#### **4.2 Yorulma Testleri**

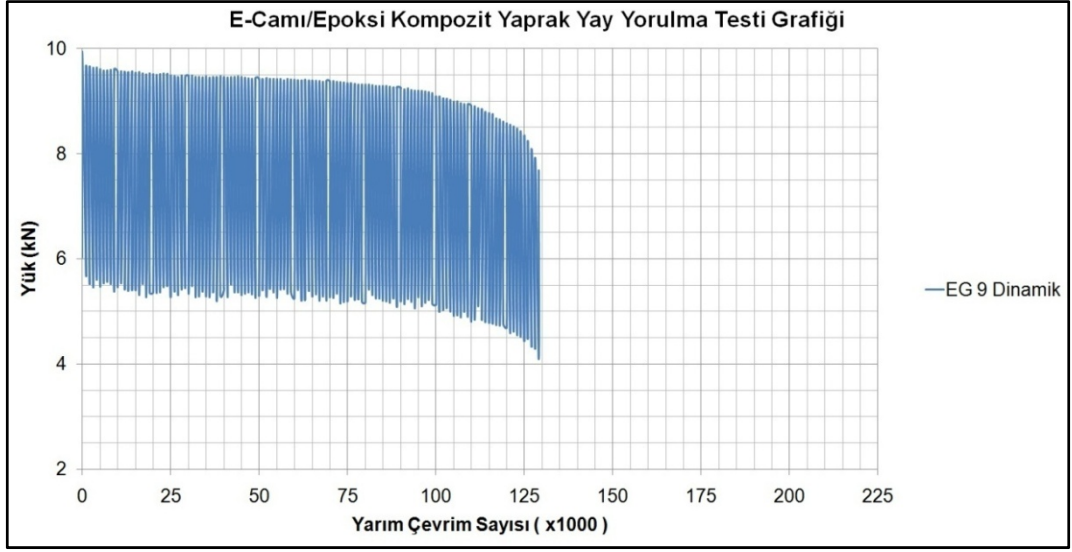
Yorulma testlerin uygulanmasında Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin yayınları olan Yaprak Yayların Tasarım ve Uygulama Kılavuzu (SAE HS 788) ve Yaprak Yaylarının Yorulma Test Standardı (SAE J 1528) referans alınmıştır. HS 788 kılavuzunda hafif ticari araçlarda kullanılacak çelik yaprak yayların ortalama yorulma ömrü için  $50 \times 10^3$  çevrimin kabul edilebilir, ortalama  $100 \times 10^3$  çevrim yorulma ömrünün ise tercih sebebi olduğu belirtilmiştir. Test stroğu için bir standart olmamakla beraber maksimum test yükünde yaprak yayın düze yakın pozisyonda kalması önerilmiştir. Maksimum test yükü için ise J 1528 standardında genellikle tasarım yükünün iki katı alındığı belirtilmektedir. Ayrıca güvenilirlik açısından yorulma testinin altı defa tekrarlanması gerektiği bildirilmiştir. Uygulanacak test frekansı için 0,5 Hz ila 2 Hz aralığı verilmiştir. Testin sonlanma kriteri ise test başlangıcındaki maksimum çökmenin % 10' undan fazla bir çökme gerçekleşmesi ya da  $50 \times 10^3$  çevrimde yük kaybı başlangıçtaki ölçülen yük değerinin % 5' inden fazla olması durumudur. Bu referanslar dikkate alınarak yorulma testleri 1 Hz frekansta  $63 \pm 19$  mm deplasman girdisi ile uygulanmış ve kompozit yaprak yayların taşıdıkları yükler tespit edilmiştir.

E-camı/epoksi yaprak yaylar için yorulma yükü ve yayın dayandığı çevrim sayısını gösteren grafik Şekil 4.9' da verilmiştir.

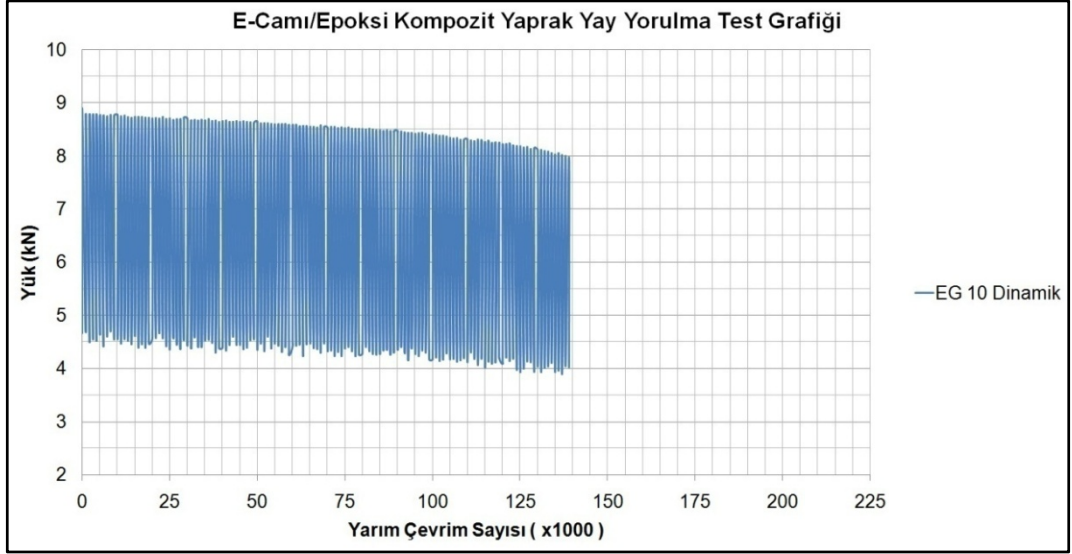


Şekil 4.9 E-camı/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma test sonuçları.

E-camı/epoksi yaprak yayların  $63 \pm 19$  mm deplasman girdisi için taşıdıkları maksimum yük ortalaması 8840 N olup ortalama çevrim sayısı yaklaşık  $57 \times 10^3$  çevrimdir. Örnek olarak EG 9 ve EG 10 numunelerinin yorulma grafikleri Şekil 4.10' da ve Şekil 4.11' de verilmiştir.



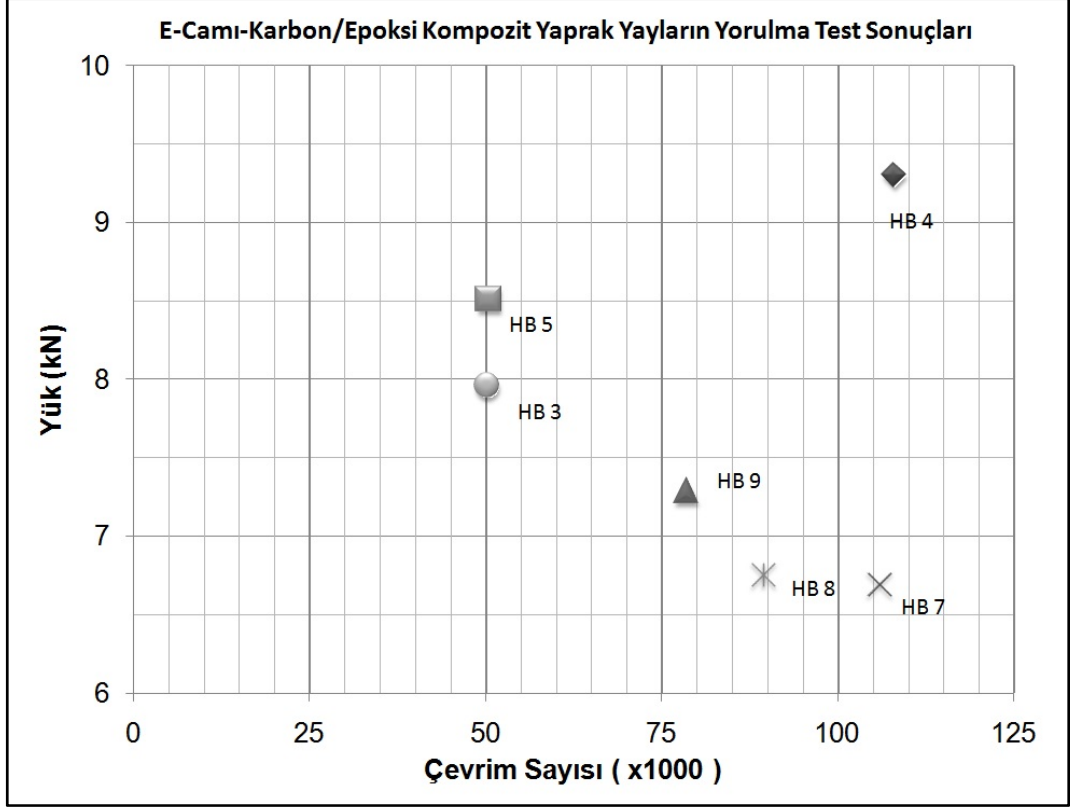
Şekil 4.10 EG 9 numunesine ait yorulma test grafiği.



Şekil 4.11 EG 10 numunesine ait yorulma test grafiği.

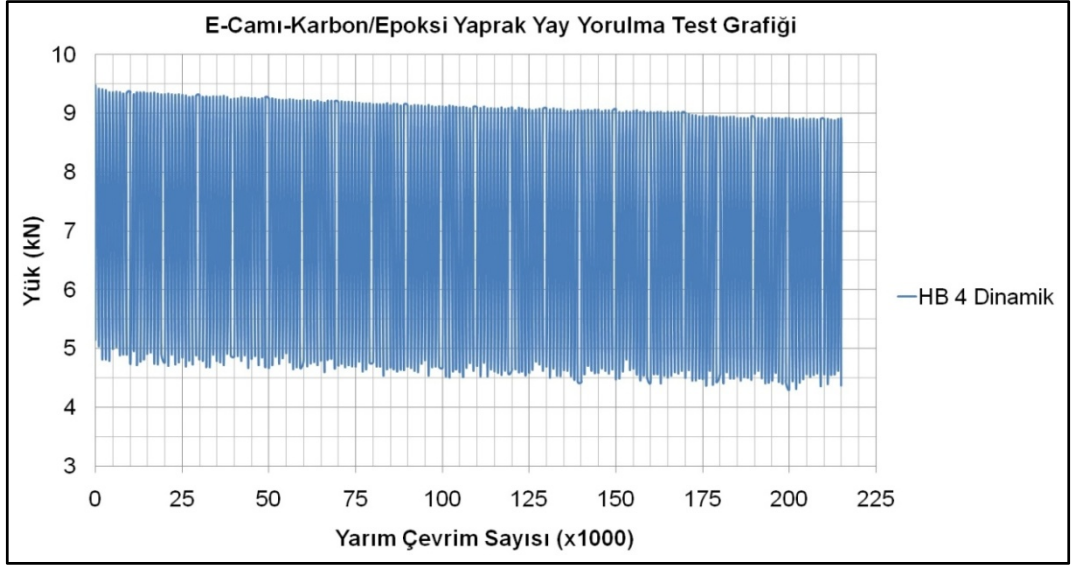
E-cami/epoksi yaprak yayların Şekil 4.10' da ve Şekil 4.11' de verilen yorulma grafikleri incelendiğinde, test stroğu sabit olduğundan her çevrimde yayın taşıdığı yükte bir miktar azalma olduğu açıkça görülmektedir. Yorulma testinin hasar kriteri olan yayın ilk çevrimde taşıdığı yüke göre % 5 azalma durumu her iki yayın yorulma grafiğinde net olarak görülebilmektedir.

E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylar için yorulma yükü ve yayın dayandığı çevrim sayısı grafiği Şekil 4.12' de verilmiştir. E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların  $63 \pm 19$  mm deplasman girdisi için taşıdıkları maksimum yük ortalaması 7750 N olup ortalama çevrim sayısı yaklaşık  $79 \times 10^3$  çevrimdir.

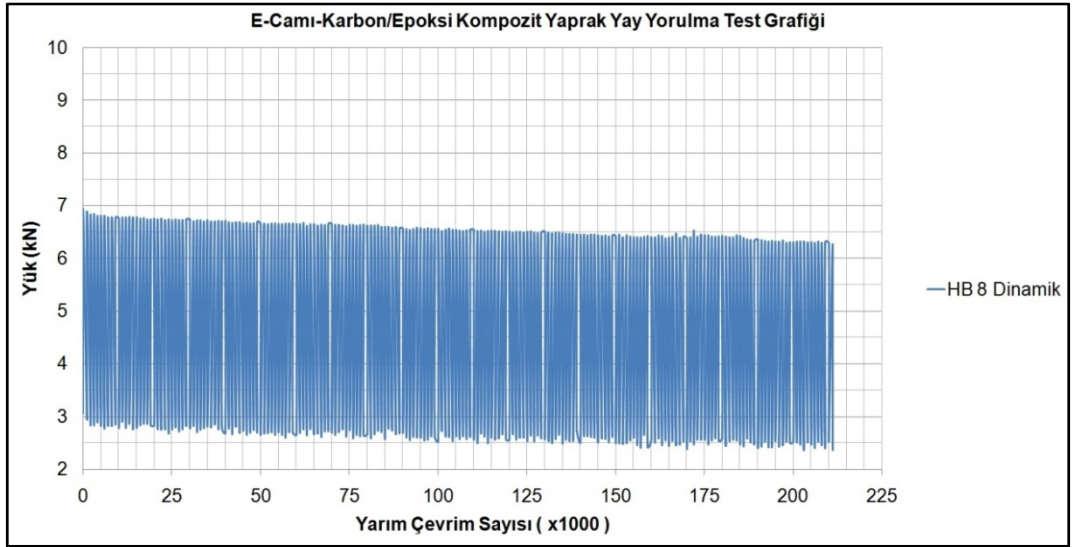


Şekil 4.12 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.

E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylar için de örnek olarak HB 4 ve HB 8 yaylarına ait yorulma grafikleri sırasıyla Şekil 4.13' te ve Şekil 4.14' te verilmiştir. Bu yorulma grafikleri incelendiğinde, HB 5 yayının test boyunca taşıdığı yükteki azalma grafikte net olarak görülmektedir. HB 8 yayının grafiğinde görülen ise testin sonlanma nedeni yükteki azalma kriteri değil yayın maksimum test çevrimine ulaşmasıdır.

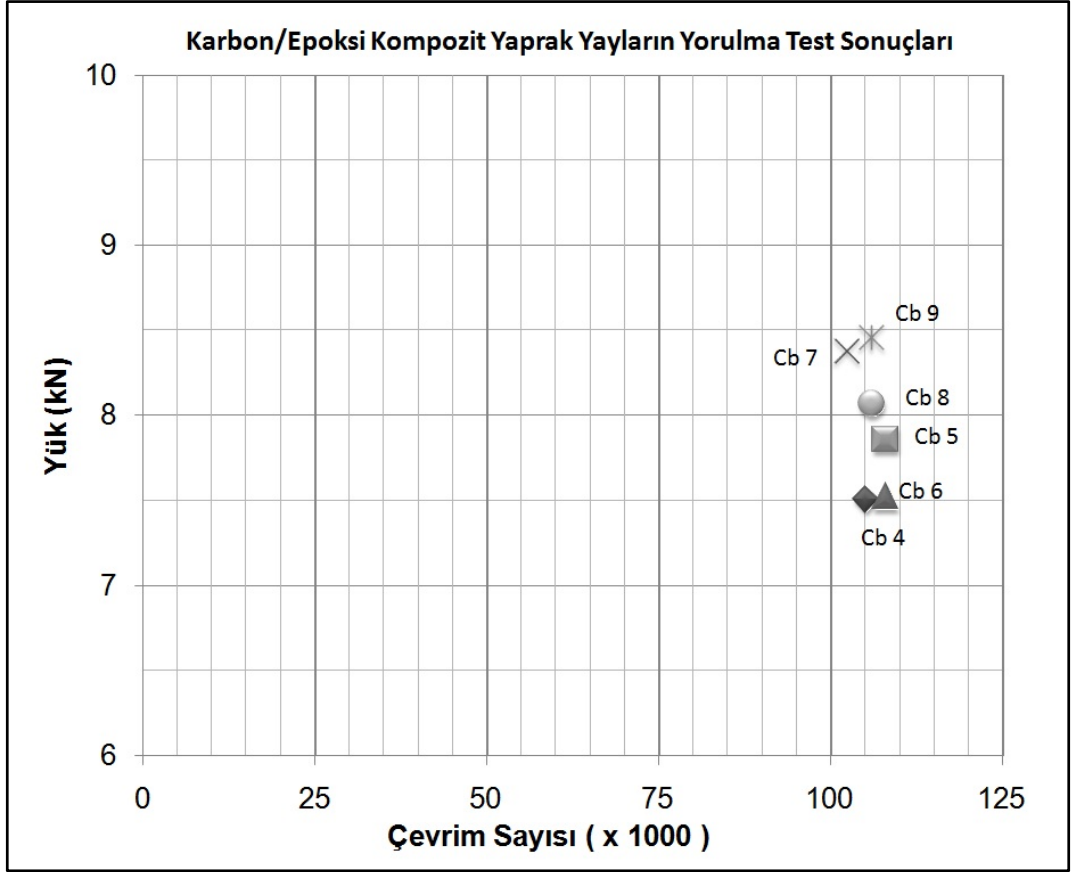


Şekil 4.13 HB 4 numunesine ait yorulma test grafiği.

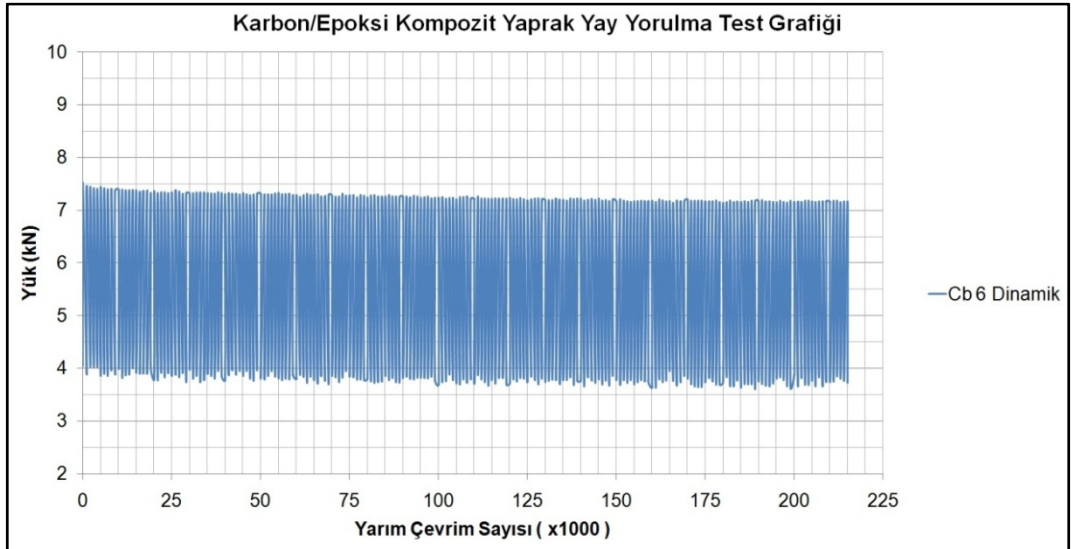


Şekil 4.14 HB 8 numunesine ait yorulma test grafiği.

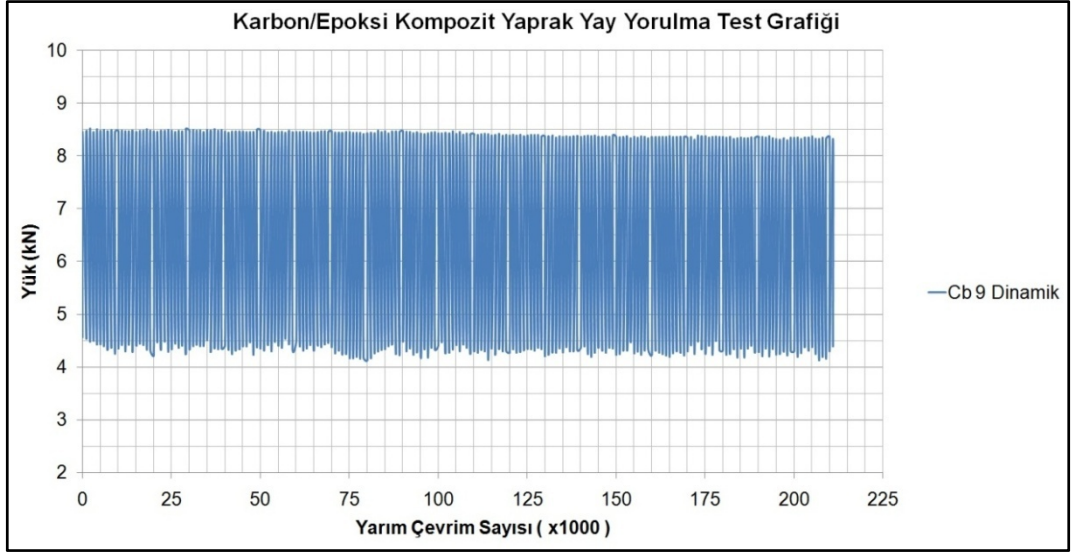
Karbon/epoksi yaprak yaylar için yorulma yükü ve yayın dayandığı çevrim sayısı grafiği Şekil 4.15' te verilmiştir. Karbon/epoksi yaprak yayların 63±19 mm deplasman girdisi için taşıdıkları maksimum yük ortalaması 7960 N olup ortalama çevrim sayısı yaklaşık  $106 \times 10^3$  çevrimdir. Örnek olarak Cb 6 ve Cb 9 numunelerinin yorulma grafikleri Şekil 4.16' da ve Şekil 4.17' de verilmiştir.



Şekil 4.15 Karbon/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma test sonuçları.



Şekil 4.16 Cb 6 numunesine ait yorulma test grafiği.



Şekil 4.17 Cb 9 numunesine ait yorulma test grafiği.

Karbon/epoksi numunelerin yorulma testleri diğer iki türden farklı olarak hasar gördüğü için sonlanmamıştır . Yaprak yayların tercih edilen yorulma ömrü  $100 \times 10^3$  çevrim olduğundan yorulma testleri maksimum  $108 \times 10^3$  çevrime kadar devam edecek şekilde uygulanmıştır. Örnek olarak verilen karbon/epoksi yayların yorulma grafiklerinde de ilk ve  $50 \times 10^3$  çevrim arasında hasar kriteri kabul edilen yükte %5 düşüşün olmadığı görülmektedir. Yorulma testlerinin sonuçları Tablo 4.4-4.6 arasında detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.4 E-cami/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.

Numune Kodu	F <sub>ilk</sub> (N)	F <sub>son</sub> (N)	Dayandığı Çevrim Sayısı
EG 8	8.450	8.027	71.274
EG 9	9.595	9.115	50.149
EG 10	8.845	8.402	51.024
EG 11	8.540	8.113	57.060
EG 12	9.337	8.870	54.537
EG 13	8.268	7.855	57.792



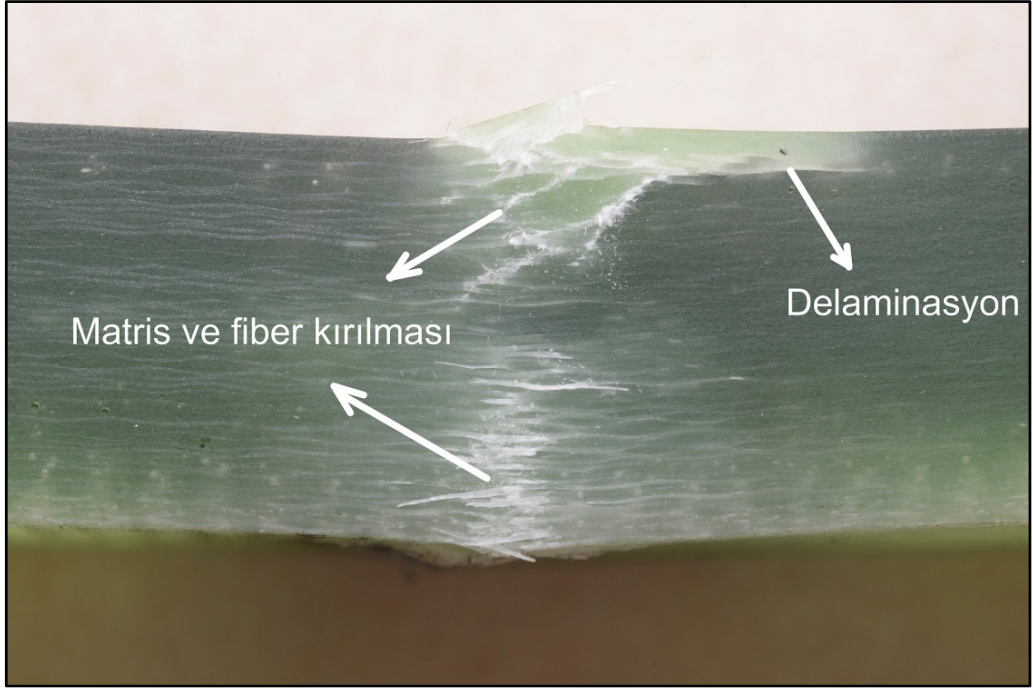
Tablo 4.5 Karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.

Numune Kodu	F <sub>ilk</sub> (N)	F <sub>son</sub> (N)	Dayandığı Çevrim Sayısı
Cb 4	7.501	7.416	105.261
Cb 5	7.856	7.647	108.000
Cb 6	7.519	7.171	108.000
Cb 7	8.373	8.225	102.454
Cb 8	8.064	7.887	106.000
Cb 9	8.455	8.313	106.000

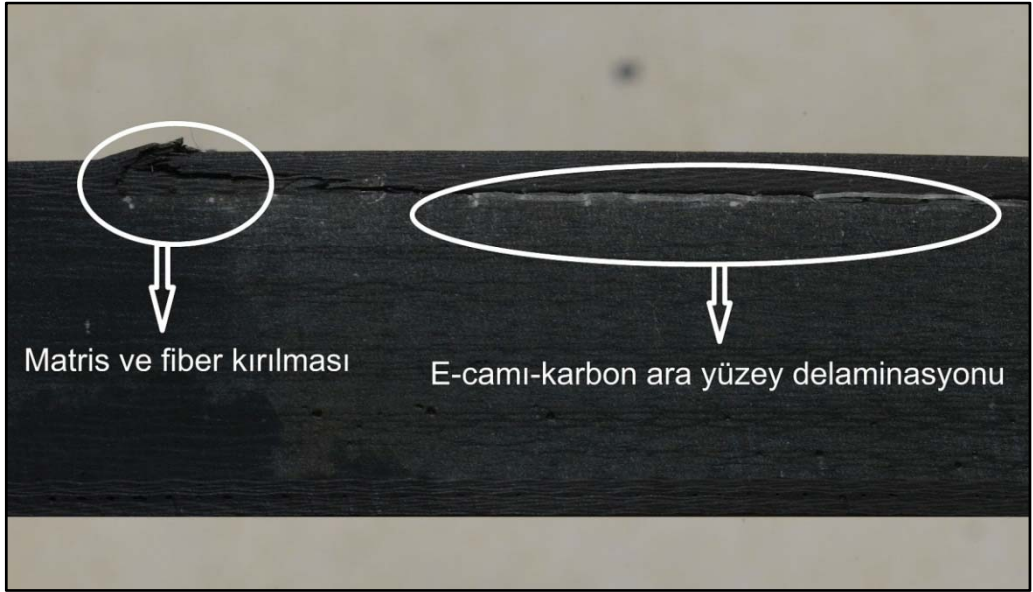
Tablo 4.6 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların yorulma test sonuçları.

Numune Kodu	F <sub>ilk</sub> (N)	F <sub>son</sub> (N)	Dayandığı Çevrim Sayısı
HB 3	7.955	6.171	50.176
HB 4	9.300	8.915	108.000
HB 5	8.510	7.644	50.438
HB 7	6.689	6393	106.000
HB 8	6.750	6.272	89.527
HB 9	7.285	6.870	78.502

Polimer kompozitlerin hasarı iki farklı neden ile gerçekleşmektedir. Bunların ilki tekrarlı yükleme ile açığa çıkan ısınma nedeniyle polimerin yumuşaması, ikincisi ise statik duruma benzer olarak kırık oluşması ve ilerlemesidir (Gerdeen ve Rorrer, 2012). Yorulma testi süresince yay yüzeyinden yapılan sıcaklık ölçümünde sıcaklığın 24 °C' yi aşmadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, yorulma testi sonrası numunelerin hasar bölgeleri de incelendiğinde hasar mekanizmasının statik durum ile aynı olduğu görülmektedir. Şekil 4.18-4.20 arasında sırasıyla E-camı/epoksi, E-camı-karbon/epoksi ve karbon/epoksi yaprak yayların yorulma testi sonrası hasar bölgelerini gösteren birer fotoğraf verilmiştir.



Şekil 4.18 EG 9 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar.



Şekil 4.19 HB 8 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar.



Şekil 4.20 Cb 6 numunesinde yorulma testi sonrası oluşan hasarlar.

Şekil 4.18' de E-camı/epoksi yaprak yaylarda tabakalar arası ayrılma hasarı görülmektedir. Bununla beraber baskın olan hasar türü tüm kesitte etkili olan matris ve fiber kırılmasıdır. Şekil 4.19' da verilen E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylarda dışta yer alan karbon tabakada matris ve fiber kırılması gerçekleşmişse de baskın hasar türü cam-karbon ara yüzey tabakalarının ayrılması olarak görülmektedir. Statik durumdan farklı olarak yorulma hasarında arada kalan cam tabakalarda hasar görülmemiştir. Şekil 4.20' de karbon/epoksi numunelerin yorulma hasarında ise matris ve fiber kırılması görülmekte iken tabakalar arası ayrılma görülmemektedir.

Her üç türde yaprak yayların test sonuçları ele alınacak olursa, E-camı/epoksi ve karbon/epoksi yaprak yayların kendi içlerinde birbirine yakın sonuçlar vermesine rağmen E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların test sonuçlarında geniş bir dağılım görülmektedir. Bu durumun sebebi E-camı-karbon ara yüzey etkisinin belirsizliğidir. E-camı ve karbon kumaş beraber kullanılarak üretilen yaprak yaylarda ağırlık bakımından, salt E-camı ile üretilen yaylarla karşılaştırıldığında kayda değer ölçüde azalma ortaya çıkmamıştır. Diğer taraftan E-camı-karbon kompozit yaprak yayların

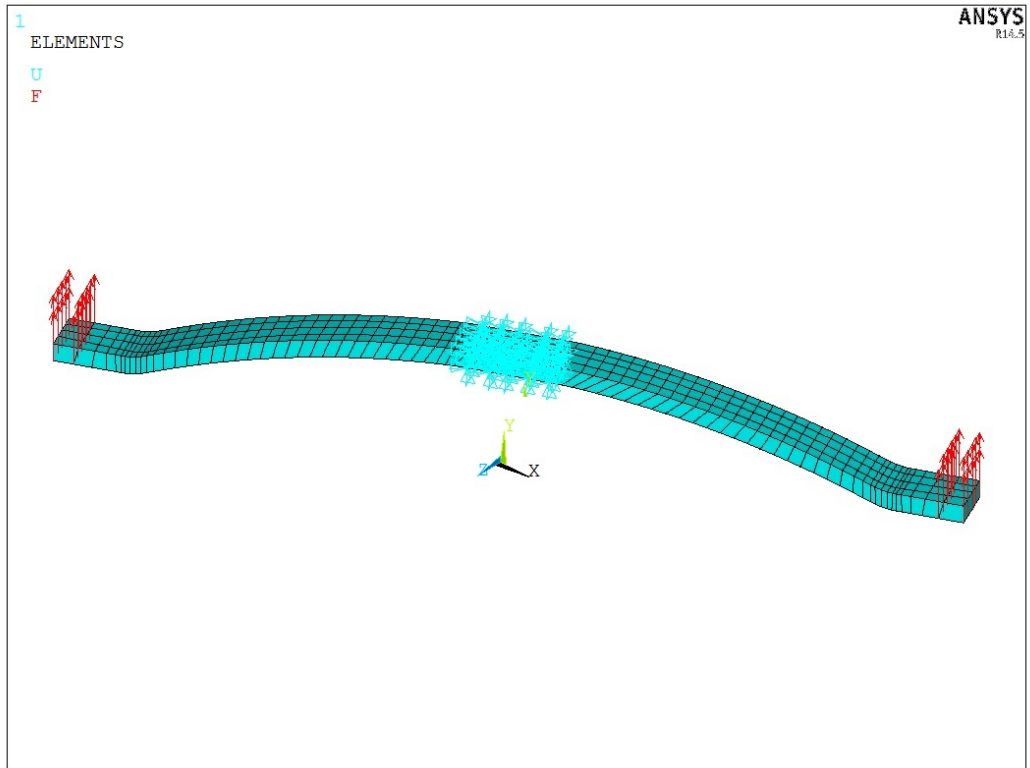
test sonuçlarında farklı iki kumaş ara yüzey davranışındaki belirsizliğin yorulma davranışında istikrarsızlığa sebep olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak E-camı ve karbon kumaşın birlikte kullanılarak üretilen kompozit yaprak yaylarda bu birlikteliğin avantaj sağlamadığını söylemek mümkündür.

## BÖLÜM BEŞ

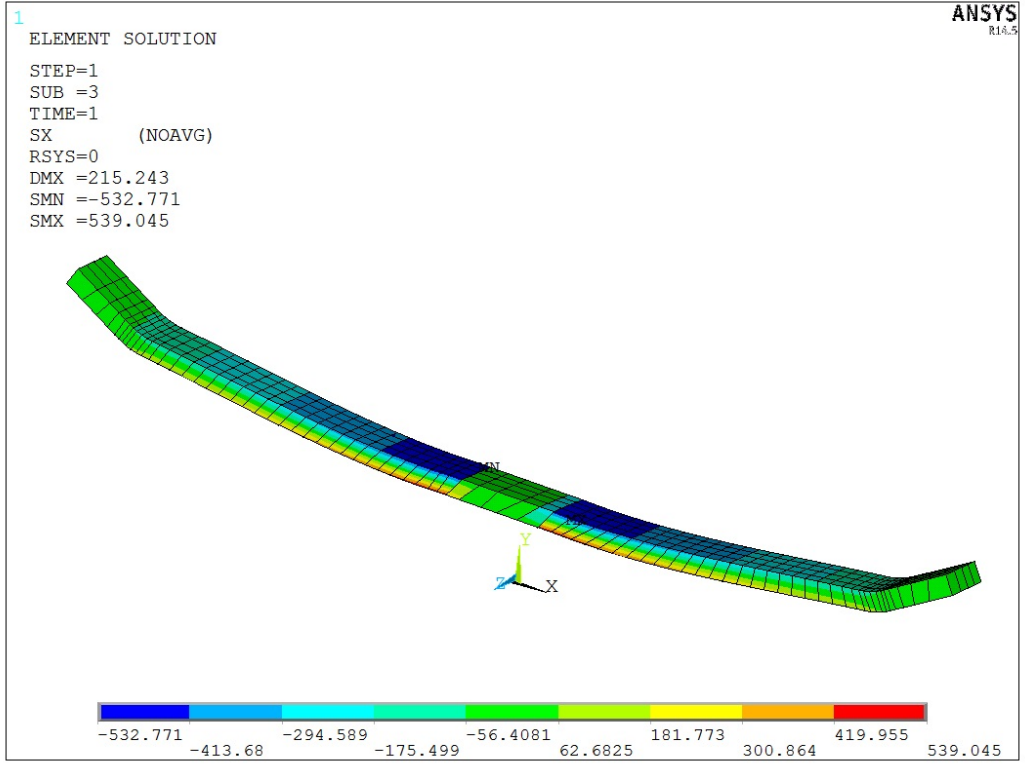
### SAYISAL MODELLEME VE ANALİZ

#### 5.1 Kompozit Yaprak Yayların Modellenmesi ve Statik Analizi

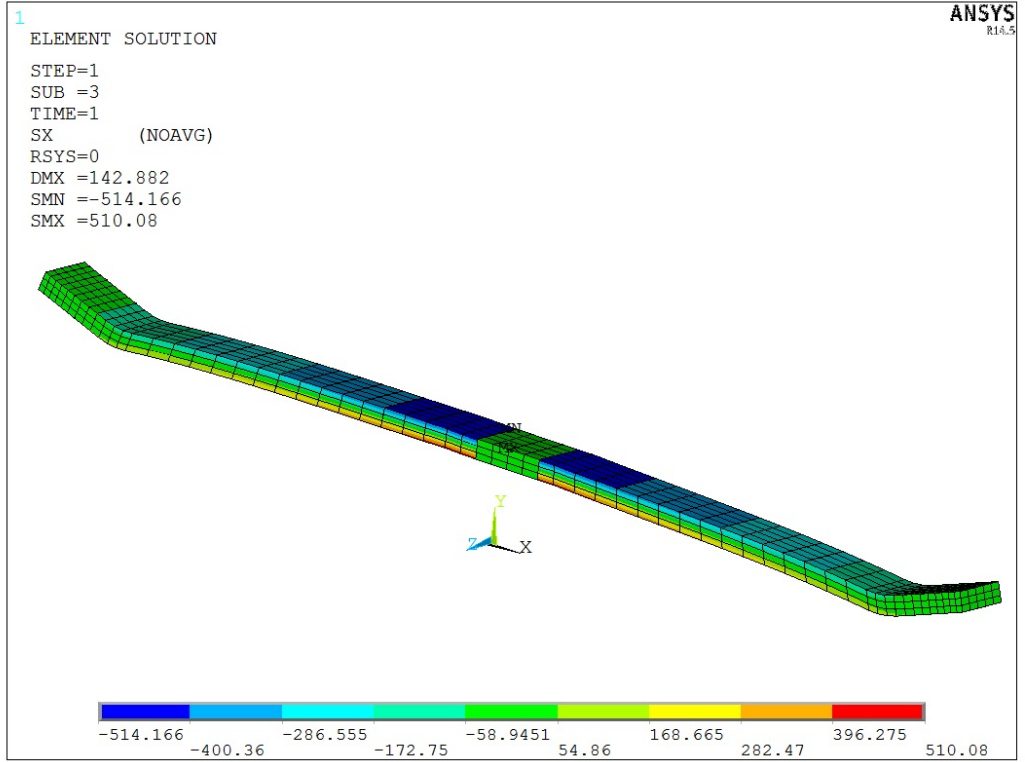
Kompozit yaprak yayın modellenmesi ve analizi için ANSYS 14.5 paket programı kullanılmıştır. E-Camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylara uygulanan sınır şartları, yaprak yayın araç üzerine monte edildiği şartlarla aynı olup Şekil 5.1' de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde sekiz düğüm noktalı Solid 185 elemanı kullanılmıştır. Elemanlar programın özelliklerinden tabakalı olarak ayarlanmıştır. Malzeme özellikleri ise Tablo 3.6' da verilmiş olup lineer ortotropik olarak tanıtılmıştır. Yaprak yayların üretiminde geometrik ön gerilme olduğundan analizde, büyük deplasman etkisi hesaba katılarak statik nonlineer çözüm yaptırılmıştır. Yaprak yaylara statik testlerde hasara uğradıkları ilk yükler uygulanmış olup bu yükler Tablo 4.3' te verilmiştir.



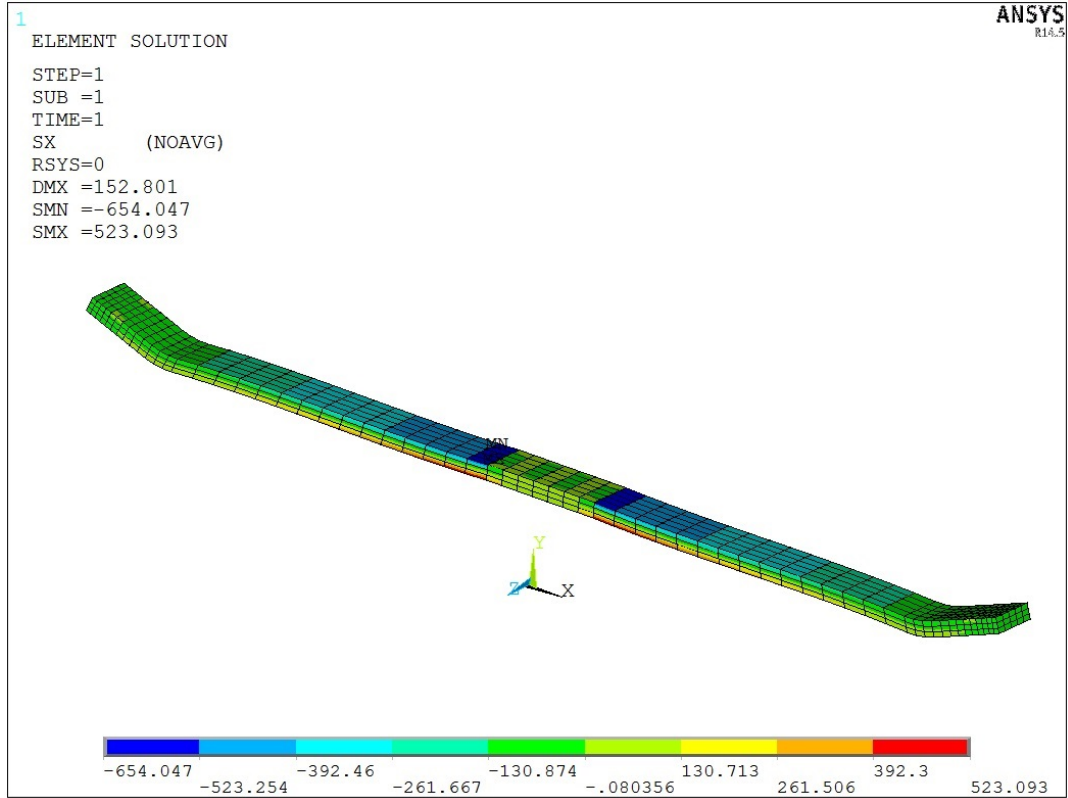
Şekil 5.1 Sınır şartları uygulanmış kompozit yaprak yay.



Şekil 5.2 E-camı/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği.



Şekil 5.3 E-camı-karbon/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği.



Şekil 5.4 Karbon/epoksi yaprak yayın X eksenindeki gerilme dağılımı grafiği.

Şekil 5.2-5.4' de verilen X eksenindeki gerilme dağılımlarında yaprak yayın üst bölgesinde bası gerilmesi, alt bölgesinde çeki gerilmesi oluşmaktadır. Grafiklerde ortaya çıkan maksimum gerilme bölgeleri ile testlerde hasarın olduğu bölgelerin aynı olması kurulan modelin doğruluğunu göstermektedir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ve test sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1 Kompozit yaprak yayların deneysel ve sayısal analiz sonuçları.

	E-camı/epoksi		E-camı-karbon/epoksi		Karbon/epoksi	
	Deneysel	FEA	Deneysel	FEA	Deneysel	FEA
Maksimum eğilme gerilmesi, (MPa)	589	539	550	514	693	654
Y ekseninde oluşan maksimum çökme, (mm)	175	215	116	143	121	153

Tablo 5.1' de verilen deneysel sonuçların hesaplanmasında Denklem 3.3 kullanılmıştır. Uygulanan statik testlerden elde edilen ortalama ilk hasar yükü kullanıldığından elde edilen gerilme aynı zamanda kompozit yaprak yayın statik mukavemet sınırırır. Y ekseninde görülen deplasman ise ilk hasar oluştuğunda test cihazından okunan deplasman değeriştir. Elde edilen maksimum eğilme gerilmesi değeri için deneysel sonuçlar ve sonlu elamanlar analiz (FEA) sonuçları karşılaştırıldığında E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylar için sırasıyla % 8, % 6,5 ve % 5,5 oranında sapma görülmektedir.



## BÖLÜM ALTI

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 6.1 Sonuçlar ve Öneriler

Bu doktora tezi kapsamında hafif ticari araçların arka süspansiyon sistemlerinde kullanılmakta olan çelik yaprak yayların yerini alabilecek, fiber takviyeli polimer kompozit yaprak yayların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak yapılan E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi düz uçlu kompozit yaprak yaylar vakum destekli reçine infüzyon (VARIM) yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen yaprak yaylara, Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği' nin (SAE) standartlarına ( SAE J 1528 ve HS 788) uygun olarak statik test ve yorulma testi uygulanmıştır. Statik testlerin sonucunda her üç tür kompozit yaprak yay karakteristiğinin, çelik yaprak yaydan beklenen tolerans dahilinde olduğu görülmüştür.

Uygulanan yorulma testlerinden çıkan sonuçlarda SAE HS 788 kılavuzu tarafından kullanıma sunulacak yaprak yaylar için en az ömür gerekliliği olarak istenilen  $50 \times 10^3$  çevrim yorulma ömrünü E-camı/epoksi, karbon/epoksi ve E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların tümünün sağladığı görülmüştür.

İstenilen  $50 \times 10^3$  çevrim minimum ömür için E-camı/epoksi yaprak yaylar ortalama olarak 8.840 N yüke dayanmıştır. Bu sonuçtan yola çıkarak E-camı/epoksi kompozit yaprak yayların azami yüklü ağırlığı ortalama olarak 1.800 kg olan hafif ticari araçlarda kullanılabileceğini söylemek mümkündür. Uygulanan testlerde ortaya çıkan hasar davranışlarından yola çıkarak, E-camı/epoksi kompozit yaprak yayların ani hasara uğramadığı diğer bir değişle, güvenli hasar davranışına sahip olduğu söylenebilir. Takviye malzemesi olan E-camının, karbon malzemeye göre düşük maliyetli oluşu da yine E-camı/epoksi kompozit yaprak yayı diğer iki türe göre avantajlı kılmaktadır. Diğer taraftan, E-camı/epoksi yaprak yayların tercih edilen  $100 \times 10^3$  çevrim yorulma ömrünü sağlayamadığı görülmüştür.

E-camı-karbon/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma testlerinden elde edilen sonuçlara göre  $50 \times 10^3$  çevrim ömür için ortalama olarak 7.750 N yüke dayandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, E-camı-karbon/epoksi kompozit yaprak yayların azami yüklü ağırlığı 1615 kg olan hafif ticari araçlarda kullanılabileceğini söylemek mümkündür. E-camı takviyesini ile karbon takviyesinin beraber kullanılması kompozit yaprak yay ağırlığında bir miktar azalma sağlamıştır. Test sonuçlarında oluşan hasarın, baskın olarak E-camı ve karbon tabakalarının birleşme yüzeyinde tabakalar arası ayrılma olduğu ve her numune için birbirinden farklı yük seviyelerinde olduğu görülmüştür. E-camı-karbon ara yüzey belirsizliği nedeniyle, E-camı-karbon/epoksi yaprak yayların test sonuçlarında yayılım diğer yaprak yaylara göre daha geniş olmuştur. Bu durum kullanım açısından önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca içerdiği karbon kumaş nedeniyle salt E-camına göre artan maliyet de diğer bir dezavantajdır. Buradan yola çıkarak E-camı ve karbon kumaşların birlikte kullanılmasının elle tutulur fayda sağlamadığını söylemek mümkündür. Ortalama yorulma ömrü bakımından, E-camı/epoksi yaprak yaylardan uzun olsa da E-camı-karbon/epoksi yaprak yaylar da tercih edilen  $100 \times 10^3$  çevrim yorulma ömrünü sağlayamamıştır.

Karbon/epoksi kompozit yaprak yayların yorulma testlerinden elde edilen sonuçlara göre  $50 \times 10^3$  çevrim ömür için ortalama olarak 7.960 N yüke dayandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, karbon/epoksi kompozit yaprak yayların azami yüklü ağırlığı 1750 kg olan hafif ticari araçlarda kullanılabileceğini söylemek mümkündür. En mukavim takviye malzemesi karbon olmasına rağmen statik testler sonucu karbon/epoksi yaprak yayların gevrek kırılma göstermesi kullanım şartlarında istenmeyen bir durumdur. Bu gevrek kırılmanın riskini ortadan kaldırmak için karbon tabaka sayısını arttırmak bir olasılık olsa da maliyet söz konusu olduğunda bu yaylar önemli ölçüde dezavantajlı konuma düşmektedir.

Bu doktora tezi ile ortaya çıkan diğer iki önemli sonuç yaprak yay test cihazı ve düz uçlu yaprak yaylar için göz bağlantısıdır. Yaprak yay test cihazı ile yaprak yaylar hem statik hem de dinamik şartlara göre test edilebilmektedir. Ayrıca, yaprak yaya yol düzensizliklerinden gelen tüm yüklerin uygulanabilmesi ve istenilen yük

kombinasyonlarında yükleme yapılabilmesi yaprak yay test cihazının özgün tasarımı ile sağlanmıştır. Üç parça olarak tasarlanıp düz uçlu yaprak yayların montajında kullanılan göz bağlantısında, yaprak yaya delik açılmadan bağlantı sağlanabilmesi özgün tarafıdır. Bu sayede hem yaprak yay mukavemetinde azalma görülmeyecektir hem de yaprak yayın araca montajı sırasında gözler arası mesafenin ayarlanması kolaylıkla yapılabilecektir.

Bu doktora tezinden elde edilen sonuçlardan yola çıkarak:

- i. Kullanıma sunulması en olası görülen E-camı/epoksi yaprak yayın yorulma ömrünün, tercih edilen  $100 \times 10^3$  çevrim ve üstüne ulaşması için geliştirilme ihtiyacı görülmektedir. Bu amaçla takviye malzemesine yüzey işleme uygulayarak ve silan kimyasallarını kullanarak takviye malzemesi matris yapı ara yüzey etkileşimini geliştirip bunun yaprak yayın yorulma ömrüne etkisinin incelenmesi,
- ii. E-camı/epoksi yaprak yayın yorulma ömrü hakkında daha detaylı bilgiye sahip olmak adına wöhler eğrisinin çıkarılması için çalışmalar yapılması,
- iii. Kompozit yaprak yayların, yoldan gelen yük kombinasyonları uygulanarak gerçek yol şartlarında test edilip sonuçların standart testlerle karşılaştırılması,

ileriki çalışmalar için önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Al-Qureshi, H.A. (2001). Automobile leaf springs from composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 58-61.
- Babalık, C.F. (2008). *Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri* (3. Baskı). Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Bathias, C. (2006). An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials. *International Journal of Fatigue*, 28, 1094-1199.
- Belingardi, G.ve Cavatorta, M.P. (2006). Bending fatigue stiffness and strength degradation in carbon-glass/epoxy hybrid laminates: Cross-ply vs angle-ply specimens. *International Journal of Fatigue*, 28, 815-825.
- Belingardi, G., Cavatorta, M.P. ve Frasca, C. (2006). Bending fatigue behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 66, 222-232.
- Cavatorta, M.P. (2007). A comparative study of the fatigue and post-fatigue behavior of carbon-glass/epoxy hybrid RTM and hand lay up composites. *Journal of Material Sciences*, 42, 8636-8644.
- El-Assal, A.M. ve Khashaba, U.A. (2007). Fatigue analysis of unidirectional gfrp composites under combined bending and torsional loads. *Composite Structures*, 79, 599-605.
- Garrett, T.K., Newton, K. ve Steeds, W. (2001). *The motor vechile* (13. Baskı). Oxford: Butterworht-Heinemann.
- Gerdeen, J.C. ve Rorrer, R.A.L. (2012). *Engineering design with polymers and composites* (2. Baskı). E-Kitap: Taylor&Francis ISBN: 13: 978-1-4398-6053-3.

- Gören, A. ve Sayman, O. (2010). Experimental failure analysis of bolted joints in moisture- and temperature- induced composite laminates under preload. *Polymer Composites*, 31, 173-178.
- Harris, B. (1999). *Engineering composite materials*. London: The Institute of Materials.
- Hegaze, M.M.E. (2002). *Finite element analysis of fatigue damage of composite laminated structures*. Doktora Tezi, Cranfield Üniversitesi, Cranfield.
- Hou, J.P., Cherruault, J-Y., Jeronimidis, G. ve Mayer, R. (2005). Design, testing, and simulation of fibre composite leaf springs for heavy axle loads. *Journal of Strain Analysis*, 40 (6), 497-504.
- Hou, J.P., Cherruault, J-Y., Jeronimidis, G. ve Mayer, R. (2007). Evolution of the eye-end design of a composite leaf spring for heavy axle loads. *Composite Structures*, 78, 351-358.
- İçten, B.M. (2009). Repeated impact behavior of glass/epoxy laminates. *Polymer Composites*, 30 (11), 1562-1569.
- Jones, R.M. (1999). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). USA: Taylor & Francis.
- Kaynak, C., Orgun, O. ve Tincer, T. (2005). Matrix and interface modification of short carbon fiber-reinforced epoxy. *Polymer Testing*, 24, 455-462.
- Kootsookos, A. ve Mouritz, A.P. (2004). Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites. *Composites Science And Technology*, 64, 1503-1511.

- Lee, J. ve Drzal, T.L. (2005). Surface characterization and adhesion of carbon fibers to epoxy and polycarbonate. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25, 389-394.
- Lee, Y., Pan, J., Hathaway, R. ve Barkey, M. (2005). *Fatigue testing and analysis*. USA: Elsevier Inc.
- Mäder, E., Gao, S. ve Plonka, R. (2007). Static and dynamic properties of single and multi-fiber/epoxy composites modified by sizings. *Composites Science and Technology*, 67, 1105-1115.
- Mahdi, E., Alkoles, O.M.S., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.B., Yonus, R. ve Goudah, G. (2006). Light composite elliptic springs for vechile suspension. *Composite Structures*, 75, 24-28.
- Mahdi, E. ve Hamouda, A.M.S. (2013). An experimental investigation into mechanical behaviour of hybrid and nonhybrid composite semi-elliptic springs. *Materials and Design*, 52, 504-513.
- Naik, N.K., Ramasimha, R., Arya H., Prabhu, S.V. ve Shamarao, N. (2001). Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates. *Composites: Part B*, 32, 565-574.
- Omar, A.M., Shabana, A.A., Mikkola, A., Loh, W. ve Basch, R. (2004). Multybody system modeling of leaf springs. *Journal of Vibration and Control*, 10, 1601-1638.
- Rajendran, I. ve Vijayarangan, S. (2001). Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms. *Computer and Structures*, 79, 1121-1129.
- Ramakrishna, S. (1997). Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications. *Materials and Design*, 18 (3), 167-173.

- Richard, D. (2003). Automotive suspension systems benefit from composite. *Reinforced Plastics*, 6, 18-21.
- Rosato Donald, V. ve Rosato Dominik, V. (2004). *Reinforced plastics handbook* (3. Baskı), Oxford: Elsevier Advanced Technology.
- Sakin, R. ve Ay, İ. (2008). Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Materials and Design*, 29, 1170-1181.
- Sancaktar, E. ve Gratton, M. (1999). Design, analysis, and optimization of composite leaf springs for light vehicle applications. *Composite Structures*, 44, 195-204.
- Senthilkumar, M. ve 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. *Material Science*, 13 (2), 141-146.
- Sever, K., Sarikanat, M., Seki, Y., Cecen, V. ve Tavman, I.H. (2008). Effects of fiber surface treatments on mechanical properties of epoxy composites reinforced with glass fabric. *Journal of Material Sciences*, 43, 4666-4672.
- Shakour, R.E., Ropp, P.A. ve Liu, D. (2009). Effect of fiber geometry on energy absorption of arched composites. *Journal of Composite Materials*, 43, 8, 809-823.
- Shan, Y. ve Liao, K. (2002). Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass-carbon/epoxy hybrid composites. *International Journal of Fatigue*, 24, 847-859.
- Shivashankar, G.S.S. ve Vijayarangan, S. (2006). Mono composite leaf spring for light vehicle design, end joint analysis and testing. *Material Science*, 12 (2), 220-225.

- Shokrieh, M.M. ve Rezaei, D. (2003). Analysis and optimization of a composite leaf spring. *Composite Structures*, 60, 317-325.
- Society of Automotive Engineers. (1982). *Manual on design and application of leaf springs*, HS 788.
- Society of Automotive Engineers. (1990). *Fatigue testing procedure for suspensions-leaf springs*, J1528.
- Subramanian, C. ve Senthilvelan, S. (2009) Development and preliminary performance evaluation of discontinuous fibre reinforced thermoplastic leaf spring. *Journal of Materials: Design and Applications*, 223,131-142.
- Subramanian, C. ve Senthilvelan, S. (2010). Effect of reinforced fiber length on the joint performance of thermoplastic leaf spring. *Materials and Design*, 31, 3733-3741.
- Subramanian, C. ve Senthilvelan, S. (2010). Fatigue performance of discontinuous fibre-reinforced thermoplastic leaf spring. *Journal of Materials: Design and Applications*, 224, 93-100.
- Subramanian, C. ve Senthilvelan, S. (2011). Joint performance of the glass fiber reinforced polypropylene leaf spring. *Composite Structures*, 93, 759-766.
- Subramanian, C. ve Senthilvelan, S. (2011). Short-term flexural creep behavior and model analysis of a glass-fiber-reinforced thermoplastic composite leaf spring. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 3679-3686.
- Talib, A.R.A., Ali, A., Goudah, G., Lah, N.A.C. ve Golestaneh, A.F. (2010). Developing a composite based elliptic spring for automotive applications. *Materials and Design*, 31, 475-484.



- Tsenoglou, J.C., Pavlidou, S. ve Papaspyrides, D. (2006). Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber-polymer composites. *Composites Science and Technology*, 66, 2855-2864.
- Van Paepegem, W. ve Degrieck, J. (2005). Simulating damage and permanent strain in composites under in-plane fatigue loading. *Computers and Structures* 83, 1930-1942.
- Varga, Cs., Miskolczi, N., Bartha, L. ve Lipoczi, G. (2010). Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface. *Materials and Design*, 31, 185-193.
- Wood, K. (2014). Composite leaf springs: Saving weight in production suspension systems. *Composite Technology*, 19 (1), 34-39.
- Zhang, H., Zhang, Z. ve Breidt, C. (2004). Comparison of short fibre carbon surface treatments on epoxy composites I: Enhancement of the mechanical properties. *Composite Science and Technology*, 64, 2021-2029.