

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**HELİKOPTERLERDE KULLANILAN KÜRESEL
ELASTOMERİK YATAKLARIN MEKANİK TASARIMI**

MEHMET SAİD BAYRAKLILAR

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


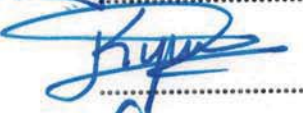



MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HELİKOPTERLERDE KULLANILAN KÜRESEL
ELASTOMERİK YATAKLARIN MEKANİK TASARIMI

MEHMET SAİD BAYRAKLILAR

Doç. Dr. Murat MAKARACI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Kadri Süleyman YİĞİT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ali ÇINAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Metin USTA
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Melih KUNCAN
Jüri Üyesi, Siirt Üniversitesi


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.11.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle paralel olarak kompozit teknolojisi de her geçen gün gelişmektedir. Farklı özelliklerdeki malzemelerin birleştirilerek daha iyi bir malzeme olarak kullanılması fikri malzeme teknolojisinde önemli bir değişime sebep olmuştur. Havacılık sanayiinde hem hafiflik hem yüksek mukavemet istenildiği için ikisini birlikte sağlayabilen kompozitler havacılık sanayisinin dikkatini çekmiştir. Bu sayede birçok uygulamada kompozitler önemli bir alternatif oluşturmuştur.

Helikopter pervanelerinde farklı yönlerde farklı karakteristik gösterecek yataklara ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü bazı yönlerde yüksek yük taşınması gerekirken, bazı yönlerde esneklik istenmektedir. Elastomerik yataklar elastomer ve destek malzemesinin üst üste sandviç şeklinde yerleştirilmesiyle oluşur ve elastomer tabakalarına dik gelen yüklere karşı rijit davranış gösterirken, tabakalara paralel gelen yüklere karşı esneklik sağlamaktadır. Bu sayede elastomer yatakların geometrisi rijitlik istenilen yöne dik esneklik istenilen yöne paralel olacak şekilde tasarlanmaktadır.

Helikopter pervanelerinde oluşan yük ve istenilen yatak davranışına uygun olan küresel elastomerik yataklar kullanılmaktadır. Geometrisindeki zorluklardan dolayı küresel elastomerik yataklarla ilgili çalışmalar düzlemsel elastomerik yataklarla kıyaslandığında oldukça azdır.

Bu çalışmada küresel elastomerik yatakların geometrik parametrelerindeki değişimin mekanik davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın ortaya çıkmasında ve sonuca ulaşmasında emeği geçen değerli danışmanım Doç. Dr. Murat MAKARACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı ÖZTÜRK ve Dr. Öğr. Üyesi Melih KUNCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Kasım-2019

M. Said BAYRAKLILAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Elastomerlerin Deprem Sönümleyici Olarak Kullanılması	5
1.2. Elastomerlerin Helikopterlerde Kullanılması	9
1.2.1. Helikopterlerde kullanılan elastomerik yatakların tarihi.....	12
1.2.2. Elastomer yatakların avantajları.....	14
1.2.3. Helikopterlerde kullanılan elastomerik yatağın sönümlenme davranışının modellenmesi.....	15
1.2.4. Helikopterlerde kullanılan elastomer yatağın sonlu elemanlar analizi.....	25
1.2.5. Deneysel elastomer çalışmaları.....	26
1.3. Elastomerik Yatağın Basınç Teorisi.....	28
1.3.1. Sonsuz şerit.....	34
1.3.2. Dairesel yatak.....	35
1.3.3. Halka yatak.....	36
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	40
2.1. Modelleme	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
3.1. Delik Çapının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	48
3.2. Dış Yüzey Koniklik Açısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	53
3.3. Dış Yüzey Eğrilik Yarıçapının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	58
3.4. Delik Koniklik Açısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	62
3.5. Elastomer Tabaka Kalınlığının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	67
3.6. Elastomer Tabaka Sayısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	72
3.7. Küresel Elastomerik Yatak İçin En Uygun Geometrik Parametreler	76
3.8. Elastomer Yatağa Uygulanılan Basınç Miktarının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi.....	79
3.9. Elastomer Yatağa Uygulanılan Açısız Yer Değiştirme Yüklemesinin Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi	84
3.10. Destek Elemanı Olarak AA7075 Kullanılmasının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi.....	88
3.11. Bulguların Değerlendirilmesi ve Tartışılması	89

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR	101
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	107
ÖZGEÇMİŞ	108



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elastomerik yatak	4
Şekil 1.2.	Şekillerine göre elastomerik yataklar	5
Şekil 1.3.	Los Angeles Acil Yardım Merkezi	7
Şekil 1.4.	Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Deprem İzolatörü.....	7
Şekil 1.5.	Elastomerik Yatak Performans Testi a) Test öncesi b) %200 Kayma genlemesi c) %300 Kayma genlemesi d) %500 Kayma genlemesi	8
Şekil 1.6.	Mafsallar ve Kanat hareketleri	9
Şekil 1.7.	Westland Wessex helikopteri	10
Şekil 1.8.	Westland Wessex Aktarma Merkezi Şematik Görünümü	10
Şekil 1.9.	Westland Wessex Aktarma Merkezi Fotoğrafı	11
Şekil 1.10.	AH-64 Apache Elastomerik yatak	13
Şekil 1.11.	Boeing rotor hub	15
Şekil 1.12.	Polimerlerin gerilme genleme davranışı	16
Şekil 1.13.	İki kanatlı helikopterin yataklarına gelen yük ve salınımlar.	18
Şekil 1.14.	Standard Solid Modeli	20
Şekil 1.15.	Genelleştirilmiş Wiechert modeli	20
Şekil 1.16.	Anlık Yükleme şekilleri	20
Şekil 1.17.	Kelvin ve Maxwell modeli	21
Şekil 1.18.	Statik ve harmonik yüklemelerin zamana göre değişimi	21
Şekil 1.19.	Dikdörtgen malzeme yükleme şekli	22
Şekil 1.20.	a) Rastgele şekilli bir plakanın ortasında kartezyen koordinat sistemi b) şekil değişimi	30
Şekil 1.21.	2b genişliğinde sonsuz şerit	34
Şekil 1.22.	Sonsuz şerit basınç dağılımı.	35
Şekil 1.23.	d çapında dairesel elastomer	35
Şekil 1.24.	Dairesel yatak basınç dağılımı.....	36
Şekil 1.25.	Halka yatağın basınç dağılımı.	37
Şekil 1.26.	Halka yatak yük modül diyagramı	38
Şekil 2.1.	Elastomerik yatak.	40
Şekil 2.2.	Elastomerik yatağın kesiti	41
Şekil 2.3.	Elastomer yataklar (a) düzlemsel (b) küresel.	43
Şekil 2.4.	Elastomerik yatakta kullanılan malzemeler.....	43
Şekil 2.5.	Hiperelastik malzeme davranışını belirlemek için yapılan tek eksenli deneysel test	44
Şekil 2.6.	Hiperelastik malzeme davranışını belirlemek için yapılan iki eksenli deneysel test	45
Şekil 2.7.	Elastomer yatağın geometrik parametreleri.....	46
Şekil 2.8.	Elastomerik yatağın kesiti.	47
Şekil 2.9.	Elastomerik yatağın basınç ve yerdeğiştirmeye yüklemesi.	47
Şekil 3.1.	Delik çapının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi	50
Şekil 3.2.	Delik çapının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	50

Şekil 3.3.	Örnek 1-4 genleme dağılımı.....	51
Şekil 3.4.	Örnek 5-7 genleme dağılımı.....	51
Şekil 3.5.	Örnek 1-4 gerilme dağılımı.....	52
Şekil 3.6.	Örnek 5-7 gerilme dağılımı.....	52
Şekil 3.7.	Örnek 1 456 kN basınç yüklemesi altında gerilme genleme grafiği.....	53
Şekil 3.8.	Dış yüzey koniklik açısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.....	55
Şekil 3.9.	Dış yüzey koniklik açısının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	56
Şekil 3.10.	Örnek 8-11 genleme dağılımı.....	56
Şekil 3.11.	Örnek 12-14 genleme dağılımı.....	57
Şekil 3.12.	Örnek 8-11 gerilme dağılımı.....	57
Şekil 3.13.	Örnek 12-14 gerilme dağılımı.....	58
Şekil 3.14.	Dış yüzey eğrilik yarıçapının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.....	59
Şekil 3.15.	Dış yüzey eğrilik yarıçapının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	60
Şekil 3.16.	Örnek 15-18 genleme dağılımı.....	61
Şekil 3.17.	Örnek 19-21 genleme dağılımı.....	61
Şekil 3.18.	Örnek 15-18 gerilme dağılımı.....	62
Şekil 3.19.	Örnek 19-21 gerilme dağılımı.....	62
Şekil 3.20.	Delik koniklik açısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.....	64
Şekil 3.21.	Delik koniklik açısının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	65
Şekil 3.22.	Örnek 22-25 genleme dağılımı.....	65
Şekil 3.23.	Örnek 26-28 genleme dağılımı.....	66
Şekil 3.24.	Örnek 22-25 gerilme dağılımı.....	66
Şekil 3.25.	Örnek 26-28 gerilme dağılımı.....	67
Şekil 3.26.	Örnek 29-32 genleme dağılımı.....	68
Şekil 3.27.	Örnek 33-35 genleme dağılımı.....	69
Şekil 3.28.	Örnek 29-32 gerilme dağılımı.....	69
Şekil 3.29.	Örnek 33-35 gerilme dağılımı.....	70
Şekil 3.30.	Elastomer tabaka kalınlığının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.....	71
Şekil 3.31.	Elastomer tabaka kalınlığının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	71
Şekil 3.32.	Elastomer tabaka sayısının gerilme-genleme dağılımına etkisi.....	73
Şekil 3.33.	Elastomer tabaka sayısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.....	74
Şekil 3.34.	Örnek 36-39 genleme dağılımı.....	74
Şekil 3.35.	Örnek 40-42 genleme dağılımı.....	75
Şekil 3.36.	Örnek 36-39 gerilme dağılımı.....	75
Şekil 3.37.	Örnek 40-42 gerilme dağılımı.....	76
Şekil 3.38.	Elde edilen en düşük gerilmelere (örnek 7, 14, 28) ve optimum geometrik parametrelere (örnek 43) sahip elastomer yatakların gerilme-genleme grafiği.....	77
Şekil 3.39.	Örnek 43 112 kN basınç yüklemesinde elde edilen gerilme genleme grafiği.....	77
Şekil 3.40.	Örnek 43 gerilme ve genleme dağılımı.....	78

Şekil 3.41.	Elde edilen en düşük gerilmelere (örnek 7, 14, 28) ve optimum geometrik parametrelere (örnek 43) sahip elastomer yatakların gerilme dağılımları.	78
Şekil 3.42.	Uygulanılan basınç miktarının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.	81
Şekil 3.43.	Uygulanılan basınç miktarının gerilme-genleme dağılımına etkisi.	81
Şekil 3.44.	Örnek 44-47 genleme dağılımı.	82
Şekil 3.45.	Örnek 48-50 genleme dağılımı.	82
Şekil 3.46.	Örnek 44-47 gerilme dağılımı.	83
Şekil 3.47.	Örnek 48-50 gerilme dağılımı.	83
Şekil 3.48.	Uygulanılan açısız yer değiştirme yüklemesinin gerilme genleme dağılımına etkisi.	84
Şekil 3.49.	Uygulanılan açısız yer değiştirme yüklemesinin her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.	85
Şekil 3.50.	Örnek 51-54 genleme dağılımı.	86
Şekil 3.51.	Örnek 55-57 genleme dağılımı.	86
Şekil 3.52.	Örnek 51-54 gerilme dağılımı.	87
Şekil 3.53.	Örnek 55-57 gerilme dağılımı.	87
Şekil 3.54.	Destek elemanı olarak AA7075 kullanılmasının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.	88
Şekil 3.55.	Delik çapı-gerilme ilişkisi	89
Şekil 3.56.	Dış yüzey koniklik açısı-gerilme ilişkisi	90
Şekil 3.57.	Dış yüzey eğrilik yarıçapı-gerilme ilişkisi	91
Şekil 3.58.	Delik koniklik açısı-gerilme ilişkisi	93
Şekil 3.59.	Tabaka kalınlığı-gerilme ilişkisi.	94
Şekil 3.60.	Kuvvet miktarı-gerilme ilişkisi.	96
Şekil 3.61.	Açısız yer değiştirme-gerilme ilişkisi.	96

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Küresel elastomerik yatakların mekanik özellikleri üzerine yapılan önceki çalışmalar.	42
Tablo 2.2.	Elastomerik yatakta kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	43
Tablo 3.1.	Örnek 1-7'nin geometrik parametreleri.	49
Tablo 3.2.	Örnek 7-14'ün geometrik parametreleri.	54
Tablo 3.3.	Örnek 14-21'in geometrik parametreleri.	60
Tablo 3.4.	Örnek 21-28'in geometrik parametreleri.	63
Tablo 3.5.	Örnek 28-35'in geometrik parametreleri.	68
Tablo 3.6.	Örnek 28,36-42'nin geometrik parametreleri.	72
Tablo 3.7.	Örnek 7,14,28 ve 43 geometrik parametreleri.....	79

SİMGELER DİZİNİ

A	: Elastomer tabaka yüzey alanı, (mm ²)
a	: Küresel elastomerik yatağın eksenel yarıçapı, (mm)
b	: Elastomer tabaka genişliği, (mm)
C ₁₀ , C ₀₁	: Malzeme sabitleri
d	: Elastomer tabakanın iç çapı, (mm)
D	: Elastomer tabakanın dış çapı, (mm)
E _c	: Kauçuk-çelik kompozitin anlık elastisite modülü, (MPa)
G	: Elastomerin kayma modülü, (MPa)
H	: Elastomer tabakanın kalınlığı, (mm)
I ₁ , I ₂	: Genleme tensörünün birinci ve ikinci sabitleri
K	: Eğilme rijitliği, (N/mm)
P	: Basınç, (N)
P _c	: Basınç yüklemesinin tabakaya dik bileşeni, (N)
R	: Dış yüzey eğrilik yarıçapı, (mm)
S	: Şekil faktörü
t	: Elastomer tabaka kalınlığı, (mm)
W	: Birim hacim için genleme enerjisi(MPa)
α	: Delik koniklik açısı, (°)
β	: Dış yüzey koniklik açısı, (°)
β ₀ , β ₁ , β ₂	: Bağ (Joint) açıları, (°)
θ	: Açısal yer değiştirme, (°)
d	: Elastomer tabakanın iç çapı, (mm)
φ _p	: Basınç yüklemesinin tabakaya dik bileşeni ile basınç yüklemesi arasındaki açı, (°)
φ _t	: Koni açısı, (°)
σ	: Normal gerilme, (kPa)

HELİKOPTERLERDE KULLANILAN KÜRESEL ELASTOMERİK YATAKLARIN MEKANİK TASARIMI

ÖZET

Uluslararası literatürde düzlemsel elastomerik yataklarla ilgili birçok çalışma dikkati çekerken, çok katmanlı olmasından ve tasarım zorluklarından dolayı küresel elastomerik yataklarla ilgili çok az çalışma bulunmaktadır. Elastomerik yataklar, tabakalara dik gelen yüklere karşı rijitken tabakalara paralel gelen yüklere karşı esnektir. Böylece küresel elastomerik yataklar helikopter pervanelerinin dönmesinden kaynaklı merkez kaç kuvvetine karşı rijit, pervanenin kanat çırpma ve dönme hareketine karşı esneklik sağlamaktadır. Elastomer malzeme üzerindeki gerilmeler, yatağın ömrünü azaltır; bu ise, maksimum gerilmenin azaltılmasının, elastomerik yatak ömrü için çok önemli olduğunu gösterir. Bu çalışmada küresel elastomerik yatağın mekanik davranışı, doğrusal olmayan sonlu elemanlar programı ABAQUS ile modellenmiş ve simüle edilmiştir. Bu çalışmada elastomer tabakalarındaki gerilme dağılımları, hiperelastik Mooney-Rivlin yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Basınç yüklemesi ve açılmalık yer değiştirme yüklemesine maruz küresel elastomerik yatağın, delik çapının, delik şeklinin, elastomer tabaka kalınlığının, tabaka sayısının ve elastomer yatak profilinin elastomer tabakalar üzerindeki maksimum gerilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; basınç ve açılmalık yer değiştirme yükü altındaki en yüksek gerilme, en dıştaki son katmanlarda meydana gelmektedir. Elastomer katmanların şeklini ve kalınlığını değiştirerek tüm katmanlar üzerindeki maksimum gerilmeleri azaltmak mümkündür. En önemli azalma, delik çapındaki değişikliklerle mümkün olmakta ve böylece elastomer yatağın ömrünün uzatılabileceği ortaya çıkmaktadır. Sonuç itibarıyla elastomerik yatakların ömrünün uzatılması ile önemli oranda maliyetler düşülebilecektir. Bu tez aynı zamanda, Türkiye’de küresel elastomerik yatakların incelenmesine ve tasarımına dair yapılan ilk çalışma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: ABAQUS, Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi, Hava Araçları, Hiper-elastisite, Küresel Elastomerik Yatak.

MECHANICAL DESIGN OF SPHERICAL ELASTOMERIC BEARINGS USED IN HELICOPTERS

ABSTRACT

While there are many studies on planar elastomeric bearings in the international literature, there are few studies on spherical elastomeric bearings due to their multilayered and design difficulties. The elastomeric bearings are rigid against loads perpendicular to the sheets, while being flexible against loads parallel to the sheets. Thus, the spherical elastomeric bearings are rigid against the centrifugal force caused by the rotation of the helicopter propellers and provide flexibility against the flapping and rotational movement of the propeller. Stresses on elastomer material reduce bearing life; this means that the reduction of the maximum stress is very important for the elastomeric bearing life. In this study, mechanical behavior of spherical elastomeric bearing is modeled and simulated by nonlinear finite element code ABAQUS and stress distributions in elastomer layers are determined by using hyperelastic Mooney-Rivlin approach. The effect of spherical elastomeric bearing subjected to pressure loading and angular displacement loading, hole diameter, hole shape, elastomer layer thickness, number of layers and elastomer bearing profile on the maximum stress on the elastomer layers was investigated. The results showed that; the highest stress under pressure and angular displacement load occurs in the outermost final layers. It is possible to reduce the maximum stresses on all layers by changing the shape and thickness of the elastomer layers. The most significant reduction is made possible by the change in the hole diameter, thus extending the life of the elastomeric bearing, and hence reducing associated costs. This thesis also constitutes the first study on investigation and design of spherical elastomeric bearings in Turkey.

Keywords: ABAQUS, Nonlinear Finite Element Analysis, Aero-vehicles, Hyper-elasticity, Spherical Elastomeric Bearing.

GİRİŞ

Değişik malzemeler eklenerek oluşturulan -kimyacıların deyimiyle- bileşik olarak adlandırılan elastomerler (doğal ve sentetik kauçuk) amorf (şekilsiz) polimerlerdir. Isıtılma ve reaksiyon sonrası (vulkanizasyon), bu malzemeler kauçuk haline dönüşür. Bu malzemeler lastiksi yapıda ve elastik olduğundan viskoelastik özelliğinden dolayı enerjiyi sönümlerler. Bu malzemelerin kayma ve basma mukavemetleri yüksektir.

Malzemelerin elastik modül ve sönümleme olarak iki temel mekanik özellikleri vardır. Genellikle şekil değişimi sırasında enerji kaybı olur (ısıya dönüşür). Viskoelastik davranış yay ve sönümleyici elemandan oluşan bir yapıyla modellenir. Yaylarda gerilme, uzama ile doğru orantılıdır (Hook kanunu), sönümleyicilerde ise gerilme, uzama hızıyla orantılıdır. Elbette mekanizma bu kadar basit olmamakla birlikte, sönümleme zamana ve viskoziteye bağlıdır. Bir örnekle açıklamak gerekirse araba amortisörleri soğuk havalarda sertleşir (yüksek viskozite) ve kilit taşı gibi sürekli bozuk bölgelerde sönümlemesi zayıflar. Yük kalktıktan sonra şekil değiştirmiş elastomerin orijinal şekline dönme hızı iç sürtünme katsayısının fonksiyonudur. Bu katsayı çok farklı değerlerde olabilir, örneğin sentetik kauçukta çok yüksek iken doğal kauçukda çok düşüktür [1].

Elastomerlerin en çok kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir:

- Yalıtım
- Titreşim ve darbe sönümleyici
- Yük dayanım uygulamaları

Elastomerler deprem sönümleyici olarak binaların kolonlarına yerleştirilmektedir. Başlarda sadece elastomerler kullanılmış, ancak binanın ağırlığından dolayı elastomerler bombe yapmıştır. Bu bombeyi engellemek için elastomer tabakalar arasına çelik takviye elemanları yerleştirilmiş ve elastomerik yataklar ortaya çıkmıştır.

Elastomerik yataklar, elastomer tabakalar arasına çelik levhalar yerleştirmek suretiyle sandviç şeklindeki yapılardan oluşmaktadır. Bu yataklar levhalara dik yönde gelen

kuvvetlere dayanım sağlarken, levhalara paralel yönde salınım hareketlerine izin vermektedir. Bu sayede yüklerin ve salınımların yönlerine göre elastomer yatakların Şekilleri belirlenmektedir. Örneğin düşey düzlemde yük altında rijitlik ve yatay düzlemde salınıma maruz kalacak sistemlerde düzlemsel elastomerik yataklar kullanılırken, hem düşey hem yatay düzlemde yük altında çalışıp bu düzlemler etrafında salınım yapacak sistemlerde küresel elastomerik yataklar kullanılmaktadır.

Basit geometrisi ve yaygın ticari kullanım alanından dolayı düzlemsel elastomerik yataklarla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak küresel elastomerik yatakların kompleks geometrisi ve spesifik kullanım alanlarından dolayı literatürde çok kısıtlı çalışmaya rastlanmaktadır.

Helikopter yataklarında sönümleyici olarak hidrolik sistemler kullanılmıştır. Hidrolik sistemlerin karmaşık yapısı, bakım sıklığı ve bakım maliyetleri düŐünüldüđünde bu sistemlere alternatif sistemler arayıŐı ortaya çıkmıştır.

Elastomerik yatakların helikopterlerde kullanılmasıyla kompleks yapıdan kurtularak tek parça halinde bir yatak elde edilmiş, birbiri üzerinde çalışan bir sistem olmadığından bakım gerektirmeyen bir yapıyla daha uzun saatler güvenle kullanılabilen bir yatak olarak değerlendirilmektedir [9].

Küresel elastomerik yatakların helikopter kanatlarında kullanıldığı düŐünüldüđünde, konuyla ilgili çalışmaların ülkemiz için ne kadar önemli olduğu anlaŐılacaktır. Küresel elastomerik yatakları günümüzde Lord (Amerika) ve Hutchinson (Fransa) firmaları üretmektedir.

Yerli helikopterini üreterek dıŐa bağımlılığını azaltmak isteyen ülkemizin helikopterinin bu kritik parçasını üretmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda bu çalışma ülkemizin üretmeyi planladığı küresel elastomerik yatak için en uygun geometriyi ortaya çıkarmayı hedeflemektedir.

Elastomer zerine gelen gerilmeler yükseldikçe yatağın ömrü azalmaktadır. Bu sebeple elastomer yatağın ömrünü uzatmak için elastomer tabakalara gelen gerilmelerin azaltılması gerekmektedir.

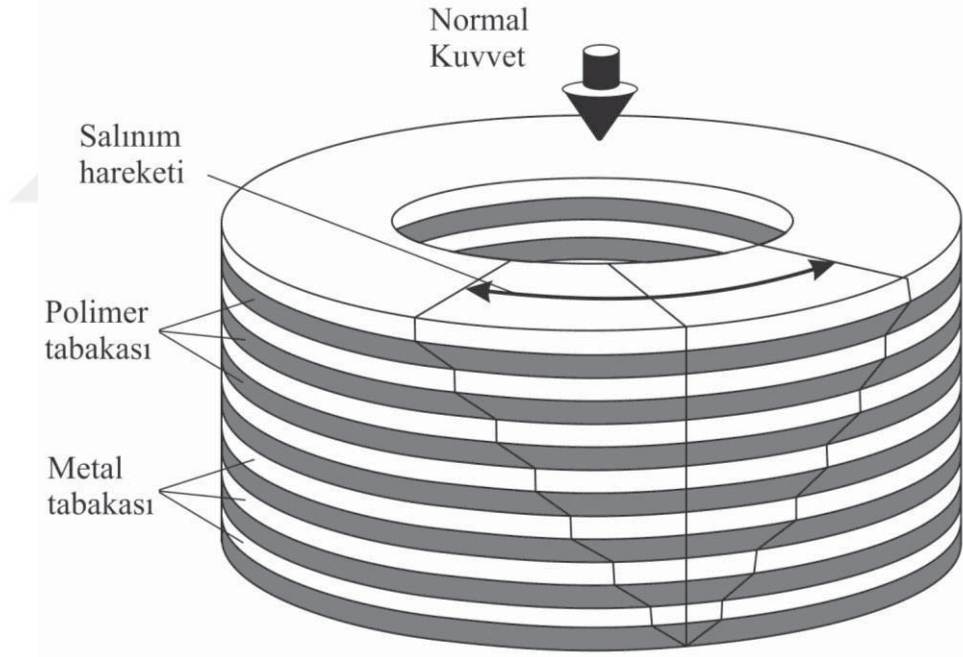
Bu çalışma ile farklı çalışma şartlarına uygun olarak küresel elastomerik yatakların tasarımı konusundaki bilgiyi imalat sanayiine kazandırmak amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda elastomerik yatağın geometrik parametrelerinin, elastomer tabakalarda oluşan genleme ve maksimum gerilme üzerine etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma, basınç ve açısal yer değiştirme yüklemesi altında çalışan küresel elastomerik yatağın iç çapı, dış yüzey koniklik açısı, dış yüzey eğrilik yarıçapı, delik koniklik açısı ve tabaka kalınlığıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi göstermesi bakımından özgün bir çalışmadır.

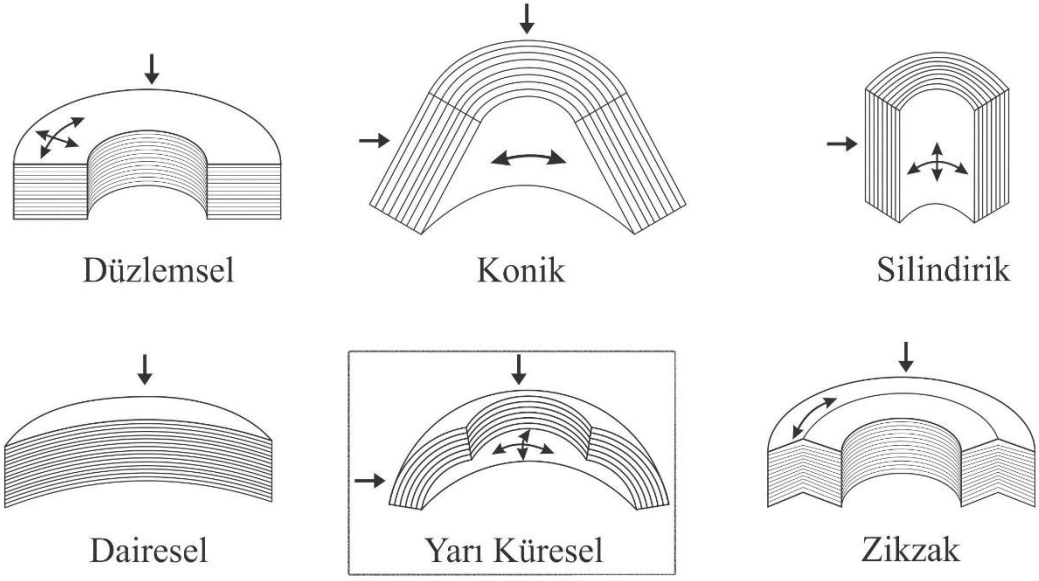
Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tezin tanıtımı, önemi, içeriği ve amacı anlatılmıştır. Genel bilgiler bölümünde elastomerik yataklarla ilgili genel bilgiler ve konu hakkında daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Malzeme ve yöntem bölümünde küresel elastomerik yatağın modellenmesi, kullanılan malzeme ve yöntem hakkında bilgiler verilmiştir. Bulgular ve tartışma bölümünde öncelikle çalışmada elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmiş, sonra sonuçların yorumlanması ve tartışması yapılmıştır. Sonuçlar ve öneriler kısmında çalışma sonucu elde edilen sonuçlar ve tezin özgün yönü özet olarak verilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

Elastomerik yatakların genel yapısı Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1’de de görüldüğü gibi polimer (elastomer) tabakalar arasında çelik levhalar yerleştirmek suretiyle sandviç şeklindeki yapılardan oluşmaktadır. Bu yataklar levhalara dik yönde gelen kuvvetlere dayanım sağlarken, levhalara paralel yönde salınım hareketlerine izin vermektedir. Bu sayede yüklerin ve salınımların yönlerine göre elastomer yatakların şekilleri belirlenmektedir. Örneğin düşey düzlemde yük altında rijitlik ve yatay düzlemde salınıma maruz kalacak sistemlerde düzlemsel elastomerik yataklar kullanılırken, hem düşey hem yatay düzlemde yük altında çalışıp bu düzlemler etrafında salınım yapacak sistemlerde küresel elastomerik yataklar (Şekil 1.2) kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Elastomerik yatak [3].



Şekil 1.2. Şekillerine göre elastomerik yataklar [3].

1.1. Elastomerlerin Deprem Sönümleyici Olarak Kullanılması

1889 yılında çelik takviyesi yapılmamış doğal kauçuk Avustralya'da (Victoria) bir viyadükteki tren rayının altına yerleştirilmiştir. 1891 yılında viyadük trafiğe açılmış 1990'a kadar en ağır sevkياتın yapıldığı, saatte yaklaşık 30 tren geçen Victoria tren yolunda 100 yıl farklı sıcaklık, farklı çevresel koşul ve farklı yüklerde çalışan doğal kauçuktan bir parça kesilerek laboratuvarında test edilmiştir. Testler sonucunda kauçukta önemli bir bozulmaya rastlanmamıştır.

Elastomerlerin çok farklı uygulamalarda kullanılmasına sebep olan karakteristikleri [1];

- Kopma mukavemeti
- Sıcaklıkla özelliklerinin değişmesi
- Uzama miktarıyla özelliklerinin değişmesi
- Sıvılara ve diğer kirleticilere karşı direnci
- Malzemelerle birleşmede uyum
- İç sönümleyicilik

Bazı destek elemanları kullanarak binaları depremin yıkıcı etkisinden kurtarmak niyetiyle birçok mekanizma geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları binaların altında merdaneler, kum tabakaları veya binanın kaymasını sağlayacak malzemeler kullanmak olarak sıralanabilir. Deprem sırasında kaymayı sağlamak için Sievastopol, Ukrayna ve

Meksika’da 5 okul merdaneler üzerine inşa edilmiş ve Çin’de ise bir bina toprak tabakalar üzerine inşa edilmiştir.

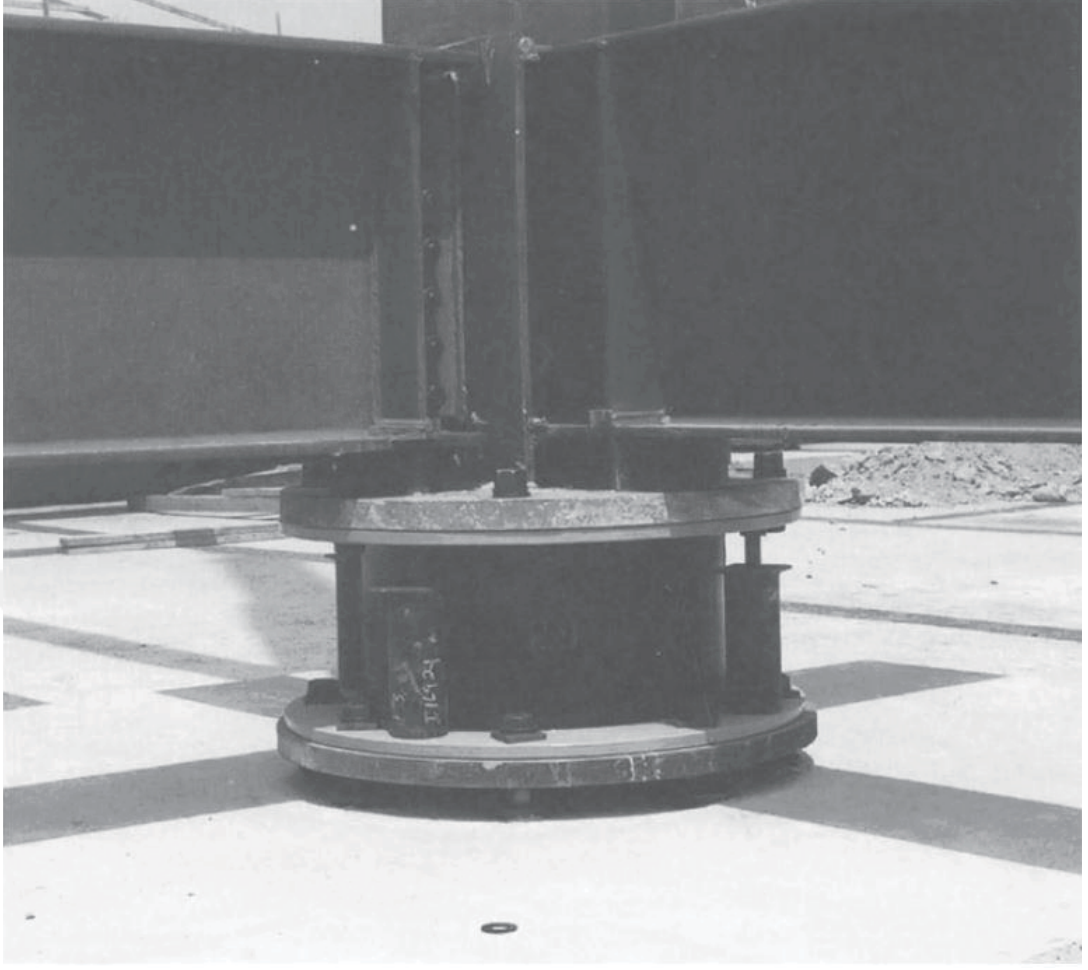
Deprem izolasyonunda elastomerik yatakların kullanımı da oldukça yaygındır. Yer hareketinin yatay bileşeniyle binanın ilişkisini kesen yatay doğrultuda esnekliğe sahip elastomerik yatak kullanılarak, yer hareketinin büyük bir çoğunluğu elastomer yatakla sönümlenmiş olmaktadır.

Deprem koruyucu olarak elastomer ilk olarak Makedonya’daki bir ilkokulda kullanılmıştır. 1969’da tamamlanan bina büyük bloklar halinde doğal kauçuk kullanılan üç binadan biridir. Günümüzde kullanılan yataklardan farklı olarak takviye elemanı (örn. Çelik) kullanılmayan bu izolatörün dikey ve düşey esnekliği aynı olduğundan binanın ağırlığından dolayı kauçuk yan tarafa doğru bombe yapmıştır [10].

Çelik takviyeli elastomerik yataklar kullanılan uygulamalar oldukça fazladır. Çelik takviyeler sayesinde bu yataklar düşey doğrultuda oldukça rijitken yatay doğrultuda oldukça esnek olduğundan deprem yükleri kolaylıkla sönümlenebilmektedir. Bu yatakların üretimi kolay, hareketli parçası bulunmamakta, zamanla özelliğini kaybetmemekte ve çevresel şartlardan dolayı bozulmaya karşı dirençlidir [10]. Şekil 1.3’de Los Angeles acil yardım merkezinde ve Şekil 1.4’de Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesinde kullanılan elastomerik yatak görülmektedir. Şekil 1.5’de farklı koşullar altında elastomerik yatak performansları verilmiştir.

Elastomerik yataklar deprem izolatörü olarak bilgisayar merkezleri, ileri teknoloji üretim binaları, acil müdahale binaları ve hastaneler gibi büyük ve pahalı binalarda kullanılmaktadır. Bu yapılarda kullanılan izolatörler büyük, pahalı ve ağırdır. Tek bir izolatörün ağırlığı 1 tondan daha fazla olabilmektedir. Bu çok önemli depremden korunma stratejisini konutlar ve ticari binalar için de kullanılabilir bir şekilde yaygınlaştırmak için izolatörün fiyatını ve ağırlığını azaltmak gerekmektedir.

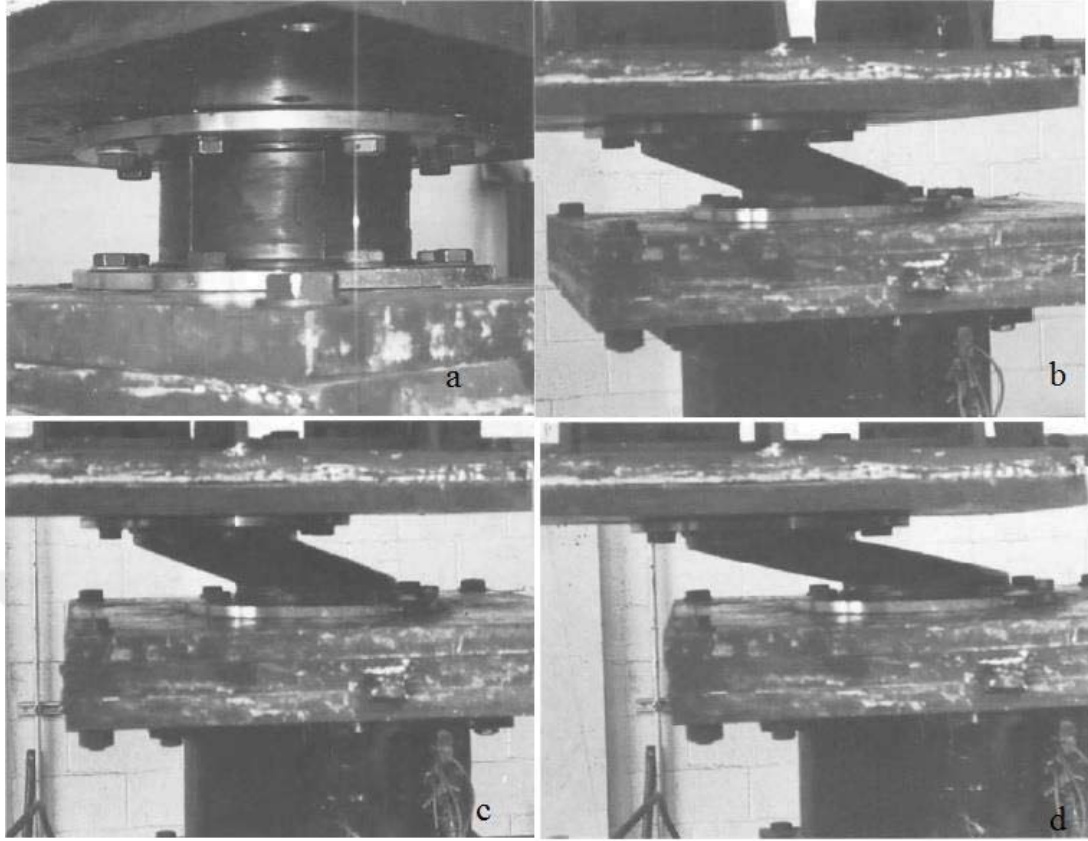
İzolatörün ağırlığının en önemli nedeni düşey rijitliği sağlayan çelik plakalardır. Standart elastomer izolatörler iki büyük (yaklaşık 25 mm) tutucuya ve 20 ince (yaklaşık 3mm) plakaya sahiptir.



Şekil 1.3. Los Angeles Acil Yardım Merkezi [10].



Şekil 1.4. Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Deprem İzolatörü.



Şekil 1.5. Elastomerik Yatak Performans Testi a) Test öncesi b) %200 Kayma genlemesi c) %300 Kayma genlemesi d) %500 Kayma genlemesi [10].

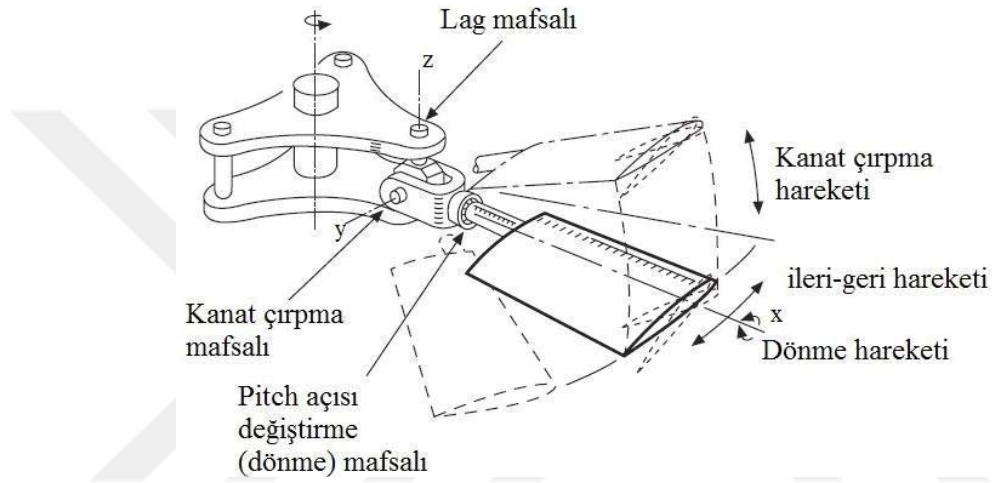
İzolatorün yüksek maliyetli üretimi, çelik ve elastomer malzemenin katmanlar halinde kalıbın içerisinde yapıştırılması prosesinin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Çelik plakalar kesilir, kumlanır, asitle temizlenir ve yapıştırıcıyla kaplanır. Sonra karışım halindeki kauçuk plaka, kalıbın içine aralıklarla dizilmiş çelik plakaların arasına yerleştirilir ve imalat prosesinin tamamlanması için birkaç saat basınç altında eritilir.

Düşey rijitliği sağlayacak bir fiber malzeme çeliğe göre daha hafif olacaktır. Fiber plakalar kullanıldığında üretim prosesi çeliğe göre daha kolay olacağından üretim maliyeti düşürülecektir. Fiber plakalar kullanıldığında, basınçlı bir kap içerisinde mikrodalgayla ısıtılarak nihai ürün elde edilebilmektedir.

Fiber kullanmanın diğer bir faydası izolatorü uzun dikdörtgen şerit halinde üretip, istenilen ölçülerde kesmek mümkün olmaktadır. Sonuç olarak çelik plakalar yerine fiber malzeme kullanıldığında hem daha hafif hem de daha ucuza mal edilmiş olmaktadır [14].

1.2. Elastomerlerin Helikopterlerde Kullanılması

Helikopter kanatların serbest hareketlerini sağlayan mafsallar sayesinde otojir (cayrokopter) ve sonra helikopter geliştirilebilmiştir. İlk mafsalları kullanımı 1904 yılında kanat kökündeki eğilme gerilmelerini rahatlatmak için, ileriye doğru uçuşlarda yükselen dönme momentlerini sönmüleyebilmek için Renard tarafından önerilmiştir. Fakat ilk başarılı uygulama 1920'lerin başında Cierva'nın sayesinde yapılmıştır. Bu mafsalların en önemlileri kanat çırpma hareketine uygun mafsallardır (Şekil 1.6).

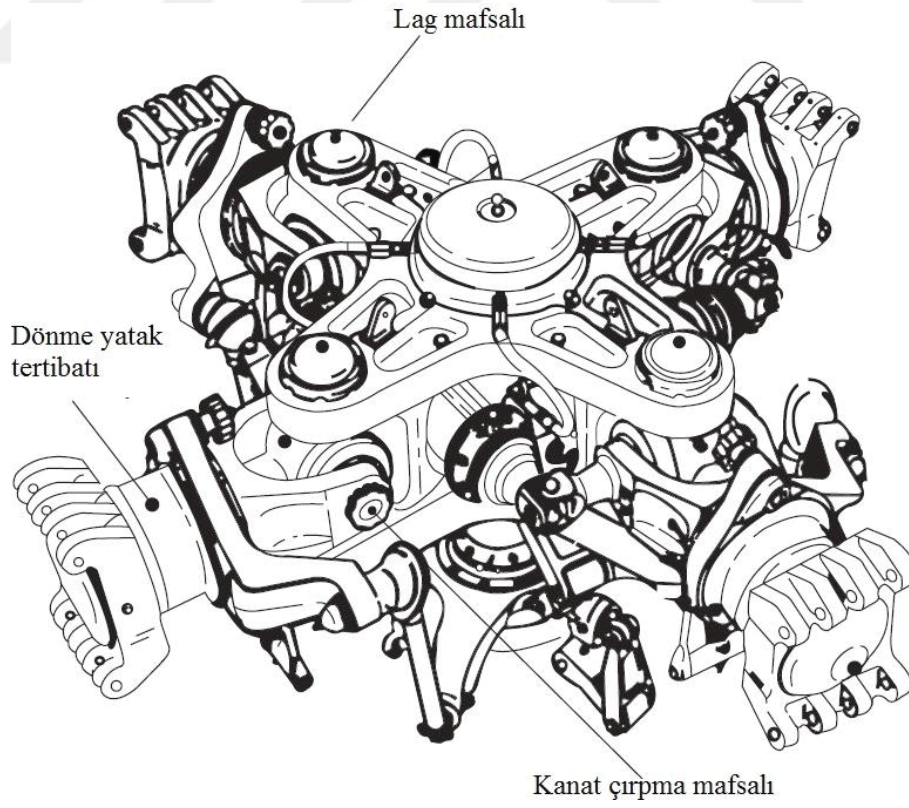


Şekil 1.6. Mafsallar ve Kanat hareketleri [16].

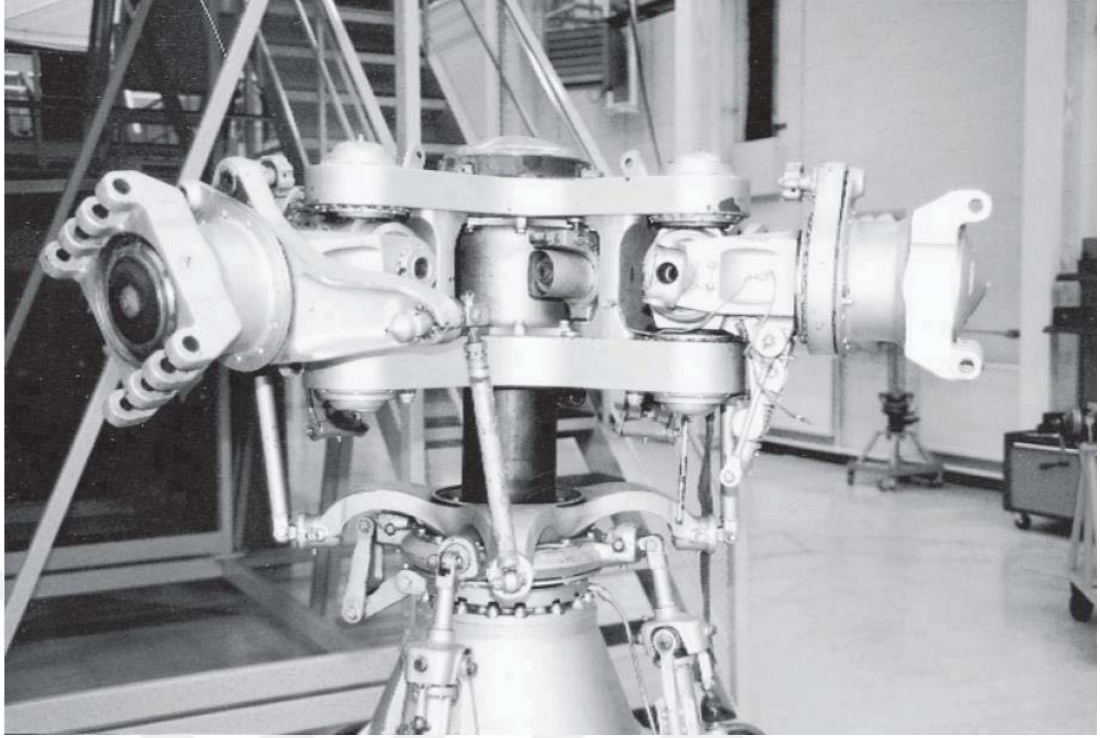
Kanat mafsalının belirlenmesi helikopter teknolojisinin gelişmesinde önemli bir adımdır. Çeşitli problemler mafsalları ve damperlerin ileri geri hareketi (lagging) engelleyen yapısından kaynaklanır. Sadece çok yüksek merkez kaç kuvvetleri altında çalışan yataklarda (sık servis ve bakım gerektiren) değil aynı zamanda kanat sayısının fazla olduğu durumlarda aktarma merkezi (hub) çok büyük olması yükü arttıracaktır. Şekil 1.7'de Westland Wessex helikopteri, Şekil 1.8'de Westland Wessex aktarma merkezinin (hub) şematik görünümü ve Şekil 1.9'da Westland Wessex aktarma merkezinin (hub) şekli görülmektedir.



Şekil 1.7. Westland Wessex helikopteri [16].



Şekil 1.8. Westland Wessex Aktarma Merkezi Şematik Görünümü [16].



Şekil 1.9. Westland Wessex Aktarma Merkezi Fotoğrafi [16].

İleri geri hareket modundaki çok düşük sönümler kanadın dönmesinden kaynaklanan kaymadan dolayıdır. Potansiyel kararsızlığı engellemek için genellikle hidrolik ve elastomerik yataklarda bu doğal sönümler artırılır.

Helikopter kanadına gelen aerodinamik yükler çok değişken ve periyodiktir. Gövde titreşimine neden olan rotor kuvveti ve momenti kanatlardan rotor gövdesine aktarılır ve sonra ana motor sürücü şaftı vasıtasıyla ana motor dişli kutusu yataklarına aktarılır ve böylece vites kutusu gövdesine ve son olarak ise helikopter gövdesiyle vites kutusu bağlantı noktasına aktarılır.

Kanatlardaki aerodinamik kuvvetlerden ve kanatlardaki kanat çırpma ve ileri geri hareketinden kaynaklanan iç kuvvetlerle birlikte gövdeye gelen yük artar.

Ana rotor yüklemelerine ek olarak kuyruk rotor kuvvetlerindeki değişim endişeye neden olmaktadır fakat genellikle istenmeyen titreşimlerin sebebi ana rotor kuvvetleridir.

Titreşim kontrolü dört ana sebepten önemlidir.

1. Verimi arttırmak, dolayısıyla sürecin güvenliğini sağlamak.

2. Yolcuların konforunu arttırmak
3. Elektronik ve mekanik ekipmanların emniyetini sağlamak
4. Helikopter gövde yapı elemanlarının ömrünü arttırmak

Sonuç olarak helikopter tasarımında titreşim kontrolü çok önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, helikoptere gelen titreşim yükleri tamamen ortadan kaldırılamaz. Helikopter tasarımı ve geliştirme projelerinde titreşim yüklerinin minimuma indirilmesine odaklanılmalıdır [16].

1.2.1. Helikopterlerde kullanılan elastomerik yatakların tarihi

Helikopterlerde elastomerik yataklar 1970'lerden beri kullanılmaktadır ve ilk elastomerik yatak modeli yaklaşımı 1976'da görülmüştür. O tarihten beri yapılan çalışmalarla yatak tasarımı, kullanılan malzemeler ve matematik modeller iyileştirilmeye devam edilmektedir.

Helikopter rotorlarının yer ve hava rezonansından kaynaklı dengesizliklere maruz kaldığı bilinen bir gerçektir. Bu dengesizliklerin sebebi rotor hareketleriyle gövde hareketleri arasındaki aktarma organlarıdır ve kabul edilemez araç güvenliği ve performans kayıplarına sebep olur.

İlk elastomerik yatak Aerospatiale SA341 Gazelle için üretilmiştir. Elastomerik yataklar hidrolik yataklara göre birçok avantaja sahiptir. Hidrolik yataklar akışkan içinde, yüksek dinamik ve eksenel yükler altında çalışan sızdırmazlık elemanı ve yağlayıcıyla çalışır. Hidrolik sönümleyicilerin ihmal edilen yağ sızıntısı ve sönümleme kabiliyetinin zamanla azalması gibi dezavantajları vardır. Hidrolik yataklarda bu olumsuzlukları gidermek için sıklıkla bakım ve kontrole ihtiyaç duymaktadır. Elastomerik yataklarda sönümleme, çelik gibi takviye malzemeleriyle takviye edilmiş kauçuk malzeme kayma hareketiyle enerjiyi sönümler. Elastomerik yataklar hidrolik yataklara kıyasla bakım masraflarını düşürür, gövde yapısının kompleksliğini azaltır [17].

Elastomerik yataklar hidrolik yataklara göre birçok avantajları olduğundan helikopter rotor sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.10'da AH-64 Apache'nin elastomerik yatağı görülmektedir. Bu rotor iki adet lead-lag damperle desteklenmiştir.



Şekil 1.10. AH-64 Apache Elastomerik yatak [17].

1.2.1.1. LORD elastomerik yatak tarihi

Elastomer; doğal veya sentetik her türlü kauçuk için kullanılan genel terimdir. Çoğu titreşim izolatörleri farklı elastomer türlerinden üretilir. Türler çalışma koşullarına göre belirlenir.

1940'lı yıllar

- LORD ilk elastomerik parçayı Bell Model 47 helikopterinin şanzıman ve motor izolatörü olarak tasarlayıp üretmiştir.

1950'li yıllar

- Hazıranda başlayan Kore savaşı havacılıkta kullanılan motor takozu ihtiyacını arttırdı. Doğal kauçuktan özel amaçlı elastomerler üretilmiştir.
- LORD geniş sıcaklık aralığında (-65°F - +300°F) kullanılacak elastomerler geliştirilmiştir. Bu elastomerler hala kullanılmaktadır.

1960'lı yıllar

- LORD Bell helikopteri için dünyanın ilk elastomerik yatağını üretmiştir.

1970'li yıllar

- Helikopterler için daha hafif ve bakımı kolay yüksek kaliteli laminat yataklar üretilmiştir.

1980'li yıllar

- Lord NAVY V-22 eğik pervaneli hava taşıtları için elastomerik yataklar tasarlamaya başlamıştır.

1990'lı yıllar

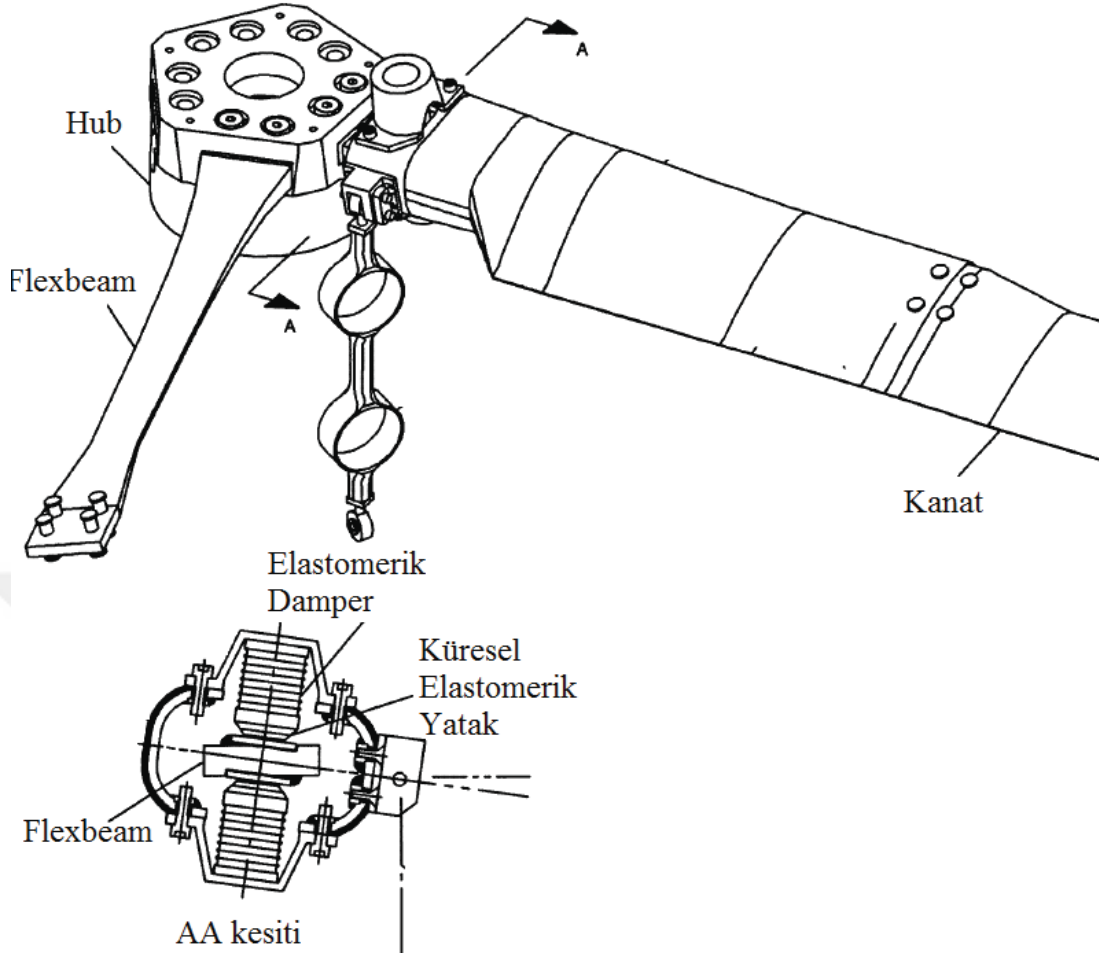
LORD ve Mill Helikopter Rus helikopterlerinde ve hava taşıtlarında kullanılan elastomerik yatak, sönümleyici ve izolatörler için satış anlaşması imzalamıştır [18].

1.2.2. Elastomer yatakların avantajları

Son yıllarda araştırmacılar basitleştirilmiş rotor tasarımına (küçük parçalar, hafif, düşük aerodinamik direnç ve düşük bakım maliyeti) yönelmiştir. Düşük bakım maliyeti için yağlama gerektirmeyen yataklar veya yataksız çözümler üzerinde çalışılmıştır. Bu sebeple geleneksel hidrolik sönümleyiciler yerine elastomerik veya fluidlastic tipi sönümleyiciler kullanılmaya başlanmıştır.

Kanat ileri geri hareket frekansının, kanat dönme frekansından düşük olduğu pervane aktarma organlarında, gövde yere meyilli ve hava rezonans dengesizlikleri olur. Bu dengesizlik durumlarında kanadın ileri geri hareket frekansıyla gövde frekansı bütünleşir. Araştırmacılar elastik ve aeroelastik çiftlerin kullanılmasının istikrarı arttırdığını göstermesine rağmen, çoğu helikopter rotoru aeromekanik dengesizlikleri önlemek için sönümleyiciye ihtiyaç duymaya devam etmektedir (Şekil 1.11).

Elastomerik damperler birbirlerine yapıştırılmış elastomerik malzemelerin takviye tabakalarıyla desteklenmesiyle elde edilir. Elastomerler dinamik koşullar altında viskoelastik davranış gösterirler. Bu malzemeler hareketin genliğine, frekansına ve sıcaklığına karşı lineer tepki vermezler. Konvansiyonel hidrolik damperlerle kıyaslandığında elastomerik damperler daha hafif ve daha az parçaya sahiptir. Elastomerik damperlerde bir yüzey üzerinde kayma hareketi olmadığından tozdan ve yüzey kalitesinden etkilenmezler, zamanla yüzey kalitesinin bozulmasını takip etmeye gerek yoktur [19].

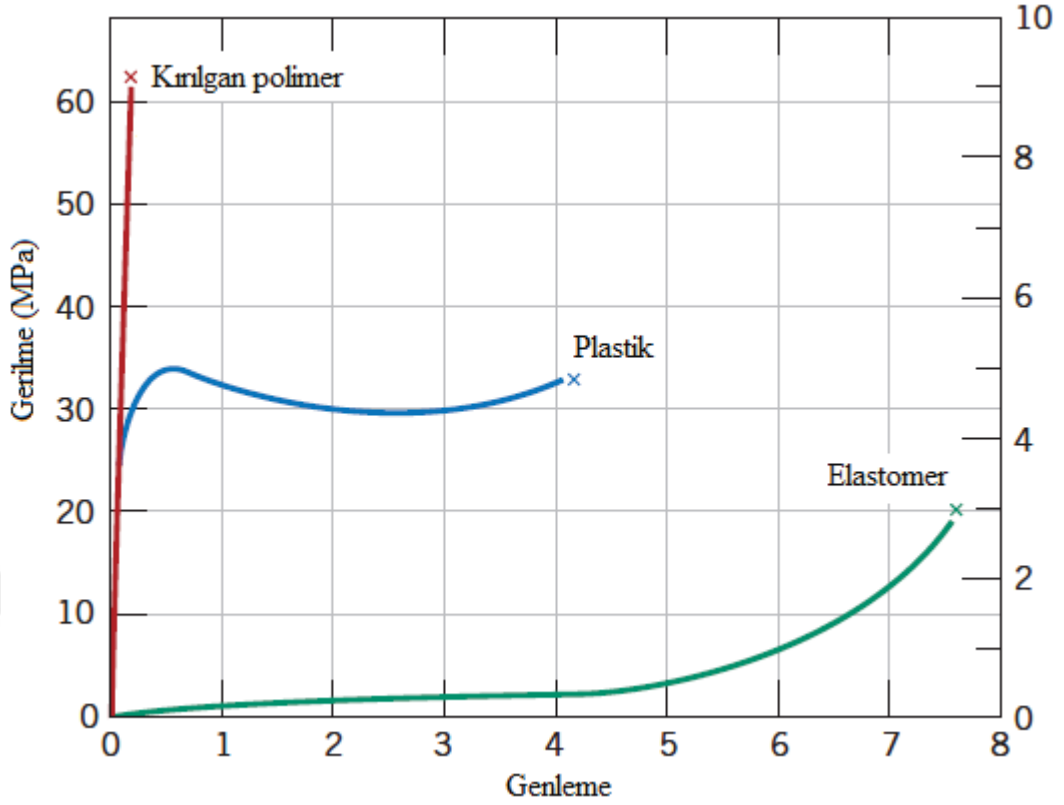


Şekil 1.11. Boeing rotor hub [19].

1.2.3. Helikopterlerde kullanılan elastomerik yatağın sönümlenme davranışının modellenmesi

Helikopter kazalarının çoğu yer rezonansı ve aerodinamik yükler gibi rezonansla ilgilidir. Kanatların rijitliği ve geometrisi helikopterin dengesinin ana parametreleridir. Bu rezonanslar rotora gelen titreşimlerden kaynaklanmaktadır.

Rotora gelen titreşimleri azaltmaktaki optimal yaklaşım yataklarda sönümleyici kullanmaktır. Hu Guo-Cai ve diğ. [21] helikopter kanatlarındaki titreşimi azaltmak için sönümleyici olarak elastomer kullanmışlardır. Sonuçlara göre elastomer kullanımı helikopterin dinamik stabilitesini arttırmıştır. Helikopterler için elastomer sönümleyicinin tasarımı, analizi ve modellenmesi zordur [22]. Elastomerler sisteme rijitlik ve sönümlenme sağlayan viskoelastik malzemelerdir. Elastomerlerin rijitliği ve sönümleyiciliği lag modundaki kanatların genlik ve frekansının nonlinear fonksiyonudur [20].



Şekil 1.12. Polimerlerin gerilme genleme davranışı [13].

Elastomerik yataklar titreşimleri hidrolik damperlerden daha iyi sönümlediklerinden her geçen gün daha popüler hale gelmektedir. Örneğin Elastomerik damperler, helikopter rotorlarında sık değiştirilmesi gereken konvansiyonel hidrolik damperlere göre daha iyi sönümlenmektedir. Dinamik koşullar altında elastomerler viskoelastik davranış sergileyerek enerjiyi gecikmeyle sönümlerler. Viskoelastik malzemenin karakteri sıcaklık ve frekansa bağımlı olmasının yanı sıra hareketin genliğine de bağlıdır. Şekil 1.12’de polimerlerin gerilme genleme davranışı görülmektedir.

Sonuç olarak elastomerik damperin davranış karakterini yeterince temsil edebilecek bir analitik model geliştirmek zordur [23, 24]. Nonlineer viskoelastik damper modelini yapısal dinamik analize entegre etmek oldukça zordur.

Viskoelastik malzemelerin yapısal ilişkileri sadece anlık gerilme/genleme oranına bağlı değil aynı zamanda gerilme/genleme oranının zamanla değişimine de bağlı olduğu bilinmektedir. Bu yapısal ilişkiler integral formunda veya diferansiyel eşitlikle ifade edilebilir [23, 25]. Gerilme/genleme oranının çeşitli türevleri bulunma

ihtimalinin olması diferansiyel eşitlikle ifade etmenin dezavantajıdır. İntegral gösterimi gerilme/genleme türevlerini ifade etmekte akma çalışmalarında daha kullanışlıdır. Fakat yapı dinamiği çalışmalarında ikinci dereceden diferansiyel denklemlere rastlamaktayız ve viskoelastik malzemenin davranışının integralle gösterimini de kapsayan integro-diferansiyel denklemlerle ifade etmek külfetli ve hesaplaması zordur.

Son yıllarda “kompleks modül” ve “genelleştirilmiş veya kısmi türev” yaklaşımları gibi dinamik analizlerde geniş kabul gören gelişmiş viskoelastisite teorisi geliştirilmiştir [23, 26, 27]. Kompleks modül yaklaşımı ve frekans bölgesi yaklaşımı lineer viskoelastik malzemenin kararlı durumu için en uygun yaklaşımlardır [22, 23]. Zaman bölgesi yaklaşımı olarak kısmi türev yaklaşımı [23, 28, 29] geçici rejim analizinde sadece lineer viskoelastik malzemelerde uygundur. Viskoelastik yapının dinamiğinin hesaplanmasında başka çalışmalar da yapılmıştır [23, 30–32]. Hughes ve McTavish [23, 32] transfer fonksiyon yaklaşımının kullanıldığı mini osilatör modelini önerir. Ancak tüm bu metotlar sadece lineer viskoelastik malzemeler için geliştirilmiştir.

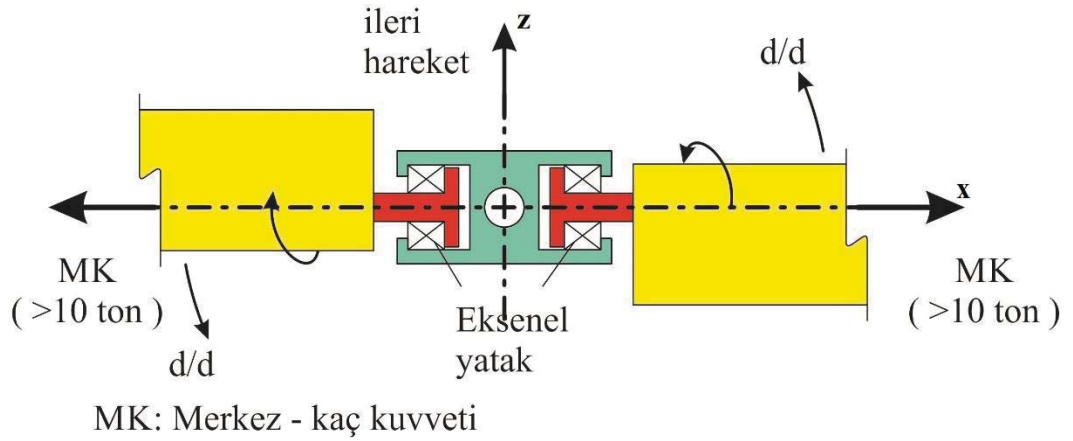
Nonlinear malzemelerin davranış modelini ifade eden çoğu teori integral gösterimi temel alır. Findley ve Lai'nin geliştirilmiş süperpozisyon prensibi [23, 33], Bernstein-Kearsly-Zapas teorisi [23, 34] ve Schapery termodinamik teorisi integral formundaki nonlinear gerilme/genleme temel eşitliğiyle ifade edilmiştir. Glockner ve Szyszkowski [23, 35, 36] nonlinear viskoelastik malzemenin akmasını, birim deformasyon yumuşamasını ve gevşeme davranışını tahmin etmek için integral formundaki yarı amprik temel modelini geliştirmişlerdir. İntegral formunda olan bu nonlinear viskoelastik teoriler yapısal dinamik analizdeki her uygulama için uygun olamaz [23].

Elastomerik yatakların helikopterlerde kullanımı oldukça yaygınlaştığı için bu yatakların davranışlarının modellenmesi önem arz etmektedir. Bu yatakları modellemek için de iki temel kıstas vardır;

- 1) Sönümleyicinin enerji dağılımını doğru tahmin etmek.
- 2) Kanat yüklerini doğru tahmin etmek.

Damperin vazifesi yer ve hava rezonansı gibi aerodinamik düzensizlikleri önlemek olduğundan sönümleyicinin enerji dağılımının tahmini rotor sisteminin tasarımı için kritik öneme sahiptir. Kanat yüklerinin doğru tahmini sönümleyiciye gelen kuvvet ve momentlerin doğru modellenmesi için gereklidir [37].

Helikopter kanatlarından yataklara gelen kuvvetler ve salınımlar Şekil 1.13'de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere helikopter yataklarına, kanatların dönme hareketlerinden kaynaklanan yatay doğrultuda merkez kaç kuvvetinin yanı sıra ilerleme hareketi sırasında düşey doğrultuda hava direnciyle karşılaşmaktadır. Yataklar bunların yanı sıra Şekil 1.6'da gösterilen kanat çırpma hareketi, ileri-geri hareket ve dönme hareketinden kaynaklanan salınımlara maruz kalmaktadır.



Şekil 1.13. İki kanatlı helikopterin yataklarına gelen yük ve salınımlar.

Gerçek sistemin karmaşıklığından dolayı matematik modeller genellikle tam doğru sonuç vermez ve bu konuda helikopter elastomerik damper modelleri istisna değildir. Elastomerik malzemenin karakteristiği çeşitli değişkenlere bağlıdır, bunlar; frekans (zaman), sıcaklık, statik ve dinamik genleme miktarıdır. Uygulanabilir modelleme teknikleri genellikle elastomerik malzeme ve sönümleyicilerin yüksek genleme dayanımı göstermesi ihmal edilerek doğrusal viskoelastisite ile başlamaktadır.

Dönen kanatların mühendisliğinde en önemli mesele malzemenin nonlinear davranışını belirlemenin en etkili yolunu belirlemektir. Model, sönümleyicinin davranış karakterini ifade etmesinin yanı sıra analizler için de yeterince basit olmalıdır. Bundan dolayı elastomerik sönümleyici modelleri genellikle kayma ve basınca maruz

kalmasına rağmen tek boyutludur (basit kesme). Modeller frekansa veya zamana bağlı olabilir [17].

Kompozit malzemelerin sönümlenme ve titreşim kontrolü araştırmacıların ilgisini çeken en önemli konulardan biridir. Kompozit malzemeler için viskoelastik sönümlenme modeli en güvenilir modeldir. Kompozitin şekli, tabaka kalınlıkları ve kullanılan malzemeler kompozitin davranışını etkilediğinden modelleme çok önemlidir. Bu yüzden kompozit yapıların sönümlenme analizinde viskoelastik modelleme kritik bir rol oynamaktadır. Gerçek ve sanal kısımlardan diğer bir deyişle kayıp ve depolama modülünden oluşan karmaşık modül basit bir viskoelastik gösterimdir [38].

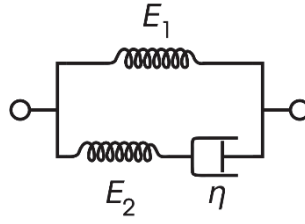
Verilen çalışma frekansına karşılık malzeme belli bir dinamik rijitlik gösterir, farklı bir frekans için gösterilen dinamik rijitlik farklı olacaktır. Çünkü malzeme elastik olmaktan ziyade viskoelastiktir, gerilme cevabı verilen harmonik genleme sinyalinin farklı olacaktır. Böylece modül, gerilme ve genlemenin büyüklüğü ve fazıyla ilişkili olacaktır. Bu modüle karmaşık modül denmektedir [17].

Shariyat [39] karmaşık modül kullanarak termomekanik yüklemelere maruz bırakılan tabakalı Viskoelastik malzeme için çift süperpozisyon hipotezine dayalı titreşim ve dinamik burulma analizi yapmıştır. Mevcut çalışmaların aksine tabakalar arası enine gerilmeler sürekli halde, enine esneklik, üst ve alt tabakalarda sıfır olmayan tutunma davranışı gözlenmiştir.

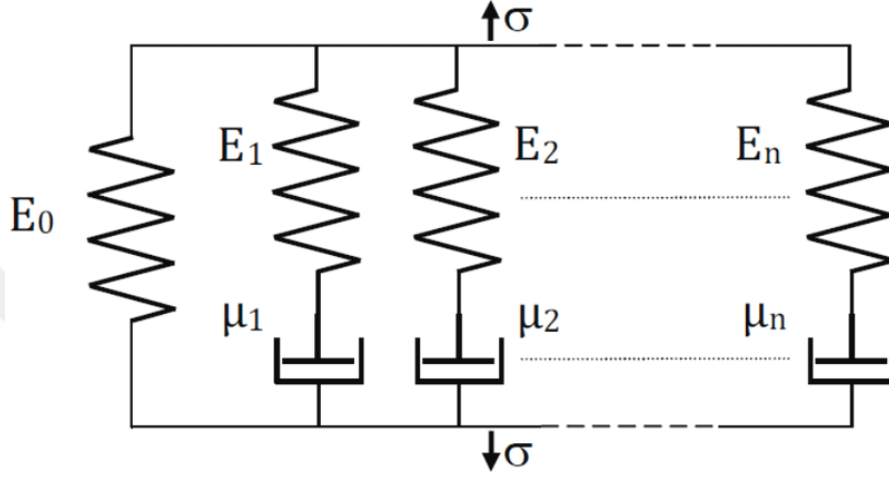
Viskoelastik modeller basit yay-sönümleyici ve geliştirilmiş kombinasyonlarından oluşur. Bu modeller Maxwell, Kelvin ve Standard Solid olarak isimlendirilmiştir.

Shariyat ve Nasab [40] viskoelastik malzeme davranışını modellemek için Standard Solid modelini kullanmıştır (Şekil 1.14)

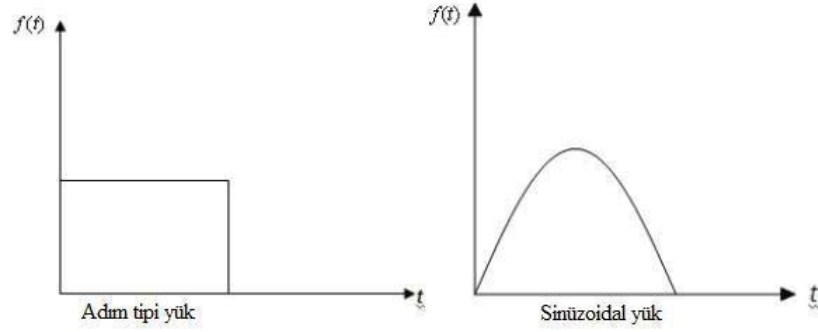
Assie ve diğ. [41] viskoelastik malzeme davranışını modellemek için geliştirilmiş Wiechert modeli (Şekil 1.15) kullanmışlardır. Dikdörtgen viskoelastik kompozit malzemenin tabakalara dik gelen Şekil 1.16'te gösterilen şekillerdeki yüke karşı davranışını incelemişlerdir.



Şekil 1.14. Standard Solid Modeli [40].

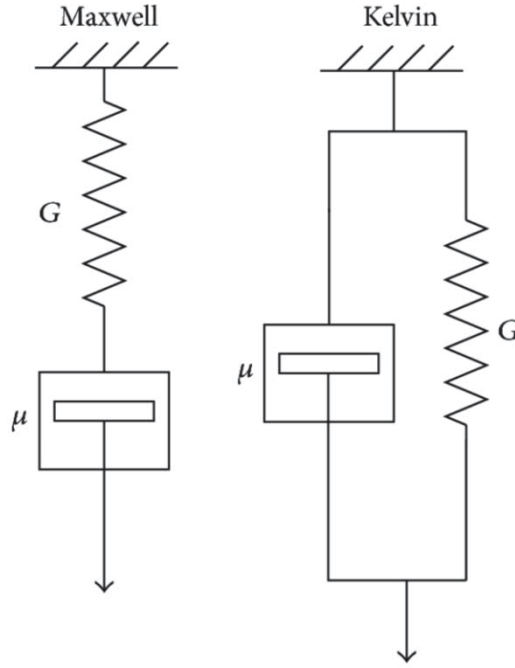


Şekil 1.15. Genelleştirilmiş Wiechert modeli [33].

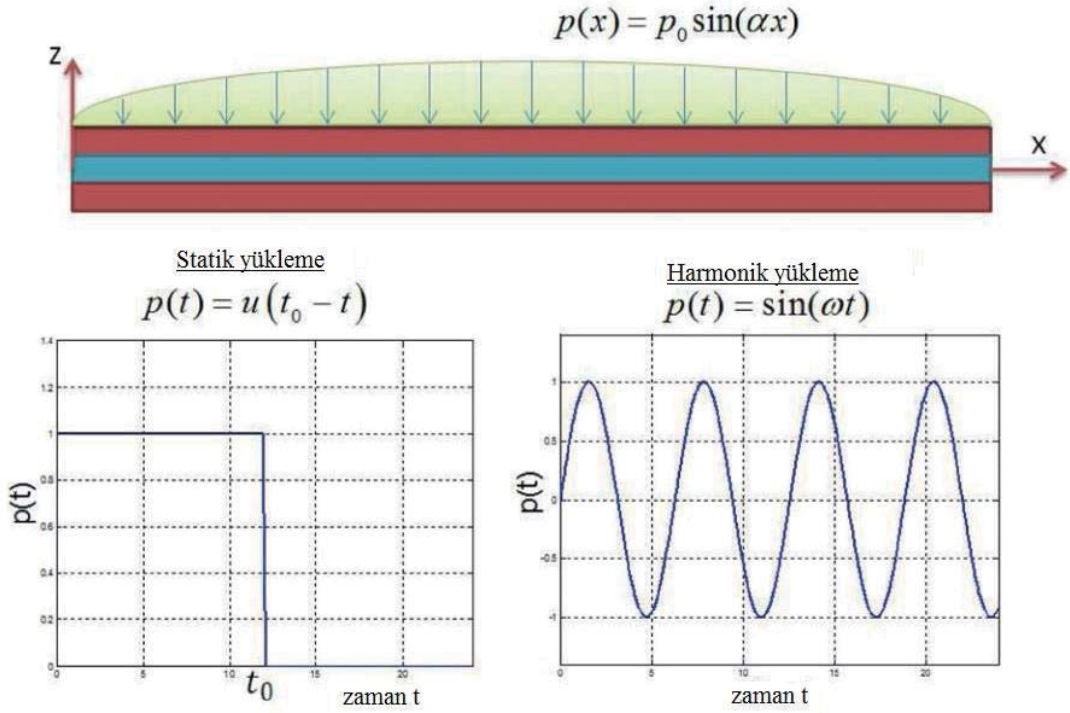


Şekil 1.16. Anlık Yükleme şekilleri [41].

Sy ve diğ. [42] viskoelastik malzeme davranışını modellemek için Kelvin ve Maxwell modelini (Şekil 1.17) kullanmıştır. Dikdörtgen viskoelastik malzemeye Şekil 1.18’da gösterildiği gibi iki farklı yüke karşı davranışı incelenmiştir.

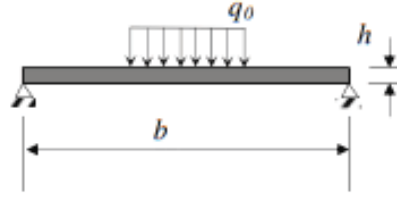


Şekil 1.17. Kelvin ve Maxwell modeli [42].



Şekil 1.18. Statik ve harmonik yüklemelerin zamana göre değişimi [42].

Temel ve Şahan [43] viskoelastik malzeme davranışını modellemek için Kelvin modelini (Şekil 1.17) kullanmıştır. Bu çalışmada dikdörtgen ve dairesel malzemenin Şekil 1.19 ve Şekil 1.16’de gösterilen yüklere karşı davranışları incelenmiştir.



Şekil 1.19. Dikdörtgen malzeme yükleme şekli [43].

Adı geçen modeller zaman ve frekans alanıyla sınırlıdır. Sonuç olarak zaman ve frekans sınırı olmayan doğru malzeme modeli önemli bir konudur. Boltzman superpozisyon prensibi bu sınırlamalar göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bu prensip tabakalı viskoelastik malzemelerin titreşim modellerinde kullanılmaktadır [44].

Ancak bu çalışmalarda Poisson oranı sabit alınmıştır. Poisson oranını sabit almak hesaplamaları basitleştirmesine rağmen özel zaman-frekans aralığı veya titreşim modunu modelleyememektedir [45–47].

Helikopterlerde sönümleyiciler ilk olarak rotorlarındaki stabiliteyi sağlamak için kullanıldı ve elastomerik sönümleyiciler rotor sistemlerinde hidrolik sönümleyicileri iyileştirmek için kullanıldı. Sonuç olarak elastomerik damper modelleri başlangıçta rotor stabilite analizlerine odaklandı. Lineerleştirilmiş stabilite analizleri için karmaşık modül damper modelleri genleme genliğine bağlı modellerde etkili olmuştur. Son yıllarda araştırmacılar sönümlemeyi ve kanada gelen yüklerin tahminini iyileştirmek için zaman alanı modellerine yoğunlaşmıştır [17].

1.2.3.1. Viskoelastik malzeme modeli

Viskoelastik malzemenin davranışını modellemek için iki temel yaklaşım vardır. Bunlar Maxwell ve Kelvin modelidir. Maxwell gösterimi lineer yay ve lineer viskoz amortisörün seri bağlı olduğu modelken Kelvin yay ve amortisörün paralel bağlı olduğu modeldir [17, 50] (Şekil 1.17).

En genel formda integral ve diferansiyel yapısal eşitliklerin eş değeri Laplace formunda gösterilebilir [48]. İntegral formda gösterimde t anındaki gerilmeyi hesaplayabilmek için malzemenin genleme geçmişi bilgisi gerekmektedir. Bu sebeple integral forma göre matematik basitliğinden dolayı mühendislik analizlerinde diferansiyel form kullanılmaktadır [17].

1.2.3.2. Frekansa bağılı modeller: kompleks genlik yaklaşımı

Viskoelastik malzeme modelleri geliştirmekte yaygın yaklaşım davranışı basit harmonik yüklemelerle ifade etmektir. Verilen çalışma frekansına karşılık malzeme belli bir dinamik rijitlik gösterir, farklı bir frekans için gösterilen dinamik rijitlik farklı olacaktır. Çünkü malzeme elastik olmaktan ziyade viskoelastiktir, gerilme cevabı verilen harmonik genleme sinyalinin farklı olacaktır. Böylece, modül gerilme ve genlemenin büyüklüğü ve fazıyla ilişkili olacaktır. Bu modüle kompleks modül denilmektedir [17].

1.2.3.3. Zaman alanı modelleri

Zaman alanı modellerinde ters Laplace dönüşümü kullanılır. Lineer malzemelere harmonik yükleme durumlarında nonlinear kompleks modeller zaman alanı modellerinde kullanılabilir. Teorik olarak zaman alanı modeli tüm yükleme çeşitlerinde kullanılabilir.

İsveç Lund üniversitesinde Austrel bir model geliştirmiştir [51]. Modelde frekans ve genlik ilişkisi için lineer elastik, lineer viskoz ve kayma sürtünme elemanı kullanılmıştır. Modelde hıza bağımlı ve bağımsız sönümle incelenmiştir. Model elastomerin frekansa ve genliğe bağılı temel özelliklerini ortaya çıkarmış fakat yüksek genlikteki genlemelerde başarılı sonuçlar vermemiştir.

ADF modeli başlangıçta frekansa bağılı tek boyutlu viskoelastik yapılar için üretilmiştir fakat çok boyutlu ısıya bağılı uygulamalar için de geliştirilmiştir [52]. ADF modeli doğrudan zaman alanı olarak modellenebilir ve hareketin eşitliği ayrıştırılarak sonlu elemanlar formuna getirilebilir.

Elastomerik damper modellerinde zaman alanı modellerine son yıllarda ilgi artmıştır. Kompleks modül oluşturulurken lineerleştirilmiş kayıp ve depolama modülü kullanılır. Zaman alanı modelleri statik genleme aralığını ve çift yönlü uyarım frekanslarını modelleyebilmelidir [17].

Gandhi ve Chopra lineer ve nonlinear yay ve sönümleyiciden oluşan zaman alanı damper modeli geliştirmişlerdir [23]. Bu model viskoelastik malzemenin davranışının basit ifadesi olan Maxwell ve Kelvin gösteriminden geliştirilmiştir. Damperin kompleks modülünün genliğe bağılı olması sistemi nonlinear hale getirmiştir.

Hausmann ve Gergely'nin çalışmasındaki kompleks modül datalarıyla model doğrulanmıştır [53]. Bu çalışma sırasında deneysel gecikme dataları hazır olmadığından modelin parametrelerini doğrulamak için gecikme datalarını tahminine dayalı genliğe bağlı kompleks modül kullanılmıştır.

Panda ve diğ. [19] düşük genlikdeki dengesizlikleri ve çift yönlü uyarım frekanslarını belirlemek için damper zaman alanı modeli geliştirmiştir. Bu model nonlinear yay ve değişken sürtünme damperinden oluşmaktadır. Yayın rijitliği bölgesel yer değişimlerinin fonksiyonu ve sürtünme kuvvetleri bölgesel pik yer değişimlerinin fonksiyonudur. Bu fonksiyonlar herhangi bir andaki gerilmelerin değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Daha sonra bu gerilmeler ortam sıcaklığı ve çalışma frekansına göre doğrulanmıştır. Genliğe bağlı fonksiyonlar amprik olarak belirlenmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara yakın çıkmıştır [17].

Damper uygulama prosedürü; ilk olarak rotor yanıtının hızı ve damperin genliği hesaplanmıştır. Sonra bölgesel genlik pikleri hesaplanmıştır, devamında damperin rijitliği, nonlinear fonksiyondan elde edilen damper davranışı, sıcaklık, frekans ve dampere gelen yükler doğrulanmıştır. Daha sonra sıcaklığın etkisini göz önüne almak için modelde iyileştirmeler yapılmıştır [19, 54].

1.2.3.4. Kompleks modül elastomerik damper modelleri

İlk helikopter elastomerik damper modelleri kompleks modül yaklaşımıyla çıkartılmıştır. Genellikle damperler belirli bir aralığın üzerindeki frekans, genlik ve sıcaklıkta test edilir ve her test sonucuna göre malzeme kompleks modülü hesaplanır. Elde edilen sonuçlardan model oluşturulur. Bu modeller kolay anlaşılabilir ve sistemi doğru temsil etmelidir [53].

Genellikle bu modüller kararlı veya kararsız uçuş durumlarından elde edilir. Rotor yanıtını kararlı hale getirmek için iteratif prosedür ve uygun damper özellikleri gereklidir. Damper özellikleri rotor yanıtının frekansı ve genliğine bağlıdır ve rotor yanıtları damperin özelliklerine bağlıdır.

Hausmann ve Gergley elastomerik damper için bir kompleks modül geliştirmişlerdir [53]. Bu modelde damperin depolama ve kayıp modülünün genlik, frekans ve sıcaklığın fonksiyonel formuna bağlı olduğu kabul edilmiştir. Bu model başlangıçta

elastomerik damperin termoviskoelastik karakterini belirlemek için geliştirilmiştir [17].

1.2.3.5. Elastomerik damper model gelişiminin özeti

Helikopter elastomerik damper modelleri genellikle temel lineer viskoelastik malzeme modelinden türetilir. Bu modeller frekansa bağlı fakat genleme genliğinden bağımsızdır. Genliğe bağımlı çoğu damper modelleri malzemenin veya damperin kompleks modülünün veya gerilmenin zamanla değişiminin nonlineer fonksiyonunu belirlemekle elde edilir. Damper modellerinin çoğu rotor sistemi stabilitesi için rotor aerodinamik analizlerinde kullanılır. Ayrıca nonlineer damper modelinin helikopteri içi seslere ve rotora gelen yüklerden kaynaklı geçici rotor devirlerine etkisini araştırmak için kullanılır. Geliştirilen nonlineer damper model yardımıyla helikopter içi seslerin iyileştirilmesi mümkün olmuştur [19].

Kompleks modüle bağlı modellerin bir kısmı rotora gelen yüklerin zamana göre değişimini öngörmek için kullanılır. Bu öngörü aşırı genliklerde çalışmadığı sürece rotor stabilite çalışmalarında yeterlidir. Zaman alanı modelleri özellikle ADF yaklaşımı gibi sonlu eleman modellerinde daha uygun ve daha çok kullanılmaktadır [17].

1.2.4. Helikopterlerde kullanılan elastomer yatağın sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizi günümüz mühendisleri için çok kıymetli bir araçtır. Bilgisayar teknolojisindeki son gelişmelerle sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazılımlar daha güçlü ve daha kesin sonuçlar vermektedir. Sonlu elemanları kullanarak hava taşıtı parçalarının gerilmeleri, ömrü belirlenebilmektedir. Parçaların üç boyutlu modelleri bilgisayar destekli çizim programlarıyla çizildikten sonra çok kolay bir şekilde gerekli analizleri yapmak için sonlu eleman yazılımına aktarılabilir.

Hava araçlarının ana rotor sistemleri çok yüksek yük ve momentlere maruz kalan birçok elemandan meydana gelir. Bu yükler ve momentler rotor sistemi parçalarının ortalama ömrünü etkiler.

Sonlu elemanlar analizi kullanılarak bilgisayar yazılımı yardımıyla hazırlanan model sayesinde gerçek testlerle kıyaslandığında zaman ve maliyetten tasarruf mümkündür.

Bu sebeple farklı mühendislik dallarındaki mühendisler sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi sadece mühendisler tarafından değil, medikal, diş, biyomekanik ve ortopedik gibi dallarda da uzmanlar tarafından kullanılmaktadır. Her geçen gün popülerliği artan sonlu elemanlar yöntemi imalat sektöründe kaliteyi arttırmaktadır.

Malzemelerin ortalama ömrünün hesaplanmasında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı havacılık sektöründe oldukça yaygındır. Sabit kanatlı ve döner kanatlı uçak üreticileri için uçağın yapısı ve ekonomikliği çok önemlidir. Laboratuvar maliyetini azaltan, parçaların ortalama uçuş saatini hesaplama ve optimum tasarımı bulmaya yardım eden sonlu elemanlar yöntemi havacılık sektörünün vazgeçilmezi olmuştur [55].

Chen ve diğ. [56] küresel elastomerik yatakların açısız yer değiştirme yüklemesi altında delik koniklik açısı, elastomer tabaka kalınlığı ve dış yüzey eğrilik yarıçapının maksimum gerilmeler üzerine etkisini incelemişlerdir. Elastomerin viskoelastik davranışı Moonley-Rivlin modeli ile temsil edilen çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Silindirik enjeksiyon holü kullanmak ve dış yüzey eğrilik yarıçapını arttırmanın maksimum gerilmeleri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

1.2.5. Deneysel elastomer çalışmaları

Elastomerik malzemelerin davranışını inceleyen deneysel çalışmalar modelin belirlenmesini ve doğrulanmasını sağlar. Ayrıca gerçek sistem cevabının ne olacağı ile ilgili fikir verir [17].

Elastomerik malzemelerin mekanik davranışını anlamak için 50 yıldan fazladır birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bu kadar uzun sürmesinin sebebi malzeme davranışının statik ve dinamik genleme seviyelerine, genleme tarihine, frekans ve sıcaklık faktörlerine bağlı olmasıdır. Bunların yanında elastomer kelimesi özel bir malzemenin ismi değil farklı içeriklerden meydana gelen bir malzeme ailesini temsil eder. Helikopterlerdeki elastomerik damper malzemesi olarak elastomer ve destek malzemesi kullanılır. Destek malzemesi mukavemeti on kat arttırabilir [50].

Karbon siyahı doldurulmuş doğal kauçuklar bazen damperlerde kullanılır. Oksijen ve ozon hasarından korumak için elastomeri iyileştirici ekstra malzemeler eklenir. Farklı metodlarla farklı elastomerler elde edilebilir [50]. Bu şekilde elde edilecek elastomer çeşidinin belirli bir sınırı yoktur. Sonuç olarak yayınlanmış ve yayınlanmamış deneysel elastomer araştırmaları devam etmektedir.

Warley [57] ve Austrell [51] deneysel çalışmalarda bazı iyileştirmeler yapmışlardır. Bu çalışmalarda elastomer deneysel çalışmalar geleneksel elastomer veya özel çeşit elastomer perspektifiyle konuya yaklaşılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmalarda malzemenin kendisine odaklanılmıştır. Son çalışmalarda helikopter damperlerinde önemli olan elastomer davranışlarına yoğunlaşılmıştır [17].

Naghshineh [58] fiber ve elik takviyeli düzlemsel elastomerik yatakların üzerine gelen gerilmeleri deneysel olarak incelemiştir ve simlasyon sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Simlasyon alışmalarında ABAQUS programı kullanılmıştır. Çalışmada takviye malzemesinin yatay ve dikey rijitlik üzerine etkisi incelenmiştir. Fiber takviyeli düzlemsel elastomerik yatakların daha düşük yatay rijitliğe sahip olduğu grlmştir.

Domaniç [59] köprülerde kullanılan st ve alt bağlantı elemanı olmayan düzlemsel elastomerik yatakların deprem dayanımlarını deneysel ve sonlu elemanlar analiziyle incelemiştir. st ve alt bağlantı elemanı olmayan düzlemsel elastomerik yatakların deprem yüklemelerine maruz kaldıklarında kaymadıkları tespit edilmiştir. st ve alt bağlantı elemanı kullanılmamasına rağmen, bağlantı elemanları kullanılan yataklar gibi deprem yüklemelerine karşı kaymadıkları tespit edilmiştir.

Ruano ve diğ. [60] fiber takviyeli st ve alt bağlantı elemanı olmayan düzlemsel elastomerik yatakların dikey-yatay rijitlik ve sönümleme kapasitesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında dikey ve yatay yükleme altında takviye elemanı malzemesinin ve şekil geometrisinin yatağın mekanik davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Dairesel kesitli elastomerik yatakların kare kesitli elastomerik yataklara göre biraz daha fazla yatay rijitliğe sahip olduğu grlmştir. Fiber takviyeli elastomerik yatakların cam elyaf takviyeli elastomerik yataklara göre daha rijit davranış göstermiştir.

Zhang ve diğ. [61] küresel elastomerik yatakların yay uzunluğunun basınç ve açısai yer değiştirme yüklemesi altında gerilme ve genlemeler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elastomer malzemenin hiperelastik davranışını temsil etmek için Moonley-Rivlin modelini kullanmışlardır. Çalışmada deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Uygulanan kuvvetin artmasıyla genlemelerin arttığı, yay uzunluğunu artmasıyla gerilmelerin arttığı görülmüştür.

Su ve diğ. [62] küresel elastomerik yataklara uygulanan basınç ve açısai yer değiştirme yüklemesi altında kauçuk cinsinin genlemeler üzerine etkisini incelemişlerdir. Elastomerin viskoelastik davranışını temsil eden Ogden modeli kullanılmıştır. Çalışma deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Genlemelerin kauçuğun cinsine göre değiştiği görülmüştür.

Ren ve diğ. [63] küresel elastomerik yataklara uygulanan basınç ve açısai yer değiştirme yüklemesi altında yay uzunluğunun gerilme ve genlemeler üzerine etkisini incelemişlerdir. Elastomerin viskoelastik davranışını temsil eden Moonley-Rivlin modeli kullanılan çalışmada deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Uygulanan kuvvetin artmasıyla genlemelerin arttığı, yay uzunluğunu artmasıyla da gerilmelerin arttığı görülmüştür.

1.3. Elastomerik Yatağın Basınç Teorisi

Elastomer yatağın düşey rijitliğini veren ifade [64];

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (1.1)$$

şekil faktörünü veren ifade [64];

$$S = \frac{\text{Basınca maruz kalan alan}}{\text{Basınca maruz kalmayan alan}} \quad (1.2)$$

Genişliği 2b ve kalınlığı t sonsuz şerit için;

$$S = \frac{b}{t} \quad (1.3)$$

d çaplı ve t kalınlıkta dairesel;

$$S = \frac{d}{4t} \quad (1.4)$$

Genişliği 2b, uzunluğu l ve kalınlığı t olan dikdörtgen;

$$S = \frac{b \cdot l}{(1 + 2b) \cdot t} \quad (1.5)$$

İç çapı d, dış çapı D ve kalınlığı t olan halka;

$$S = \frac{D - d}{4t} \quad (1.6)$$

Basınca karşı rijitlik ve bükölme direnci hesaplamalarında lineer elastik teorisi kullanılmıştır. Basınca karşı rijitlik analizinde enerji yaklaşımı ilk olarak Rocard tarafından kullanıldı. Gent ve Lindley [65], Gent ve Meinecke [66] tarafından geliştirilmiştir.

Basıncı rijitliği ve bükölme direnci analizleri iki temel yaklaşıma dayanır. Birincisi Şekil değiştirme kinematığı, ikincisi gerilme durumu. Yatağa dik yönde gelen kuvvetler için kinematik yaklaşım;

- 1) Düşey hat üzerindeki bir noktanın Şekil değişimi öncesi konumu ve Şekil değiştirme sonucu konumunun belirlenmesi
- 2) Yatay yüzeyin yatay kalması

Şekil 1.20'de t kalınlığında rastgele bir Őeklin yüzeyin ortasında konumlandırılan kartezyen koordinat sistemi görölmektedir. Şekil 1.20'de kinematik yaklaşıma göre Şekil değişimi görölmektedir [64].

$$u = v = 0, z = \frac{t}{2}, -\frac{t}{2} \text{ (üst ve alt tabaka rijit) } u = u_0, v = v_0, z = 0 ;$$

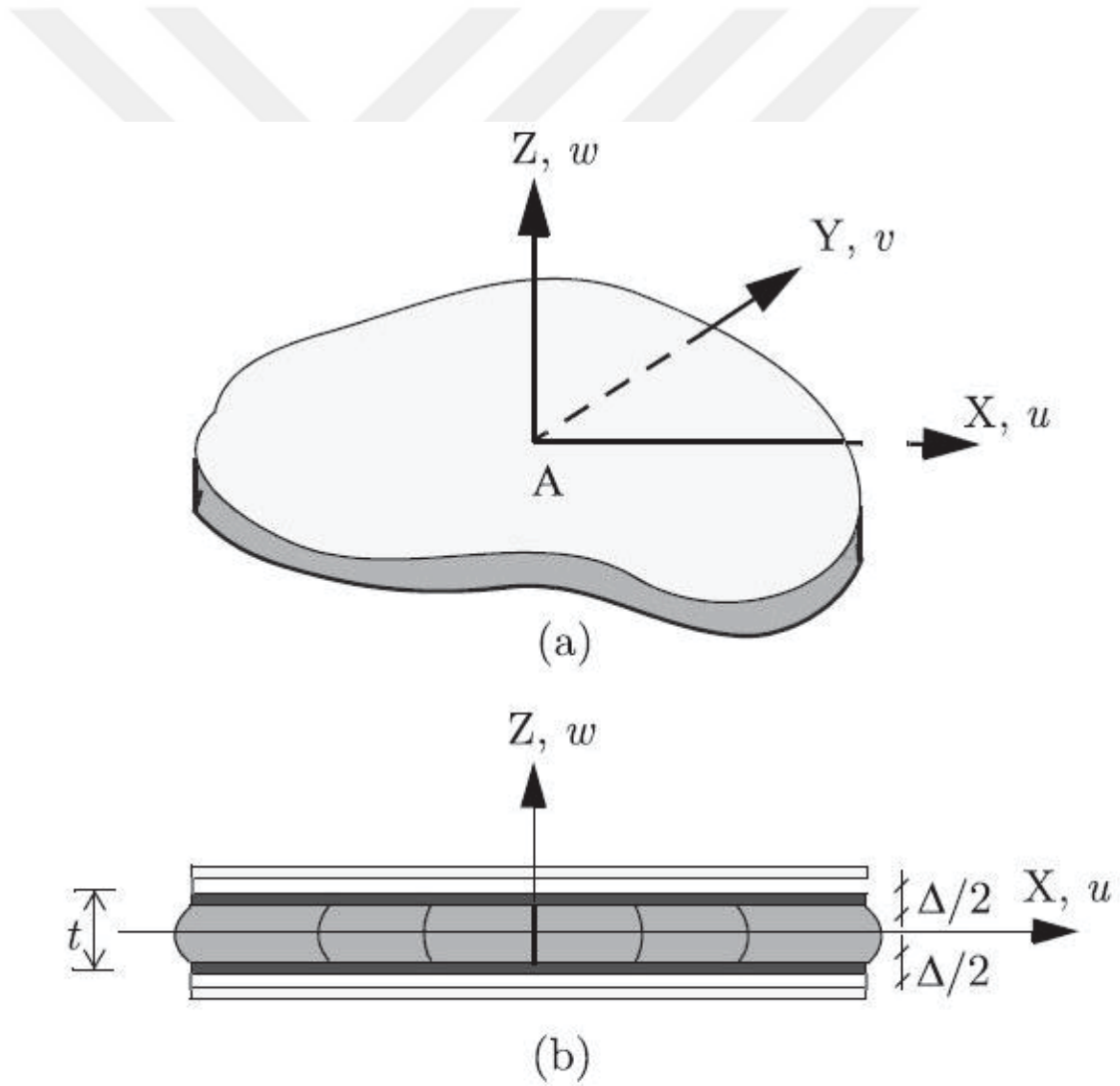
$$\begin{aligned}
u(x, y, z) &= u_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right) \\
v(x, y, z) &= v_0(x, y) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right)
\end{aligned} \tag{1.7}$$

$$w(x, y, z) = w(z)$$

Elastomer tabaka sıkıştırılmaz kabul edilirse, $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$, $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$, $\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$

olduğundan;

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0 \tag{1.8}$$



Şekil 1.20. a) Rastgele şekilli bir plakanın ortasında kartezyen koordinat sistemi
b) şekil değişimi [64].

Eşitlik (1.7), Eşitlik (1.8)'de yerine konulursa;

$$\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.9)$$

Eşitlik (1.9) düzenlenirse;

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} = - \frac{1}{1 - \frac{4z^2}{t^2}} \frac{\partial w}{\partial z} = k \quad (1.10)$$

Eşitlik (1.10)'da $\frac{\partial w}{\partial z}$ yalnız bırakılırsa;

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -k \left(1 - \frac{4z^2}{t^2} \right) \quad (1.11)$$

Eşitlik (1.11)'dan $w(z)$;

$$w(z) = -k \left(z - \frac{4z^3}{3t^2} \right) + c \quad (1.12)$$

Burada c integral sabiti, $w(t/2) = -\Delta/2$, $w(-t/2) = \Delta/2$ sınır koşulları kullanılarak

hesaplanırsa $c=0$ ve $k = 3\Delta/2t = 3\varepsilon_c/2$. Burada ε_c ;

$$\varepsilon_c = - \frac{w(t/2) - w(-t/2)}{t} \quad (\text{basınç altında } \varepsilon_c > 0) \quad (1.13)$$

$k = \frac{3\varepsilon_c}{2}$ olduğundan, Eşitlik (1.10)'dan;

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} = \frac{3\varepsilon_c}{2} \quad (1.14)$$

Elastomerler içerisinde akışkan olan malzemeler gibi davranış gösterdiğinden, gerilmeler iç basınç p 'den kaynaklandığı farz edilirse [64];

$$\sigma_{xx} \approx \sigma_{yy} \approx \sigma_{zz} \approx -p \left(1 + 0 \left(\frac{t^2}{l^2} \right) \right) \quad (1.15)$$

Bu gerilme yaklaşımına basınç çözümü denilmektedir. Üst ve alt tabakayla elastomer arasında oluşan kayma gerilmeleri τ_{xz} ve τ_{yz} ile ifade edilir. Normal ve kayma gerilmelerinin genel ifadesi [64];

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1.16)$$

Eşitlik (1.15)'de σ_{xx} ve σ_{yy} -p olduğundan;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Eşitlik (1.17), Eşitlik (1.16)'da yerine konulduğunda;

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} \quad (1.18)$$

Malzemenin lineer elastik olduğu kabul edilirse kayma gerilmeleri τ_{xz} ve τ_{yz} ile kayma genlemeleri γ_{xz} ve γ_{yz} arasındaki ilişki [64];

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= G \gamma_{xz} \\ \tau_{yz} &= G \gamma_{yz} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Burada G elastomerin kayma modülüdür. Kayma genlemeleri γ_{xz} ve γ_{yz} [64];

$$\begin{aligned}\gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial u_0(x, y)}{\partial z} \left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) + \frac{\partial w(z)}{\partial x} = -\frac{8z}{t^2} u_0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial v_0(x, y)}{\partial z} \left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) + \frac{\partial w(z)}{\partial y} = -\frac{8z}{t^2} v_0\end{aligned}\quad (1.20)$$

Eşitlik (1.20), Eşitlik (1.19)'da yerine konulduğunda;

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= -\frac{8Gz}{t^2} u_0 \\ \tau_{yz} &= -\frac{8Gz}{t^2} v_0\end{aligned}\quad (1.21)$$

Eşitlik (1.17), Eşitlik (1.21)'de yerine konulduğunda;

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{8G}{t^2} u_0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -\frac{8G}{t^2} v_0\end{aligned}\quad (1.22)$$

Eşitlik (1.22), Eşitlik (1.14)'de yerine konulduğunda [64];

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right) = -\frac{12G\epsilon_c}{t^2}\quad (1.23)$$

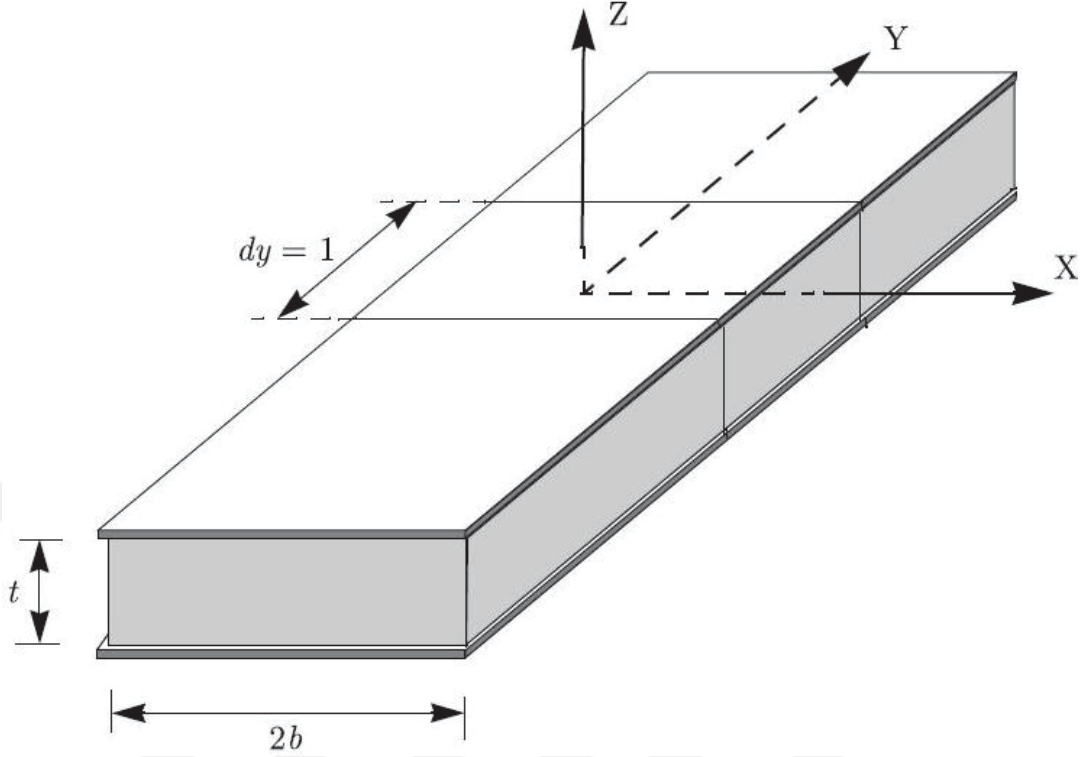
P elastomere gelen normal kuvvet ve A kuvvetin uygulandığı alan olmak üzere [64];

$$E_c = \frac{P}{A\epsilon_c}\quad (1.24)$$

Eşitlik (1.18), Eşitlik (1.23)'de yerine konulduğunda;

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z^2} = -\frac{12G\epsilon_c}{t^2}\quad (1.25)$$

1.3.1. Sonsuz şerit



Şekil 1.21. 2b genişliğinde sonsuz şerit [64].

Eşitlik (1.23), 2b genişliğindeki sonsuz şerit (Şekil 1.21) için düzenlenirse;

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\frac{12G\epsilon_c}{t^2} \quad (1.26)$$

Burada $p(\pm b) = 0$ olduğundan [64];

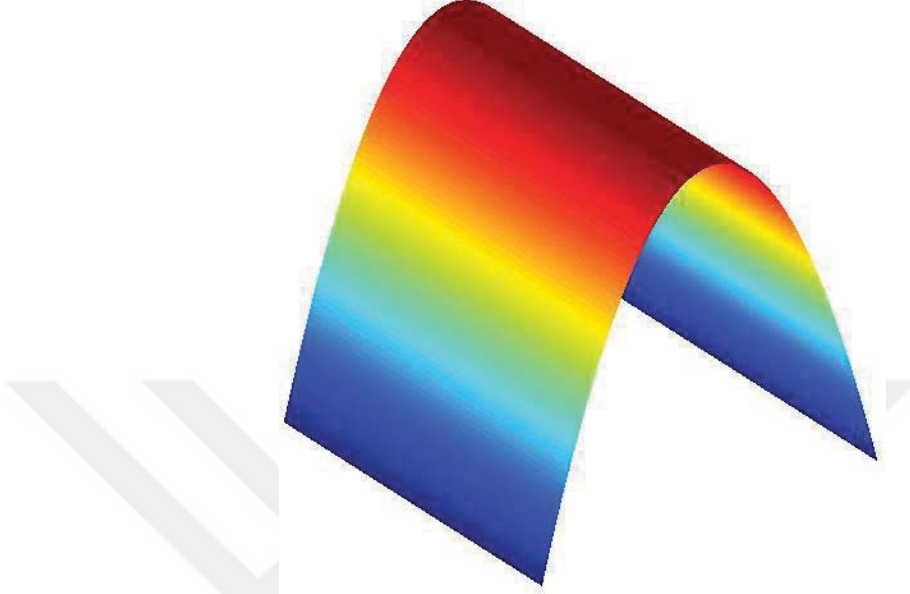
$$p = \frac{6G\epsilon_c}{t^2}(b^2 - x^2) \quad (1.27)$$

Bu durumda birim uzunluğa düşen yük [64] (Şekil 1.22);

$$P = \int_{-b}^{+b} p dx = \frac{8G\epsilon_c b^3}{t^2} \quad (1.28)$$

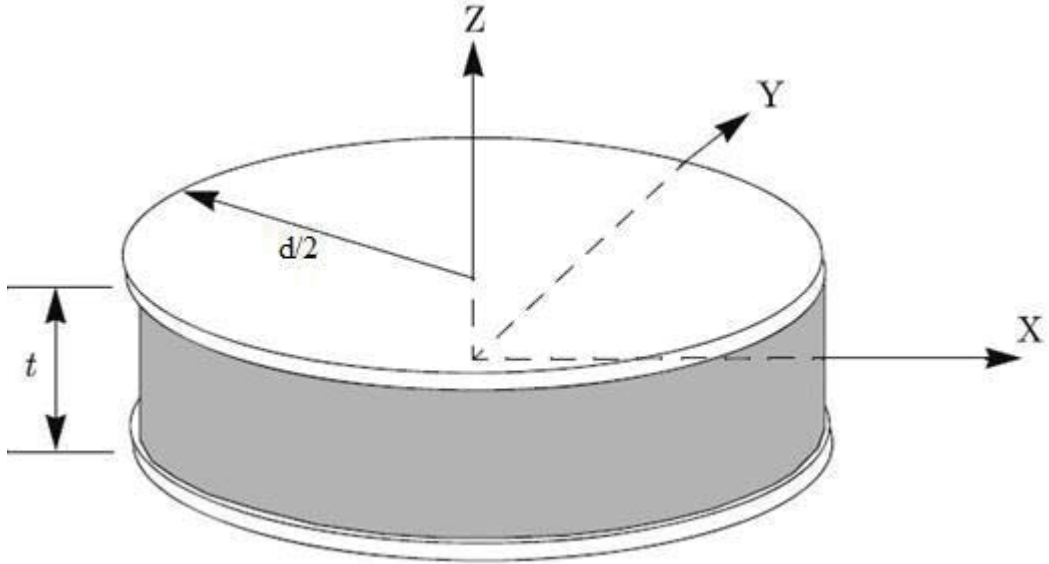
$S = \frac{b}{t}$ ve $A = 2b$ olduğundan, Eşitlik (1.24);

$$E_c = \frac{P}{A \epsilon_c} = 4GS^2 \quad (1.29)$$



Şekil 1.22. Sonsuz şerit basınç dağılımı.

1.3.2. Dairesel yatak



Şekil 1.23. d çapında dairesel elastomer [64].

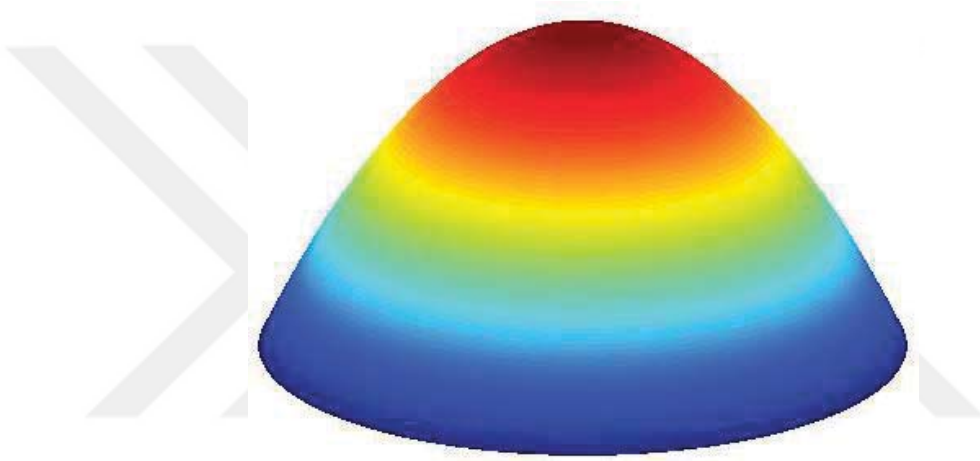
Çapı d olan dairesel elastomer için (Şekil 1.23);

$$\nabla^2 p = \frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} = -\frac{12G \varepsilon_c}{t^2}, \quad d/2 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1.30)$$

$$p = A \ln r + B - \frac{3G \varepsilon_c}{t^2} r^2 \quad (1.31)$$

$r = d/2 \Rightarrow p = 0$ sınır koşulundan;

$$p = \frac{3G \varepsilon_c}{t^2} \left((d/2)^2 - r^2 \right) \quad (1.32)$$



Şekil 1.24. Dairesel yatak basınç dağılımı.

basınç ifadesi (Şekil 1.24);

$$P = 2\pi \int_0^R p(r) r dr = \frac{3G \varepsilon_c \pi d^4}{32 t^2} \quad (1.33)$$

$S = \frac{d}{4t}$ ve $A = \pi d^2/4$ olduğundan;

$$E_c = 6GS^2 \quad (1.34)$$

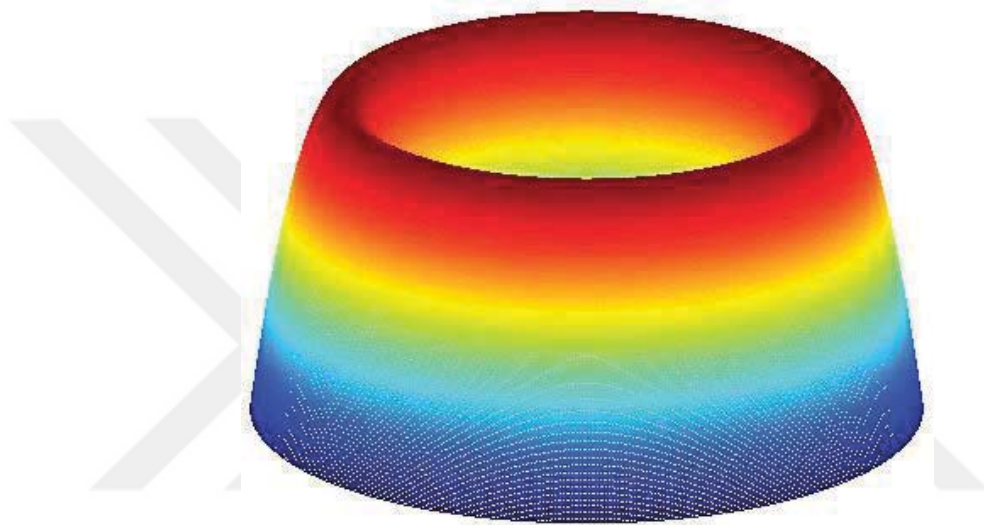
1.3.3. Halka yatak

İç çapı d , dış çapı D ve kalınlığı t olan halkanın şekil faktörü;

$$S = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4\pi(d + D)t} = \frac{D - d}{4t} \quad (1.35)$$

Eşitlik (1.30) $p(a) = 0$, $p(b) = 0$ sınır koşullarıyla düzenlenirse;

$$p(r) = \frac{3G\varepsilon_c}{t^2} \left[\frac{(D^2 - d^2) \ln(r/d)}{4 \ln(D/d)} - \left(r^2 - (d/2)^2 \right) \right] \quad (1.36)$$



Şekil 1.25. Halka yatağın basınç dağılımı.

Toplam yük P (Şekil 1.25);

$$P = 2\pi \int_a^b p(r) r dr = \frac{3G\varepsilon_c}{32t^2} \pi (D^2 - d^2) \left(D^2 + d^2 - \frac{D^2 - d^2}{\ln(D/d)} \right) \quad (1.37)$$

Buradan Eşitlik (1.24);

$$E_c = \frac{P}{A\varepsilon_c} = \frac{3G}{8t^2} \left(D^2 + d^2 - \frac{D^2 - d^2}{\ln(D/d)} \right) \quad (1.38)$$

Halka için şekil faktörü Eşitlik (1.6)'dan $s = \frac{D - d}{2t}$ olduğundan;

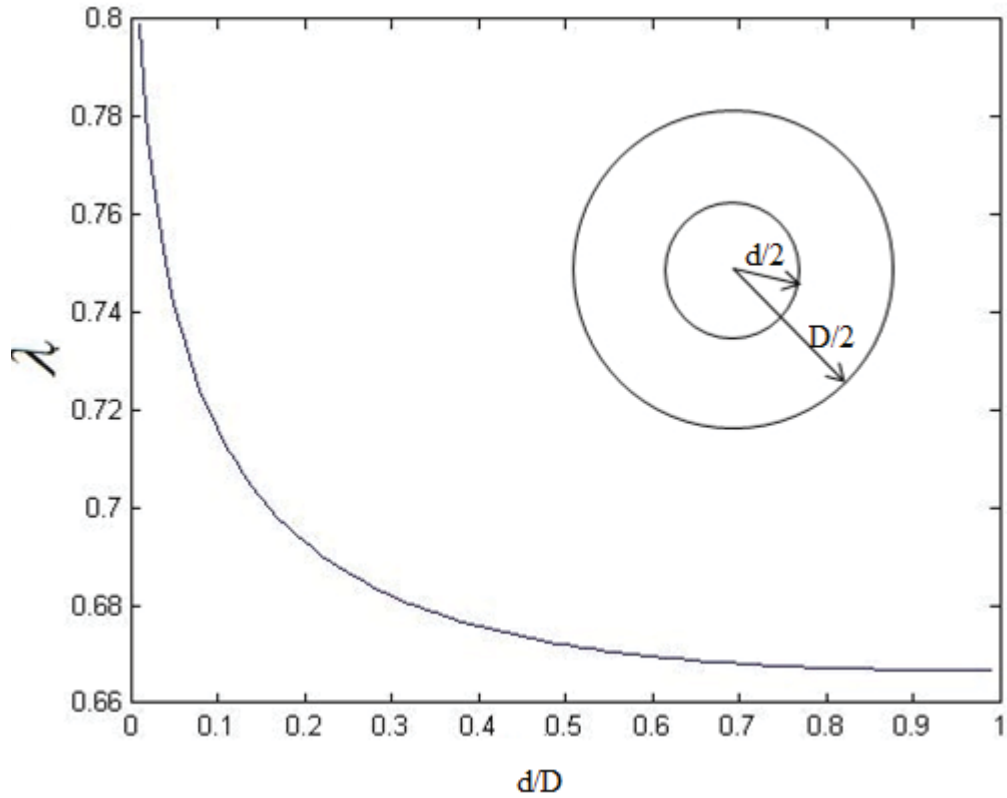
$$E_c = 6GS^2\lambda \quad (1.39)$$

Burada λ ;

$$\lambda = \frac{\left(D^2 + d^2 - \frac{D^2 - d^2}{\ln(D/d)} \right)}{(D - d)^2} \quad (1.40)$$

Eşitlik (1.40) d/D cinsinden yazılırsa (Şekil 1.26);

$$\lambda = \frac{\left(1 + \left(\frac{d}{D} \right)^2 - \frac{\left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]}{\ln(d/D)} \right)}{\left(1 - \frac{d}{D} \right)^2} \quad (1.41)$$



Şekil 1.26. Halka yatak yük modül diyagramı [64].

Eğer ortadaki delik çok küçük olursa basınç modülü ihmal edilebilir ve

$E_c = 6GS^2$ ve $S = \frac{D}{4t}$ olur, bu durumda Eşitlik (1.41);

$$\lambda = \frac{E_c}{6GS^2} = 1 + \varepsilon^2 + \frac{1 - \varepsilon^2}{\ln \varepsilon} \quad (1.42)$$

olur.



2. MALZEME VE YÖNTEM

Şekil 2.1’te helikopterler kanatlarında kullanılan elastomerik yatağın resmi görülmektedir. Bu yatak kesit halinde kesilerek içeriği incelenmiştir. Kesitin resmi Şekil 2.2’de görülmektedir. Yapılan testler sonucu yatakta kullanılan destek elemanının çelik olduğu ve üst ve alt kısmında bulunan tutucu malzemenin titanyum olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.1. Elastomerik yatak.

Elastomer malzemeler yapısal titreşimleri mekanik damperlerden daha iyi sönümlediklerinden her geçen gün daha popüler hale gelmektedir. Örneğin Elastomerik damperler, helikopter rotorlarında sık değiştirilmesi gereken konvansiyonel hidrolik damperlere göre daha iyi sönümleme yapmaktadır. Dinamik koşullar altında elastomerler viskoelastik davranış sergileyerek enerjiyi gecikmeyle sönümlerler. Viskoelastik malzemenin karakteri sıcaklık ve frekansa bağımlı olmasının yanı sıra hareketin genliğine de bağlıdır. Sonuç olarak elastomerik damperin davranış karakterini yeterince temsil edebilecek bir analitik model geliştirmek zordur [23, 24].



Şekil 2.2. Elastomerik yatağın kesiti

Elastomerik yatak; Kauçuk ve çelik katmanların vulkanizasyon yöntemiyle yapıştırılmasıyla oluşturulan bir yapıdır [67].

Son yıllarda, sonlu elemanlar metodunun geliştirilmesiyle, sonlu elemanlar, elastomerik yatak tasarımında, yatağın mekanik davranışının simülasyonu için kullanılmıştır [8, 61–66].

Elastomerik yataklar ayrıca binalarda ve köprülerde deprem izolatörü olarak kullanılır, ancak bu alanda kullanılan yataklar küresel değil, düzlemseldir (Şekil 2.3). Düzlemsel yatakların yük altında yer değiştirme karakteristiğini deneysel [71], sonlu elemanlar [68, 69] ve matematik model [70–73] kullanılan çalışmalar yapılmıştır.

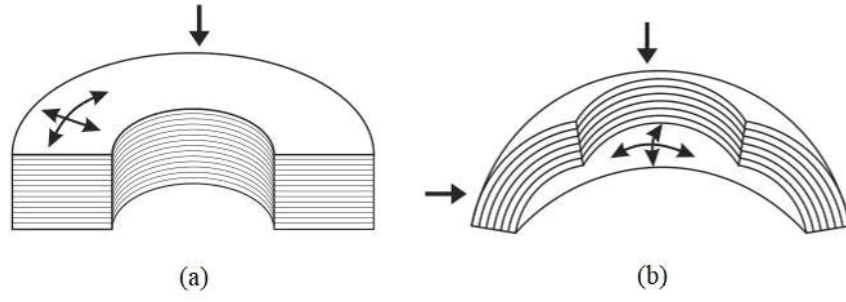
Küresel elastomerik yatağın mekanik özellikleriyle ilgili daha önce yapılmış çalışmalar Tablo 2.1’de verilmiştir. Bu çalışmada elastomer yatağın delik çapı, deliğin şekli, elastomer tabakaların kalınlığı, elastomer tabaka sayısı ve elastomer yatağın dış profili gibi geometrik parametrelerin her bir elastomer tabaka üzerine gelen gerilmelere etkisi incelenmiştir.

Elastomerler hiperelastik davranış göstermektedir. Ogden ve Moonley Rivlin bu davranışı temsil eden matematik modeller geliştirmiştir [63, 74]. Hiperelastik malzeme davranışını simüle eden sınırlı programdan biri de ABAQUS olduğundan bu çalışmada ABAQUS programı tercih edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında küresel elastomerik yatağın mekanik davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS programıyla simüle edildi ve elastomer tabakalarındaki gerilme dağılımı incelendi. Bu kapsamda delik çapının, delik şeklinin, elastomer tabaka kalınlığının, tabaka sayısının ve elastomer yatak profili gibi geometrik parametrelerin elastomer tabakalardaki maksimum gerilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre basma ve açısız yer değiştirme yükü altında, maksimum gerilme son üç elastomer tabakasında oluşmaktadır. Elastomer yatağın geometrik parametrelerini değiştirerek, tüm katmanlara gelen gerilmeleri azaltmak mümkündür. Elastomer tabakalar üzerine gelen gerilmelerin azalmasıyla yatak ömrü uzayacaktır.

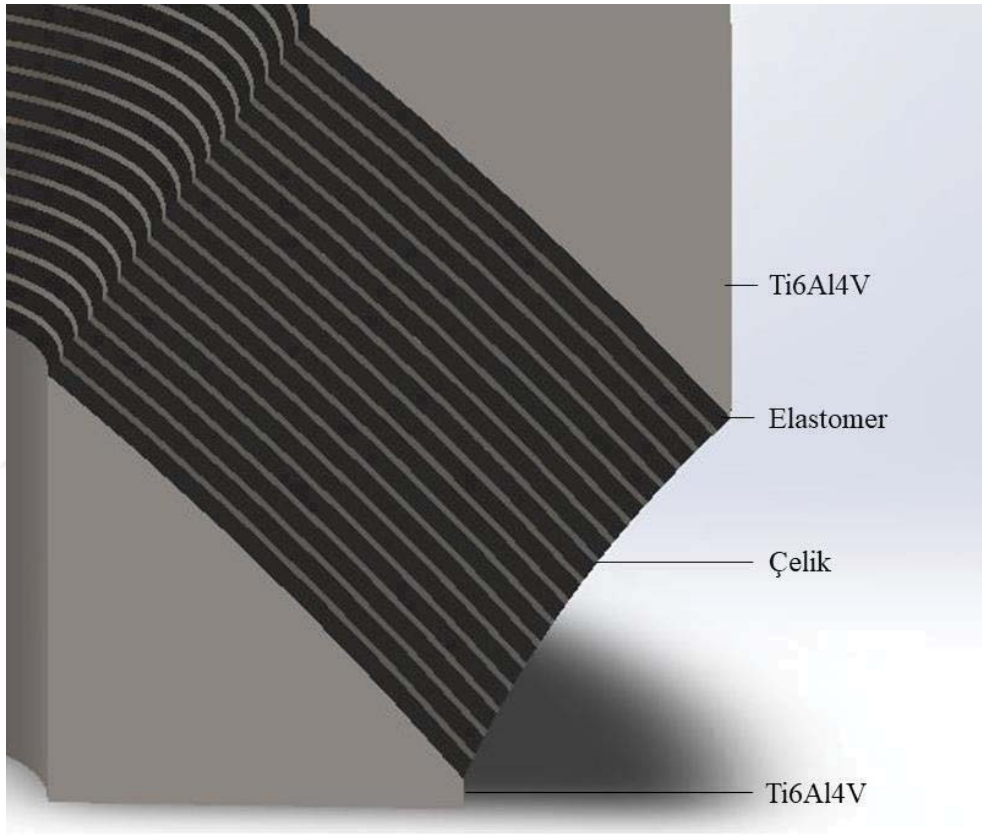
Tablo 2.1. Küresel elastomerik yatakların mekanik özellikleri üzerine yapılan önceki çalışmalar.

Yazar	Zhang X. et al. [61]	Su H. et al. [62]	Ren J. et al. [63]	Chen G. et al. [8]
Metot	Deneysel FEM	Deneysel FEM	Deneysel FEM	FEM
Yükleme	Basınç Açısız yer değiştirme	Basınç Açısız yer değiştirme	Basınç Açısız yer değiştirme	Açısız yer değiştirme
Model	Mooney-Rivlin	Ogden	Mooney-Rivlin	Mooney-Rivlin
Parametreler	Basınç Yay uzunluğu	Kauçuk cinsi Basınç Genleme Açısız yer değiştirme	Yay uzunluğu	Delik koniklik açısı Elastomer tabaka kalınlığı Dış yüzey eğrilik yarıçapı
Sonuç	Açısız genleme basıncın artmasıyla artmaktadır	Açısız genleme, kauçuğun kayma modülüne göre değişir	Açısız genleme basıncı artmaktadır.	Silindirik enjeksiyon holü kullanmak ve dış yüzey eğrilik yarıçapını arttırmak, maksimum gerilmeleri önemli ölçüde azaltır.



Şekil 2.3. Elastomer yataklar (a) düzlemsel (b) küresel.

2.1. Modelleme



Şekil 2.4. Elastomerik yatakta kullanılan malzemeler

Tablo 2.2. Elastomerik yatakta kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme cinsi	Elastisite modülü	Poisson oranı
Çelik	200 GPa	0,3
Ti6Al4V	115 GPa	0,35

Simülasyonda kullanılan çelik ve Ti6Al4V malzemeler Şekil 2.4’de, bu malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Mooney Rivlin hiperelastik malzeme şekil değiştirme modeli [79];

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2.1)$$

Genleme tensörünün birinci ve ikinci sabitleri I_1, I_2 [79];

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \quad (2.2)$$

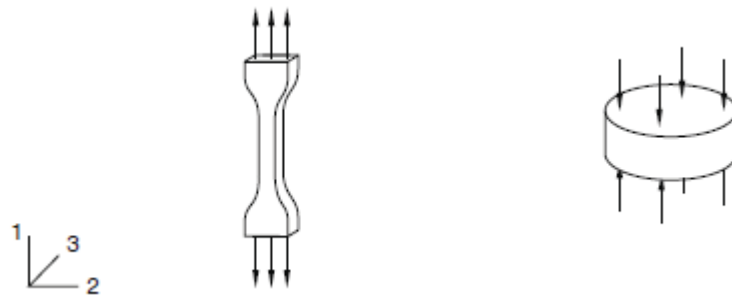
Burada λ birim uzamanın ifadesi. Sıkıştırılmaz malzeme ifadesi;

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1 \quad (2.3)$$

Sıkıştırılmaz malzeme için her bir yöndeki gerilme σ_i [78];

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad (2.4)$$

Burada p kinetik sınır koşullarına bağlıdır.



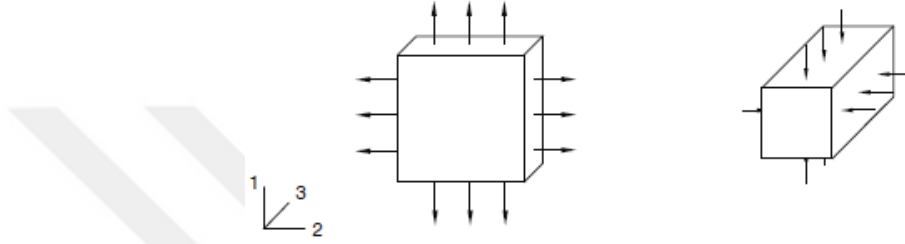
Şekil 2.5. Hiperelastik malzeme davranışını belirlemek için yapılan tek eksenli deneysel test [80]

Tek eksenli test durumunda (Şekil 2.5), 2 ve 3 yönlerinde çekme ve basma olmadığından gerilme sıfırdır ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). Sıkıştırılmaz malzeme için (Eşitlik (2.3)), 2 ve 3 yönündeki birim uzama;

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \quad (2.5)$$

Tek eksenli test durumunda, 2 ve 3 yönlerinde Kinetik sınır koşulu p ise sıfırdır ve 1 yönündeki gerilme;

$$\sigma_1 = \lambda_1 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} \quad (2.6)$$



Şekil 2.6. Hiperelastik malzeme davranışını belirlemek için yapılan iki eksenli deneysel test [80].

İki eksenli test durumunda (Şekil 2.6), 3 yönünde çekme ve basma olmadığından gerilme sıfırdır ($\sigma_3 = 0$). Sıkıştırılmaz malzeme için (Eşitlik (2.3)), 1 ve 2 yönündeki birim uzama;

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_3}} \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.4)'deki kinetik sınır koşulları kullanılarak 1 ve 2 yönlerindeki gerilmelerin ifadesi;

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \lambda_1 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \lambda_3 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} \quad (2.8)$$

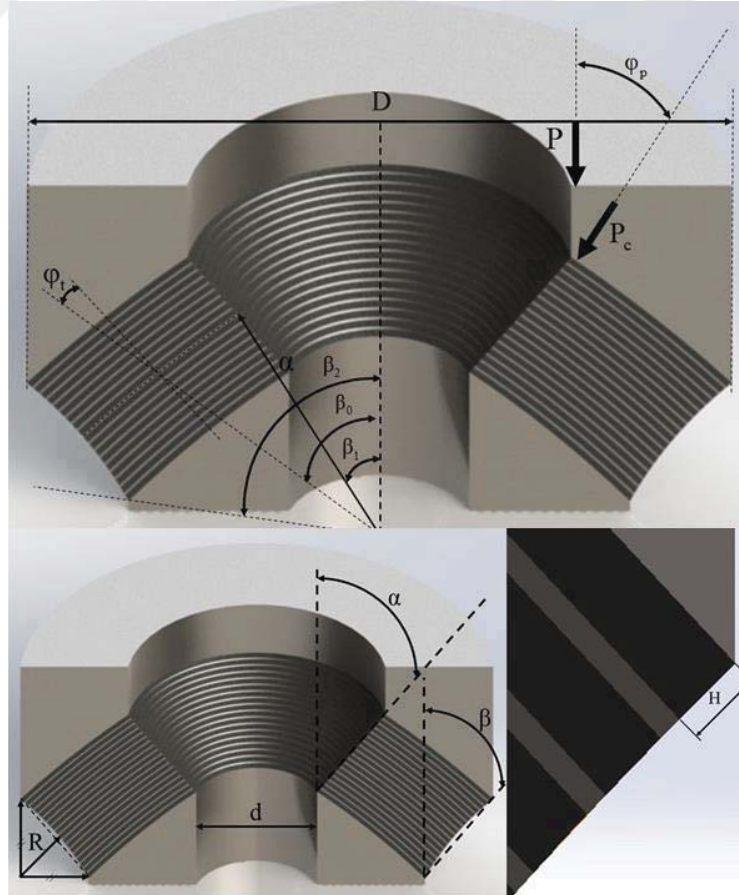
C_{10} ve C_{01} malzeme sabitleri Eşitlik (2.6) ve Eşitlik (2.7)'den hesaplanabilir. Karbon siyahıyla güçlendirilmiş kauçuk malzemenin iki eksenli ve tek eksenli test sonuçları Shahzad ve diğ. [81] çalışmalarından alındı. ABAQUS programının hesaplamalarına göre, $C_{10} = 0,155$, $C_{01} = 0,02758$ olarak bulunmuştur.

Basınç yüklemesi ve açısai yer değiştirme yüklemesinden kaynaklanan çevresel gerilme için, Anon [82] ve Woodberry [83] aşağıdaki amprik ifadeyi çıkartmıştır [63];

$$\begin{aligned}\sigma_{r,p} &= \frac{4087 \cdot P_c}{n_e - 1} \cdot k_r \cdot \Omega \\ \sigma_{r,\delta} &= \frac{43950 \cdot \theta}{n_e - 1} \cdot k_r \cdot \Omega \\ \sigma_r &= \sigma_{r,p} + \sigma_{r,\delta}\end{aligned}\tag{2.9}$$

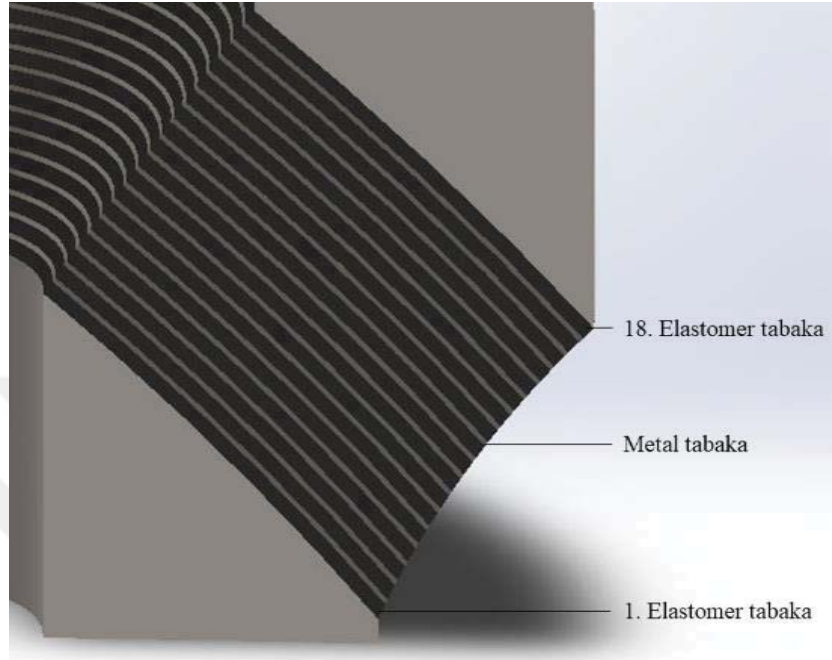
ve,

$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{a^{2.4} \cdot \cos \beta_0}{3283 \cdot H^3 + H \cdot \cos^2 \beta_0 \cdot [a^2 \cdot (\beta_2 - \beta_1)^2 - 3283 \cdot H^2]} \\ k_r &= 0.1038 + 0.024 \cdot \varphi_t - 0.00012 \cdot \varphi_t^2 \\ P_c &= \frac{P}{A} \cdot \cos(\varphi_p) = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \cdot \cos(\varphi_p)\end{aligned}\tag{2.10}$$

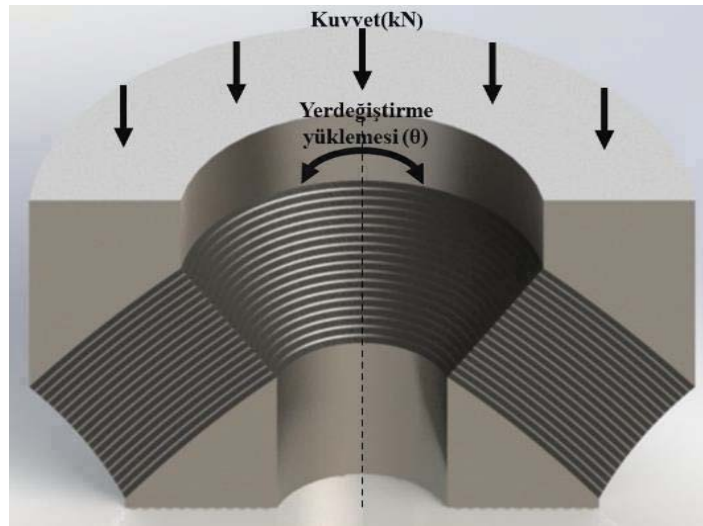


şekil 2.7. Elastomer yatağın geometrik parametreleri.

Elastomer yatağın ölçüleri Şekil 2.7’te görülmektedir. Elastomerik yatağın kesiti Şekil 2.8’te görülmektedir. Şekil 2.9’da ABAQUS programında kuvvet ve açisal yer değiştirme yüklemesi uygulanan elastomer yatak görülmektedir.



Şekil 2.8. Elastomerik yatağın kesiti.



Şekil 2.9. Elastomerik yatağın basınç ve yerdeğistirme yüklemesi.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Delik Çapının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

20, 30, 40, 50, 60, 70 ve 80 mm delik çapına sahip elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu yatakların geometrik parametreleri Tablo 3.1’de, gerilme dağılımı Şekil 3.1, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’de, gerilme-genleme grafiği Şekil 3.2’de ve genleme dağılımı Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’da görülmektedir.

Şekil 3.1’in yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-2500 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Şekil 3.2’un yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-2500 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.3’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.4’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.5’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

Şekil 3.6’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve

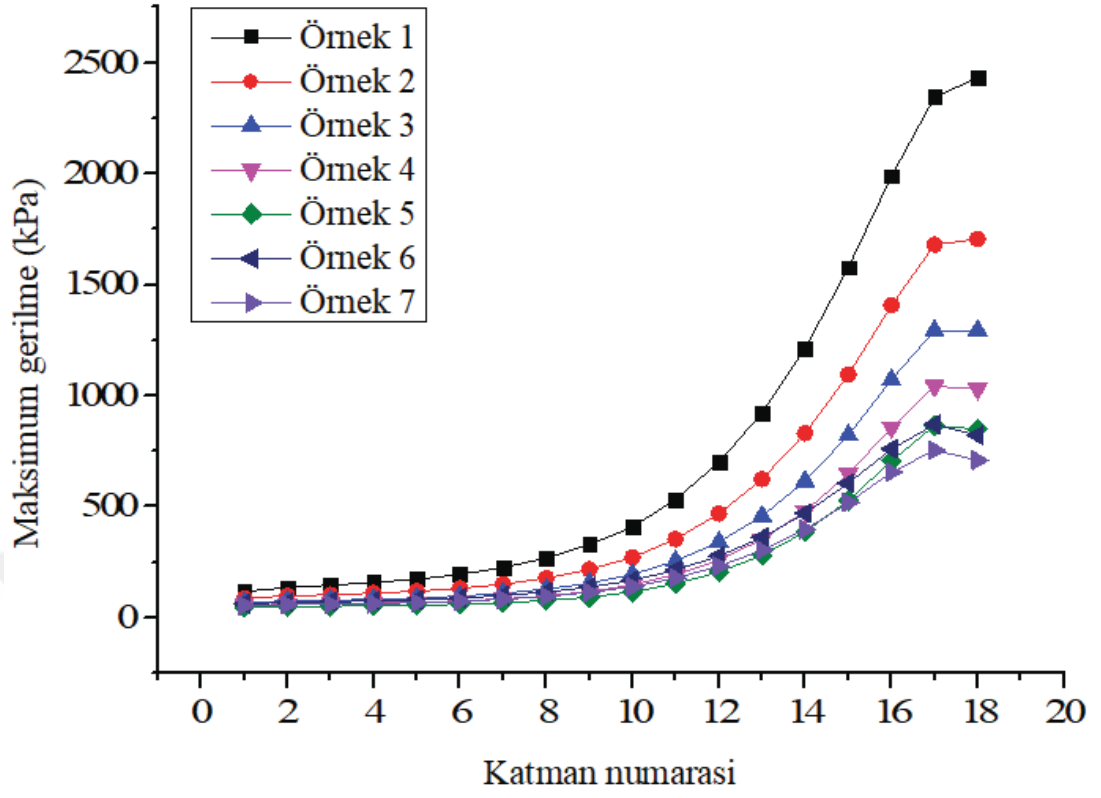
kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son tabakalarda meydana gelmektedir. Kauçuğun ömrü maksimum gerilmelerin oluştuğu yerde olduğundan, yatağın ömrünü arttırmak için maksimum gerilmelerin oluştuğu yerlerdeki gerilmeleri düşürmek gerekmektedir.

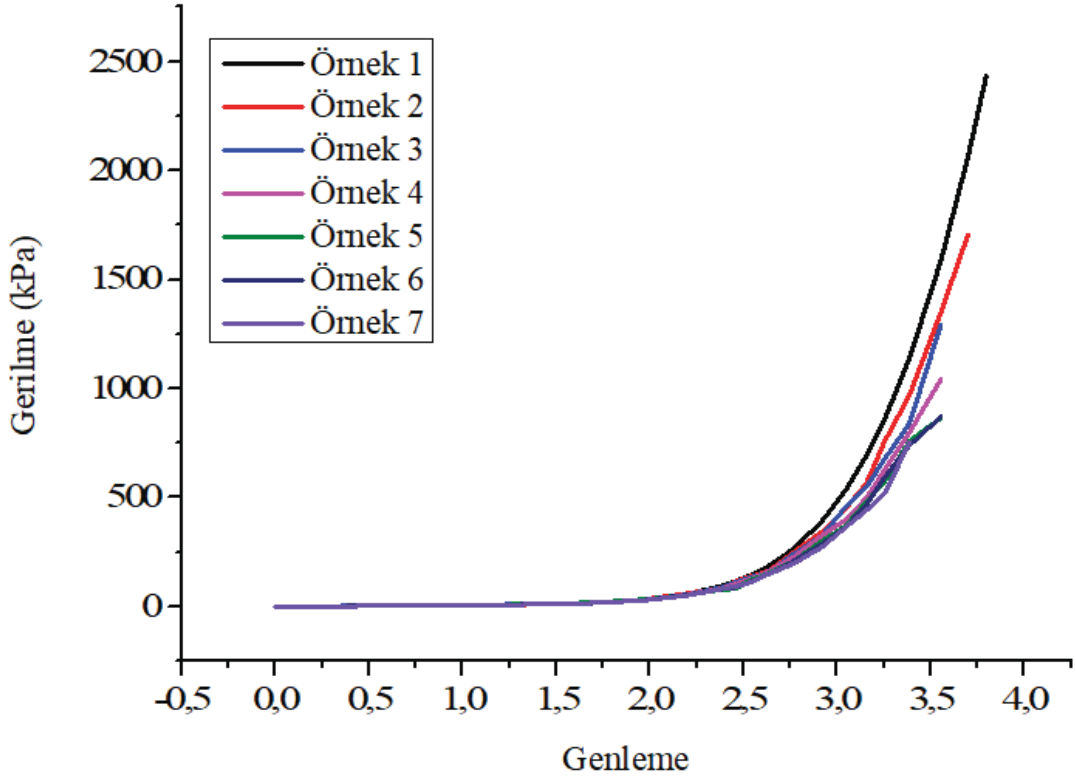
Tablo 3.1. Örnek 1-7'nin geometrik parametreleri.

	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3	Örnek 4	Örnek 5	Örnek 6	Örnek 7
a (mm)	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5
β_0 (°)	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8
β_1 (°)	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67
β_2 (°)	45,92	45,92	45,92	45,92	45,92	45,92	45,92
φ_t (°)	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8
φ_p (°)	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26
D_{son} (mm)	150	160	170	180	190	200	210
n_e	18	18	18	18	18	18	18
d_{son} (mm)	20	30	40	50	60	70	80
α (°)	0	0	0	0	0	0	0
β (°)	0	0	0	0	0	0	0
R (mm)	0	0	0	0	0	0	0
H (mm)	3	3	3	3	3	3	3

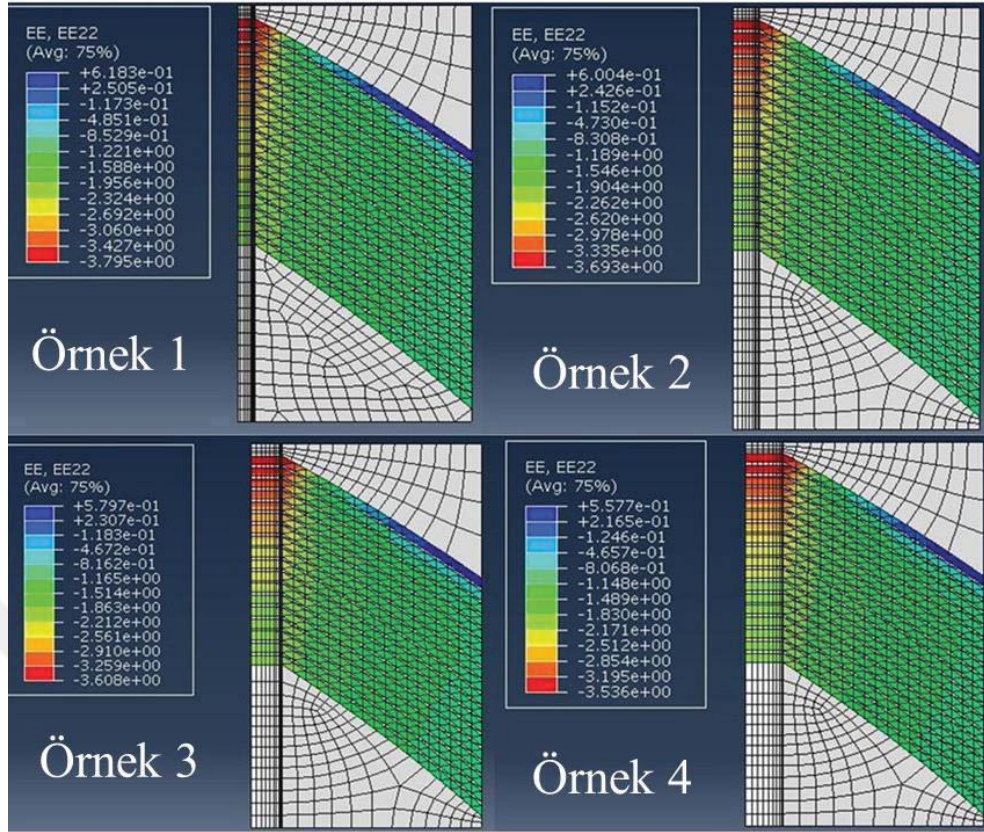
Şekil 3.1’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 3 tabakada gerçekleşmekte, delik çapının artmasıyla bu gerilmeler azalmakta ve ilk 8 tabakada önemli bir değişiklik olmamaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi küçük delik çapı kullanıldığında oluşan yüksek gerilmelerden yatağın ömrü azalacaktır. Eşitlik (2.10)’da görüldüğü gibi tabakalara gelen gerilmeler ($D_i^2-d_i^2$) ile ters orantılıdır. Bu yüzden büyük delik çapı kullanmak daha avantajlıdır.



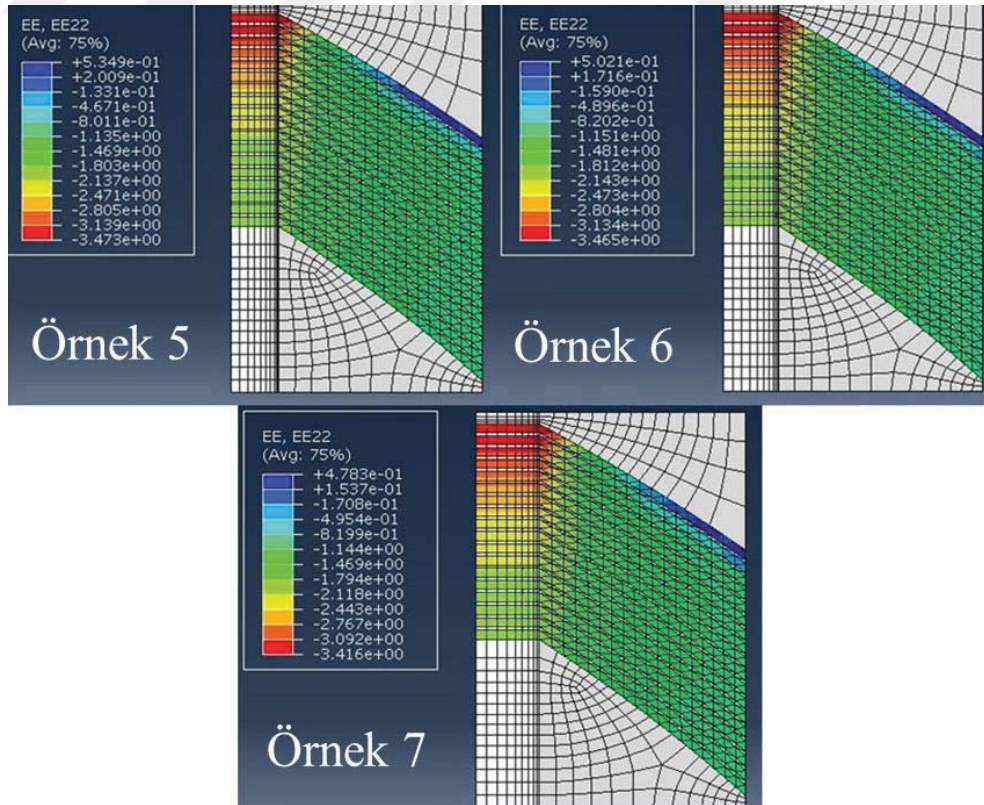
Şekil 3.1. Delik çapının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi



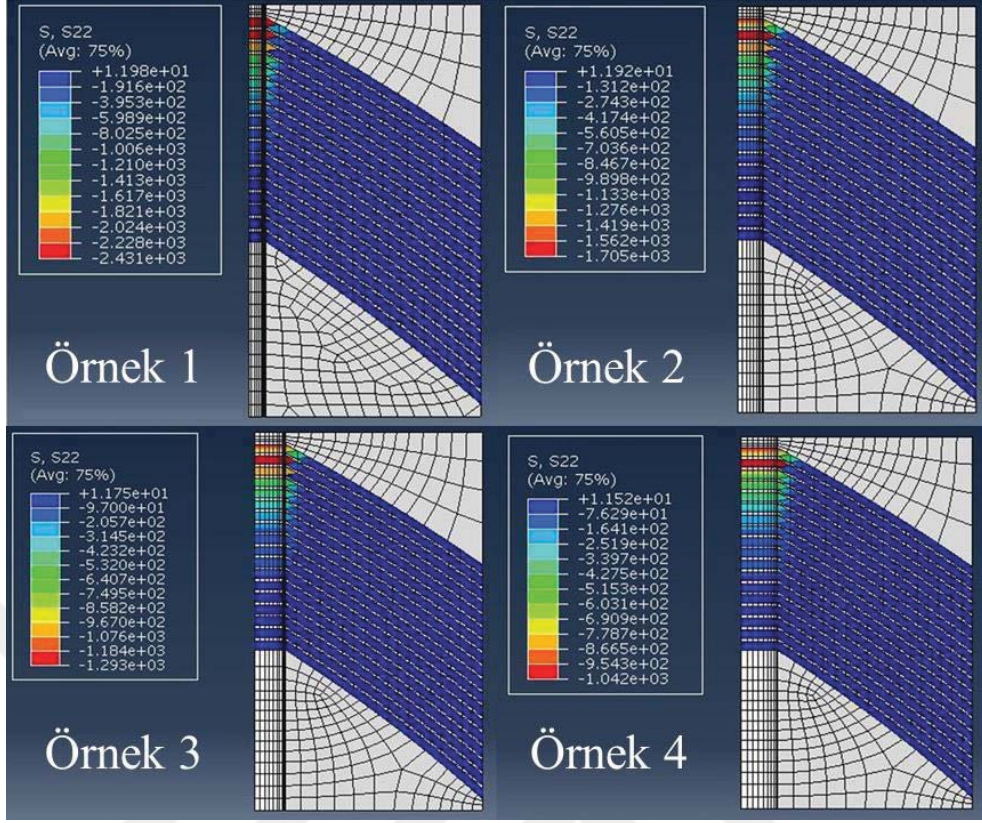
Şekil 3.2. Delik çapının gerilme-genleme dağılımına etkisi.



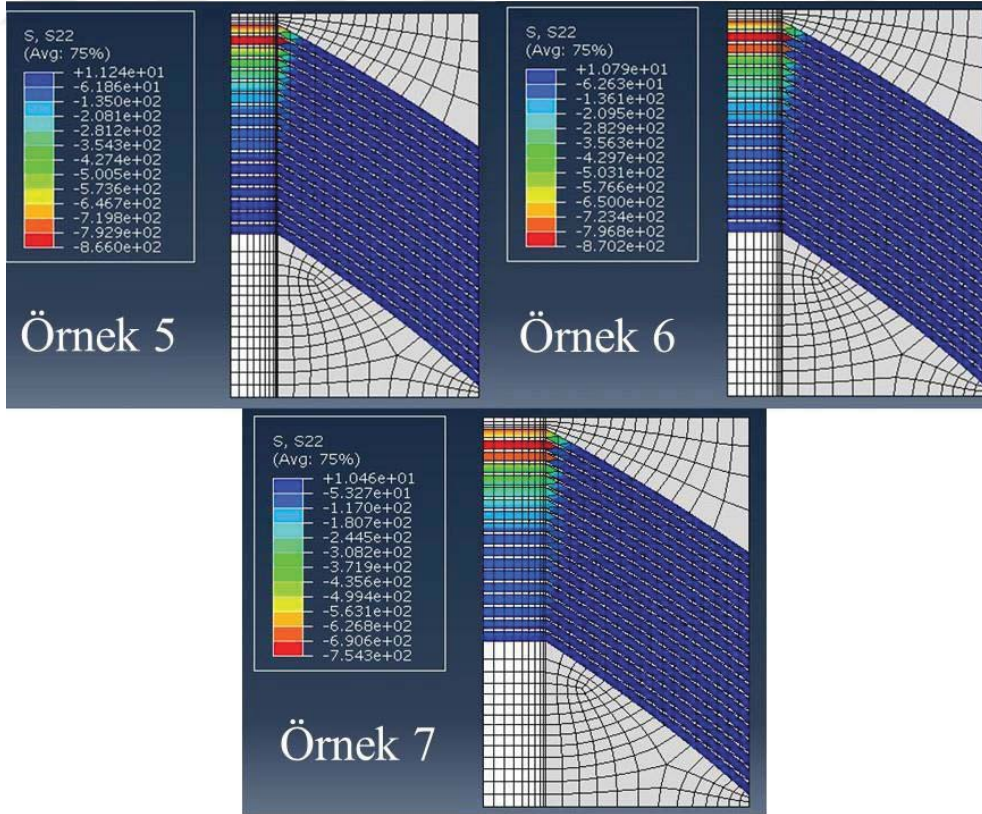
Şekil 3.3. Örnek 1-4 genleme dağılımı.



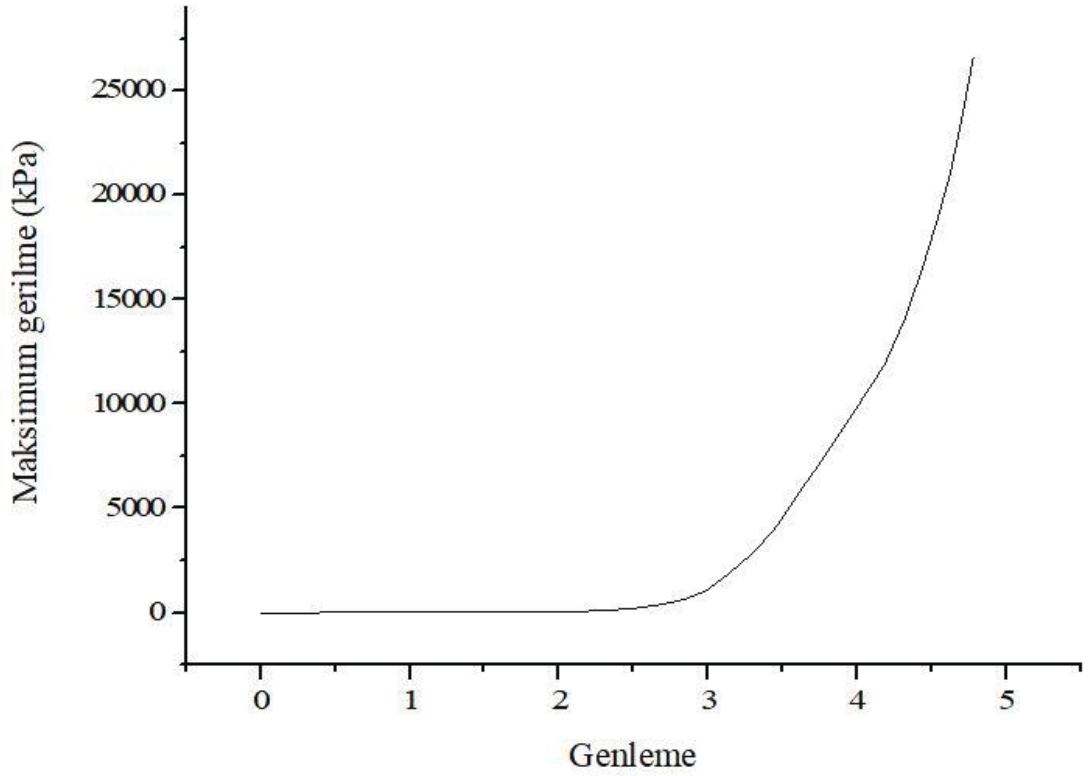
Şekil 3.4. Örnek 5-7 genleme dağılımı.



Şekil 3.5. Örnek 1-4 gerilme dağılımı.



Şekil 3.6. Örnek 5-7 gerilme dağılımı.



Şekil 3.7. Örnek 1 456 kN basınç yüklemesi altında gerilme genleme grafiği.

Şekil 3.7’de en yüksek gerilmelerin oluştuğu Örnek 1’e yapılan basınç yüklemesi 456 kN’a kadar arttırıldığında elde edilen gerilme genleme grafiği görülmektedir. 456 kN’dan yüksek basınç yüklemelerinde elastomerik yatakta bozulmalar meydana gelmektedir. Bu grafikte yatay eksen 0-5 arası genleme miktarını, dikey eksen ise 0-25000 kPa arası gerilmeleri göstermektedir. Şekil 3.7’de Callister’in [13] elastomerler için verdiği gerilme genleme grafiğine benzer bir davranış görülmektedir.

3.2. Dış Yüzey Koniklik Açısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° dış yüzey koniklik açısına ve silindirik dış yüzeye sahip elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu yatakların geometrik parametreleri Tablo 3.2’de ve gerilme dağılımı Şekil 3.8, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de, gerilme genleme grafiği Şekil 3.9 ve genleme dağılımları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de görülmektedir.

Tablo 3.2. Örnek 7-14'ün geometrik parametreleri.

	Örnek 7	Örnek 8	Örnek 9	Örnek 10	Örnek 11	Örnek 12	Örnek 13	Örnek 14
a (mm)	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5
β_0 (°)	41,8	41,92	42,15	42,36	42,54	42,71	42,86	43,01
β_1 (°)	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67
β_2 (°)	45,92	46,49	46,99	47,43	47,82	48,19	48,52	48,84
φ_t (°)	41,8	39,34	37,18	35,16	33,23	31,39	29,61	27,87
φ_p (°)	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26
D_{son} (mm)	210	226,56	240,92	253,6	264,96	275,32	284,9	293,9
n_e	18	18	18	18	18	18	18	18
d_{son} (mm)	80	80	80	80	80	80	80	80
α (°)	0	0	0	0	0	0	0	0
β (°)	0	5	10	15	20	25	30	35
R (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0
H (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3

Şekil 3.8'in yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Şekil 3.9'in yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.10'da tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

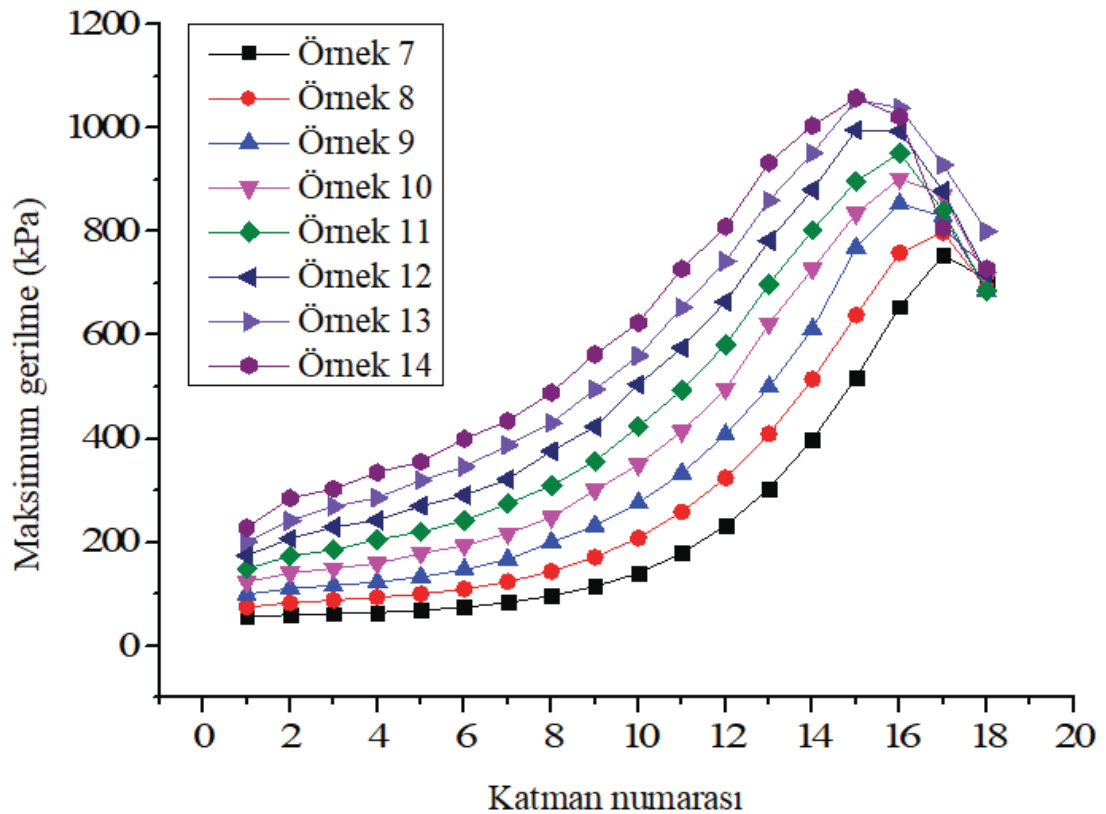
Şekil 3.11'de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.12'de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve

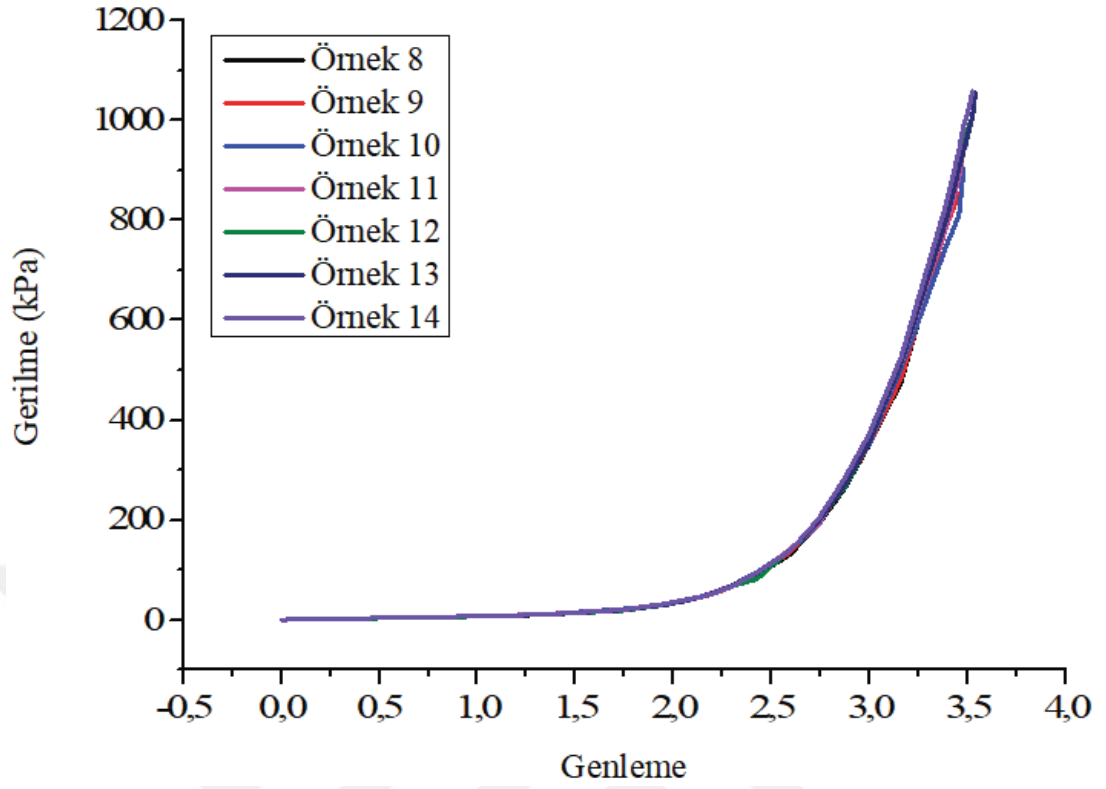
kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

Şekil 3.13’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

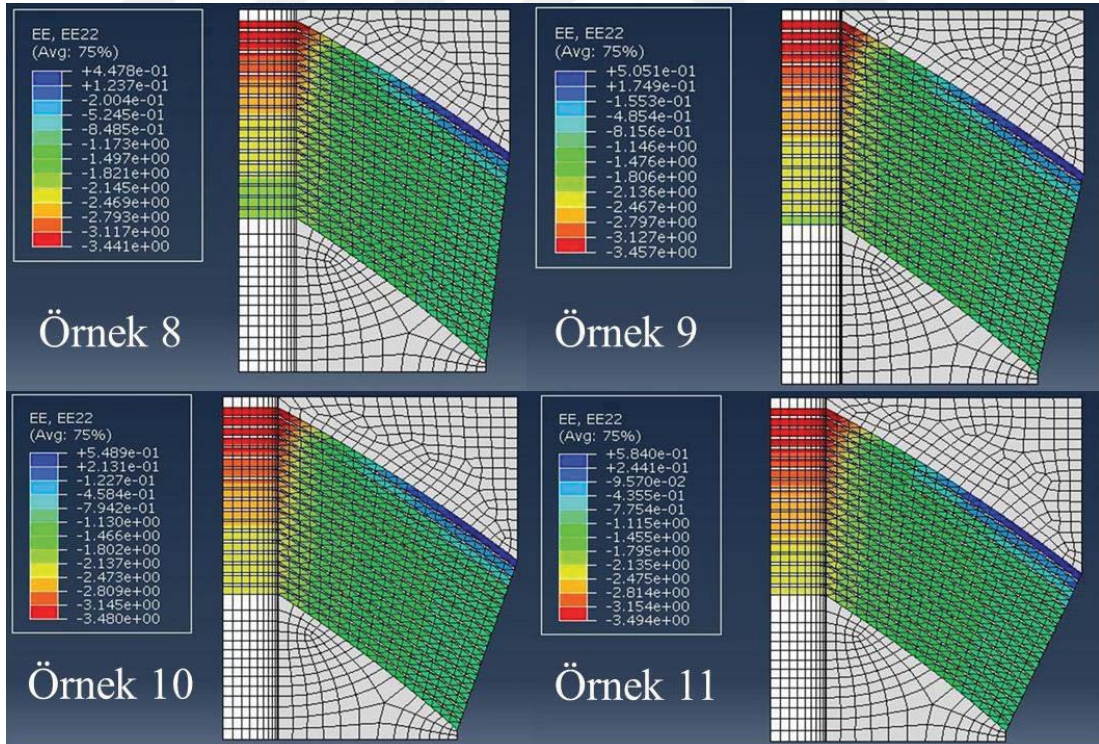
Şekil 3.8’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler 13.-16. tabakalarda gerçekleşmekte çünkü son tabakalarda elastomer tabaka yüzey alanları artmaktadır (Eşitlik (2.10)), ilk 8 delikte ise önemli bir değişiklik olmamaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi konik dış yüzey kullanıldığında oluşan yüksek gerilmelerden yatağın ömrü azalacaktır. Çünkü tabakalardaki gerilme φ_i ile ters orantılıdır (Eşitlik (2.10)). Bu yüzden silindirik dış yüzey kullanmak daha avantajlıdır.



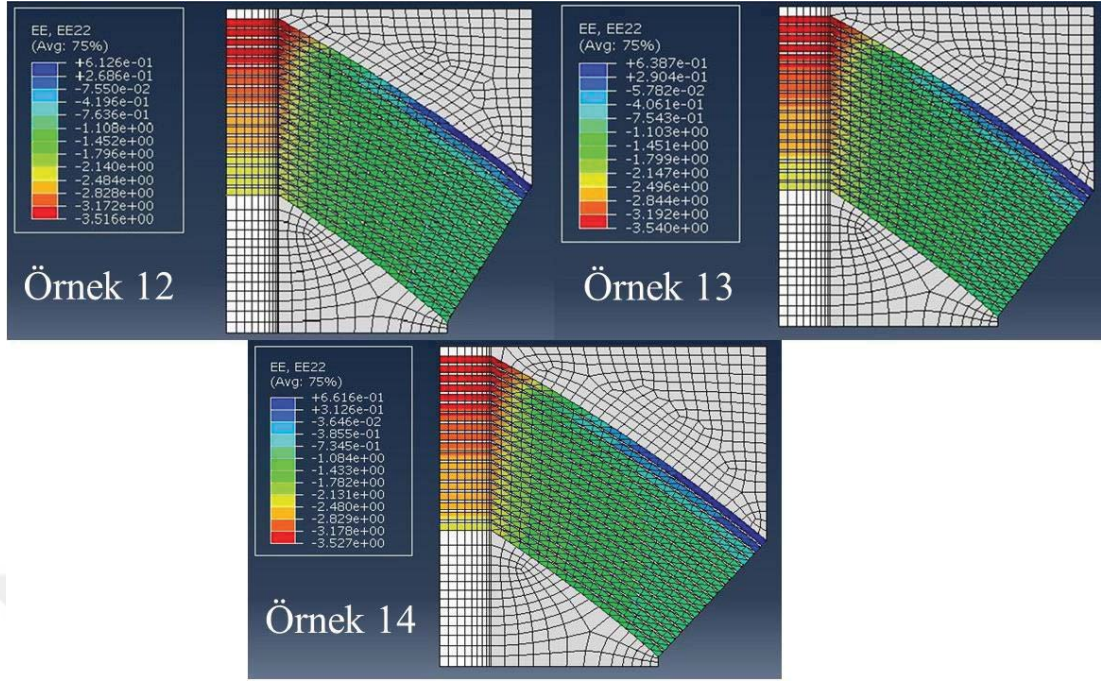
Şekil 3.8. Dış yüzey koniklik açısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



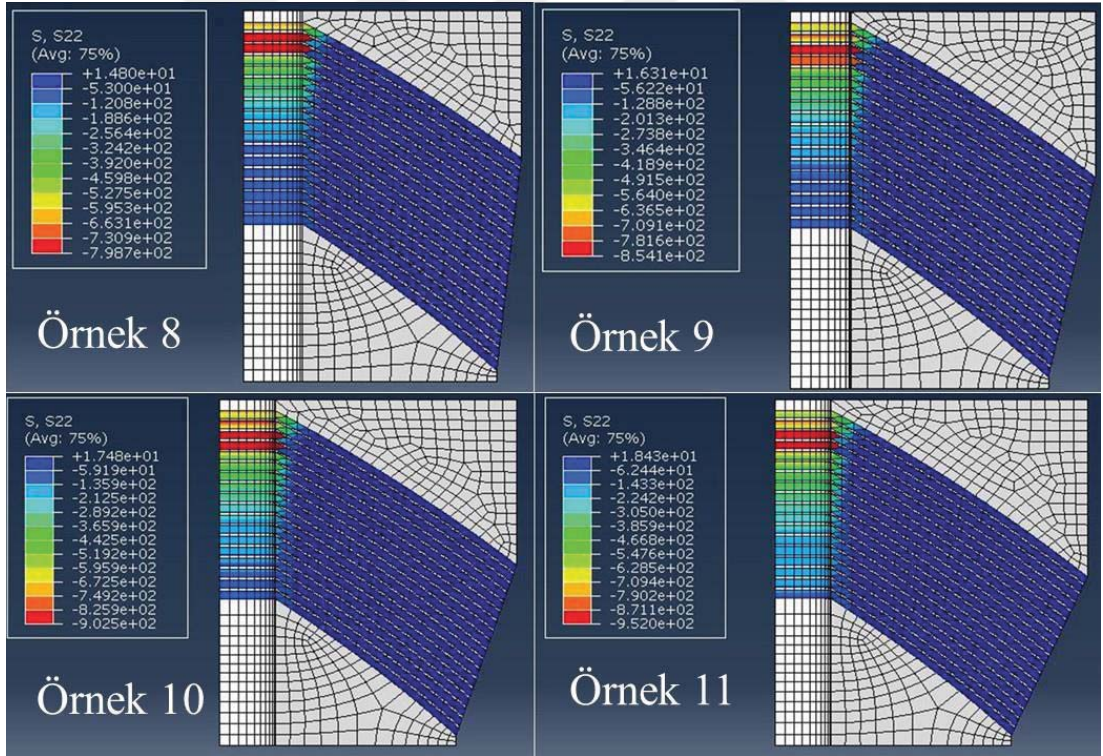
Şekil 3.9. Dış yüzey koniklik açısının gerilme-genleme dağılımına etkisi.



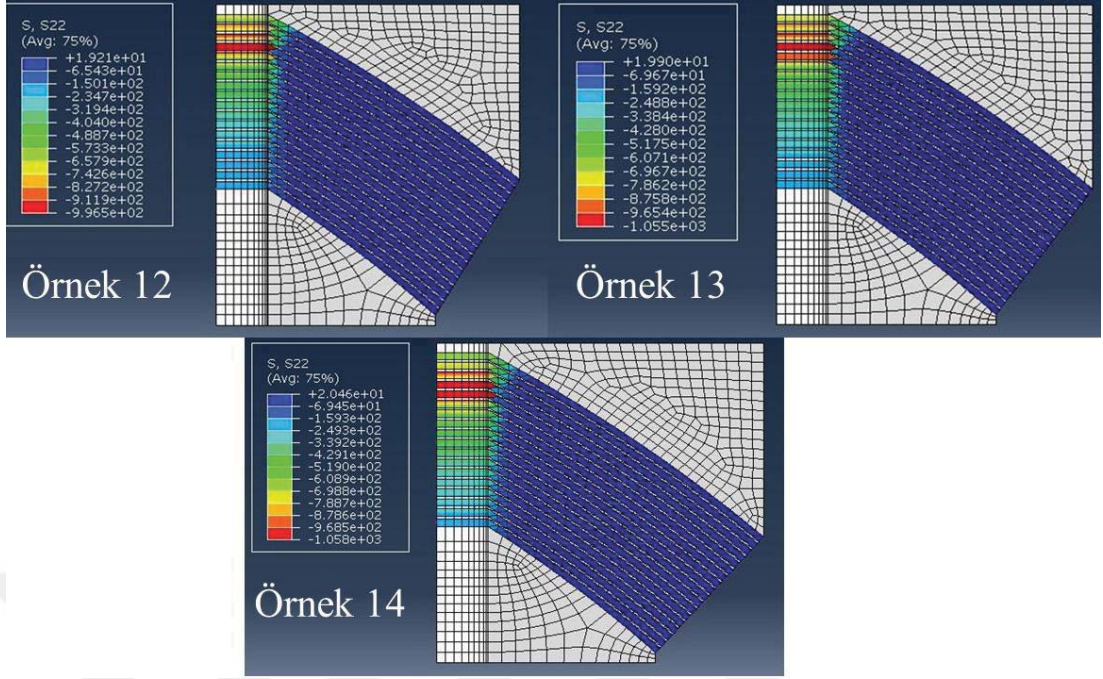
Şekil 3.10. Örnekleme 8-11 genleme dağılımı.



Şekil 3.11. Örnek 12-14 genleme dağılımı.



Şekil 3.12. Örnek 8-11 gerilme dağılımı.



Şekil 3.13. Örnek 12-14 gerilme dağılımı.

3.3. Dış Yüzey Eğrilik Yarıçapının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

500, 450, 400, 350, 300, 250, 200 ve 0 mm dış yüzey eğrilik yarıçapına sahip elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu farklı dizaynların geometrik parametreleri Tablo 3.3'te, gerilme dağılımı Şekil 3.14, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'de, gerilme genleme grafiği Şekil 3.15'de ve genleme dağılımı Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de görülmektedir.

Şekil 3.14'nin yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

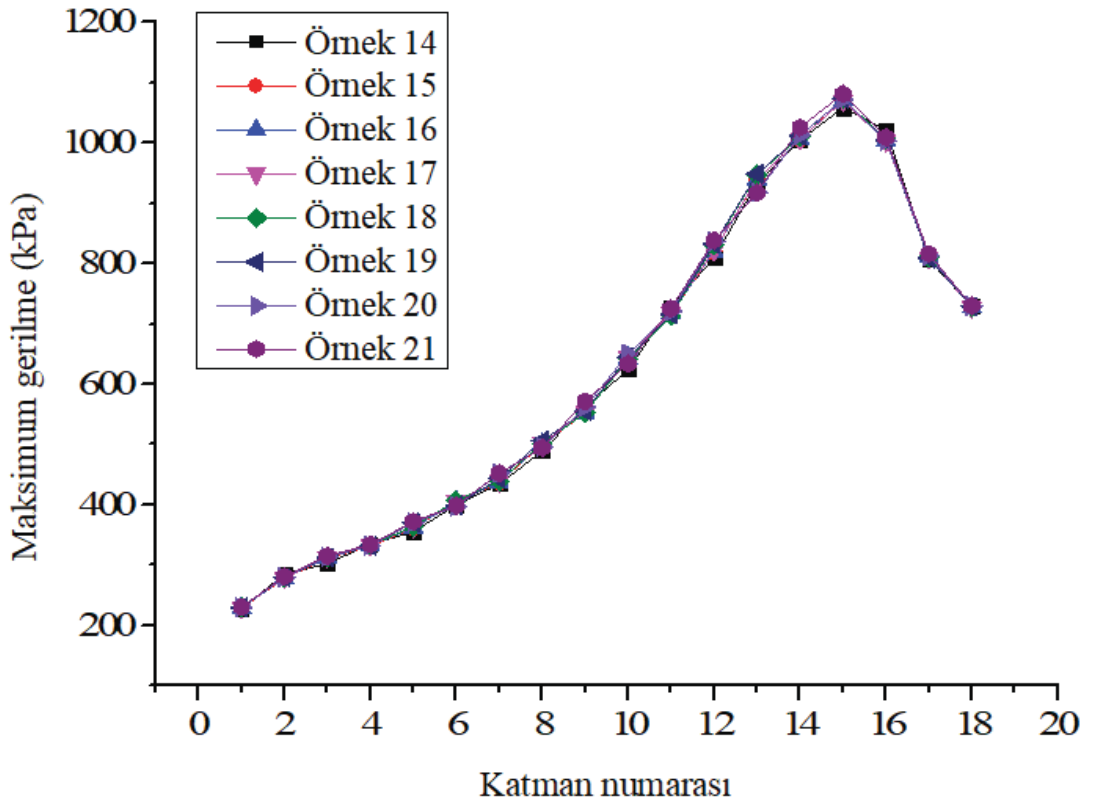
Şekil 3.15'in yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.16'de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

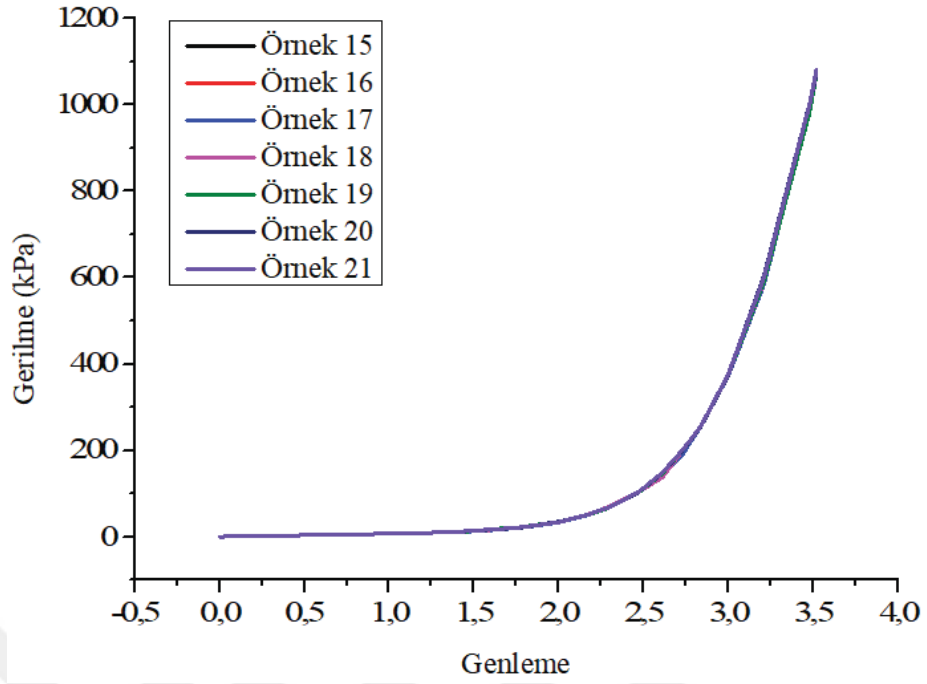
Şekil 3.17’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.18’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

Şekil 3.19’te tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.



Şekil 3.14. Dış yüzey eğrilik yarıçapının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



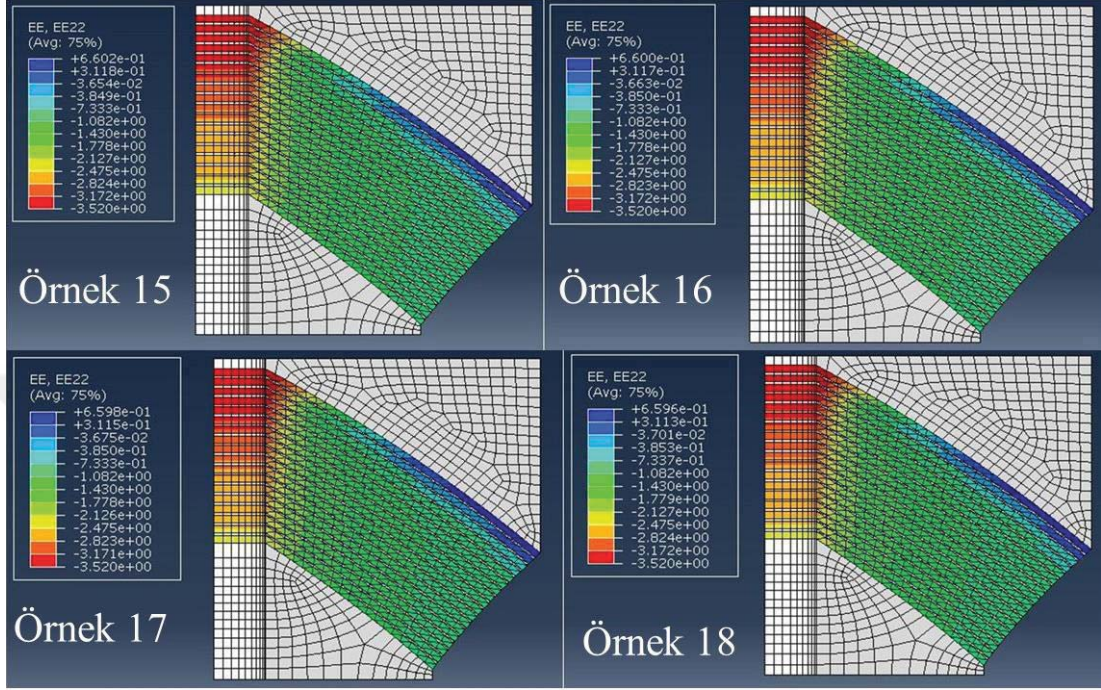
Şekil 3.15. Dış yüzey eğrilik yarıçapının gerilme-genleme dağılımına etkisi.

Tablo 3.3. Örnek 14-21'in geometrik parametreleri.

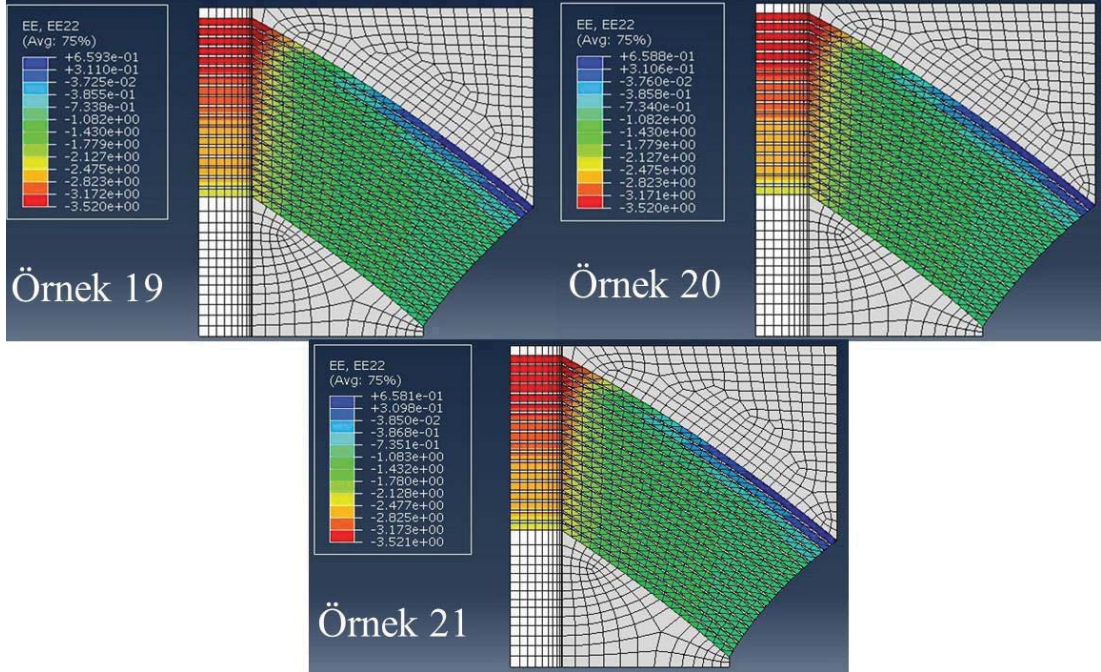
	Örnek 14	Örnek 15	Örnek 16	Örnek 17	Örnek 18	Örnek 19	Örnek 20	Örnek 21
a (mm)	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5
β_0 (°)	43,01	42,94	42,93	42,93	42,91	42,9	42,88	42,85
β_1 (°)	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67
β_2 (°)	48,84	48,71	48,7	48,68	48,66	48,62	48,58	48,51
φ_t (°)	27,87	28,62	28,69	28,77	28,89	29,05	29,24	29,57
φ_p (°)	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26	35,26
D_{son} (mm)	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9
n_e	18	18	18	18	18	18	18	18
d_{son} (mm)	80	80	80	80	80	80	80	80
α (°)	0	0	0	0	0	0	0	0
β (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
R (mm)	0	500	450	400	350	300	250	200
H (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3

Şekil 3.14'de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler 13-16. tabakalarda gerçekleşmekte çünkü yüzey alanı azalmaktadır (Eşitlik (2.10)) ve dış yüzey eğrilik

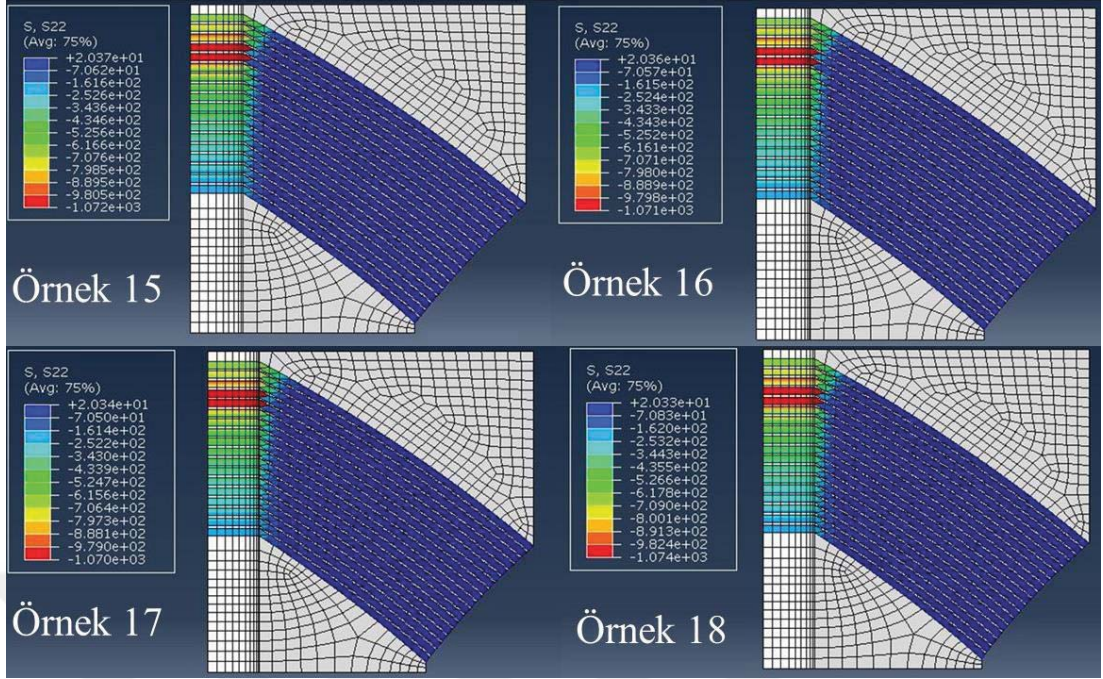
yarıçapının değişmesiyle önemli bir değişiklik olmamaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi dış yüzeyi eğri yatak kullanıldığında oluşan yüksek gerilmelerden yatağın ömrü azalacaktır. Bu yüzden düz dış yüzey kullanmak daha avantajlıdır.



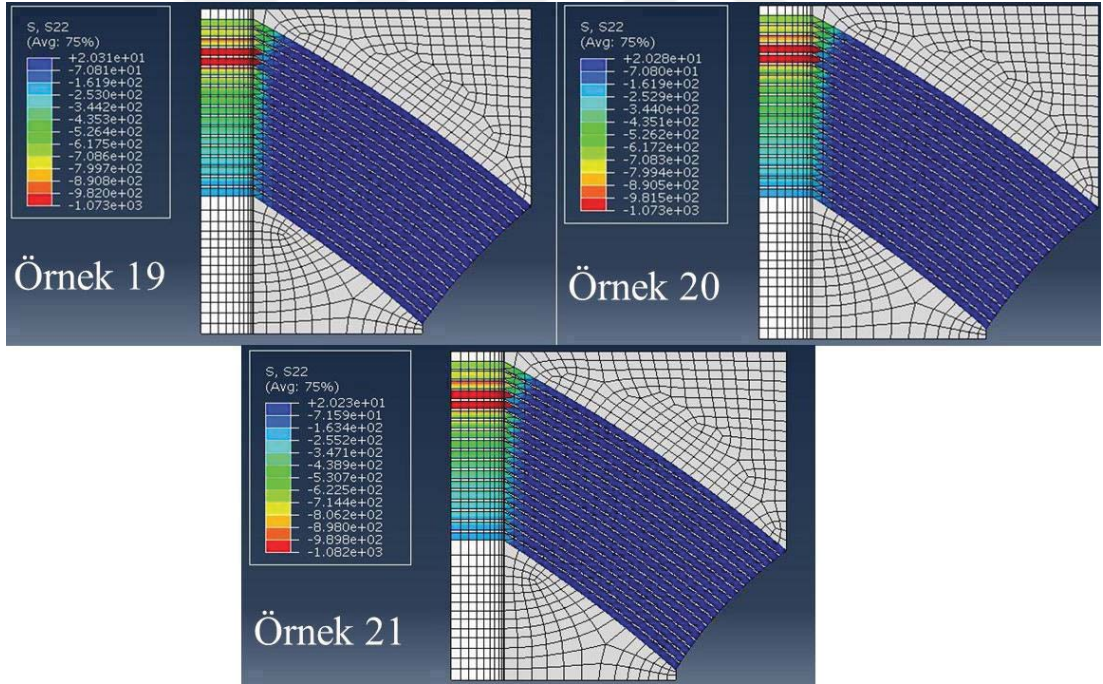
Şekil 3.16. Örnek 15-18 genleme dağılımı.



Şekil 3.17. Örnek 19-21 genleme dağılımı.



Şekil 3.18. Örnek 15-18 gerilme dağılımı.



Şekil 3.19. Örnek 19-21 gerilme dağılımı.

3.4. Delik Koniklik Açısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° delik koniklik açısına sahip ve silindirik deliğe sahip elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu farklı dizaynların geometrik parametreleri Tablo 3.4'te ve gerilme dağılımı Şekil 3.20, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'da,

gerilme genleme grafiği Şekil 3.21’de ve genleme dağılımları Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de görülmektedir.

Tablo 3.4. rnek 21-28’in geometrik parametreleri.

	rnek 21	rnek 22	örnek 23	örnek 24	örnek 25	örnek 26	örnek 27	örnek 28
a (mm)	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5	605,5
β_0 (°)	42,85	43,09	43,31	43,51	43,69	43,86	44,03	44,18
β_1 (°)	37,67	38,12	38,52	38,89	39,23	39,55	39,86	40,15
β_2 (°)	48,51	48,51	48,51	48,51	48,51	48,51	48,51	48,51
φ_1 (°)	29,57	26,62	23,84	21,2	18,63	16,13	13,7	11,27
φ_p (°)	35,26	36,07	36,81	37,49	38,12	38,73	39,3	39,87
D_{son} (mm)	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9	293,9
n_e	18	18	18	18	18	18	18	18
d_{son} (mm)	80	94,8	108,08	120,22	131,44	142	152,06	161,78
α (°)	0	5	10	15	20	25	30	35
β (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
R (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
H (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3

Şekil 3.20’nin yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

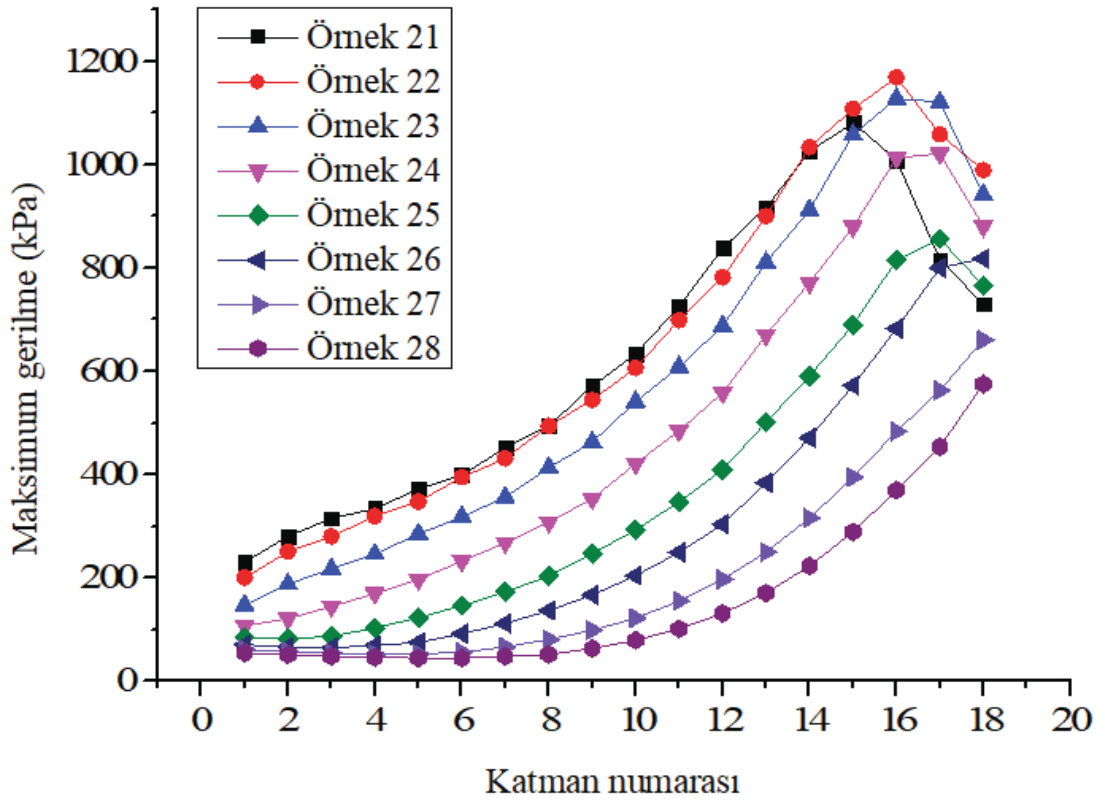
Şekil 3.21’nin yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karŐılıklı gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.22’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttııkça renk kırmızılaşmaktadır.

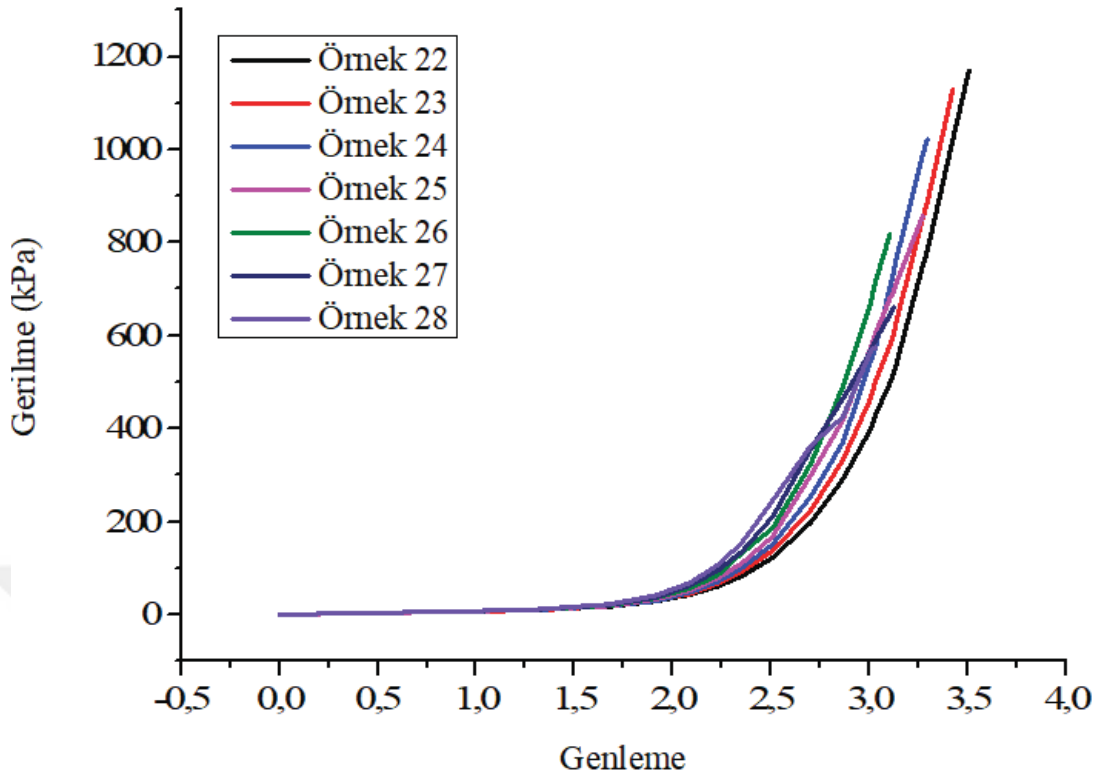
Şekil 3.23'da tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.24'da tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

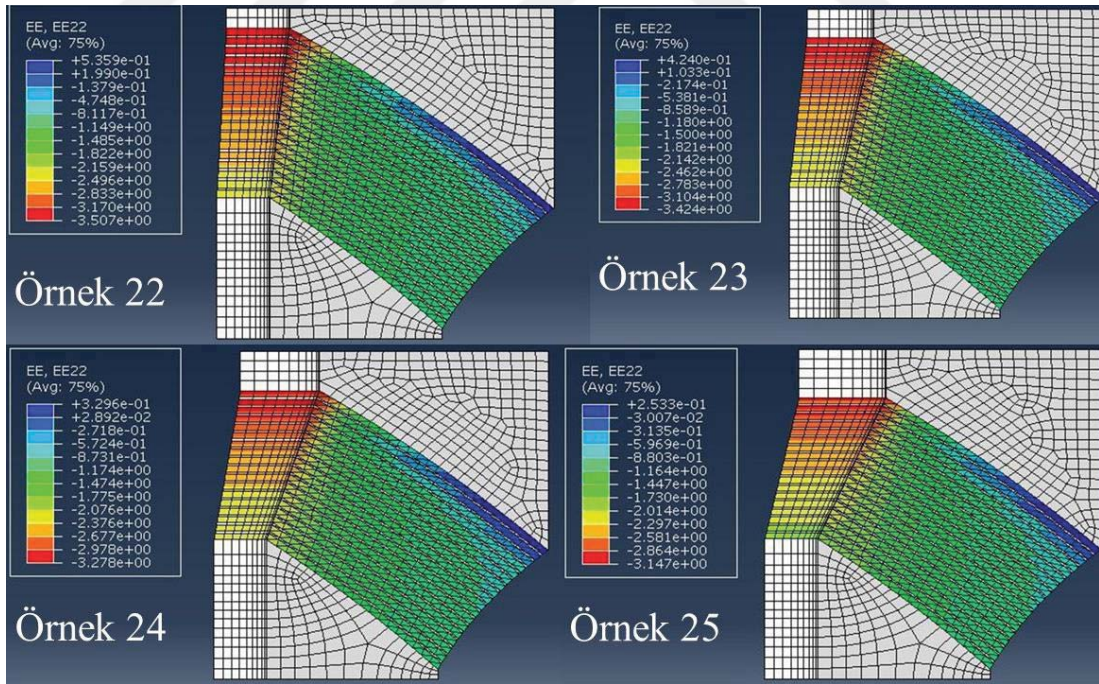
Şekil 3.25'de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.



Şekil 3.20. Delik koniklik açısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



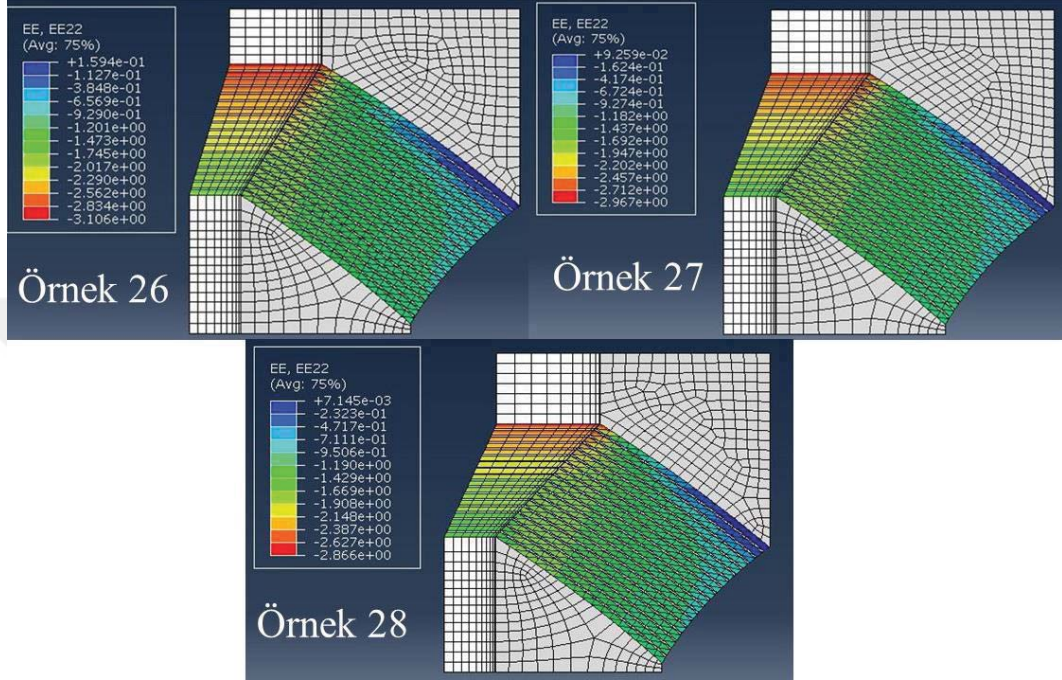
Şekil 3.21. Delik koniklik açısının gerilme-genleme dağılımına etkisi.



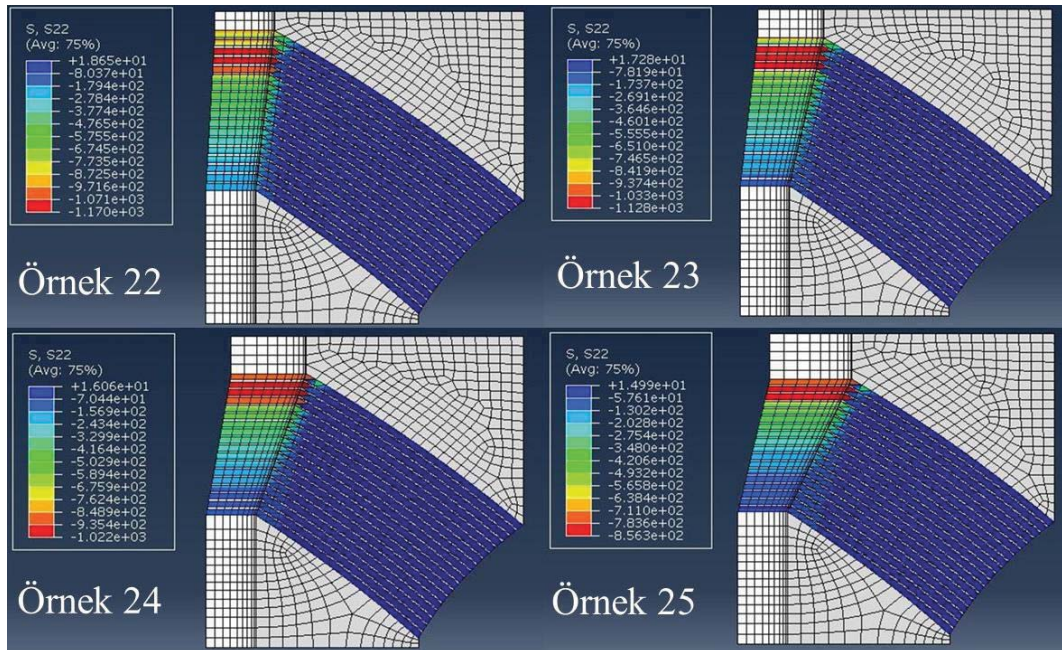
Şekil 3.22. Örnek 22-25 genleme dağılımı.

Şekil 3.20'da görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 6 tabakada gerçekleşmekte çünkü yüzey alanı azalmaktadır (Eşitlik (2.10)) ve delik koniklik açısının artmasıyla

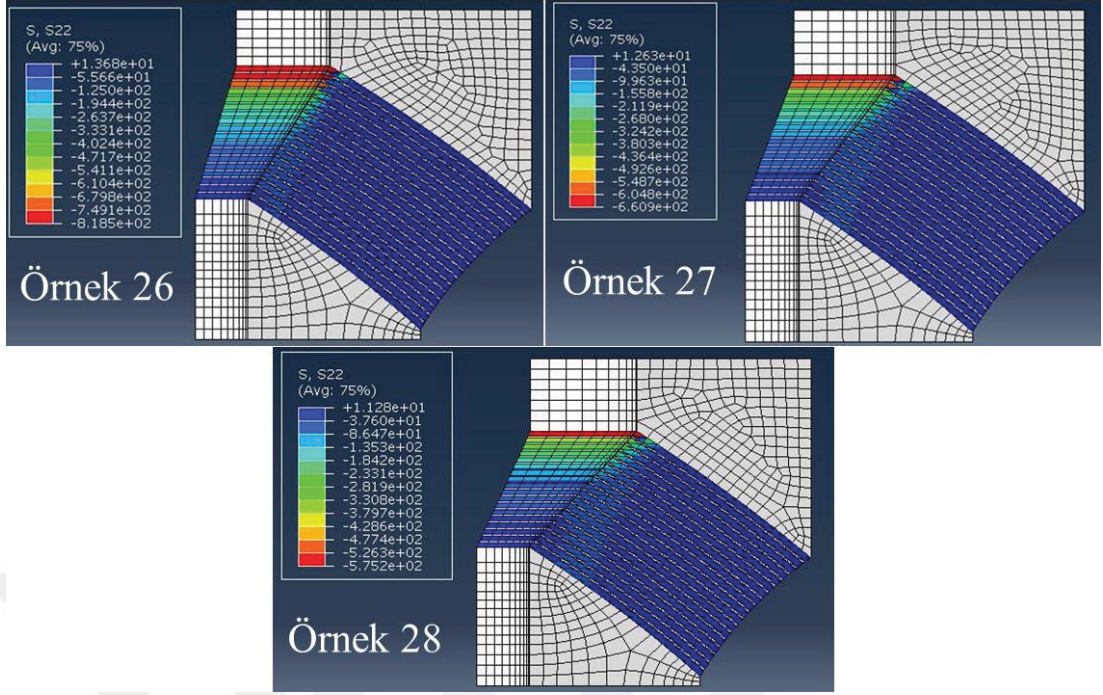
maksimum gerilmeler azalmaktadır çünkü ϕ_1 azalmaktadır (Eşitlik (2.9) ve Eşitlik (2.10)). Şekilden de anlaşıldığı gibi silindirik delik kullanıldığında oluşan yüksek gerilmelerden yatağın ömrü azalacaktır. Bu yüzden konik delik kullanmak daha avantajlıdır.



Şekil 3.23. Örnek 26-28 genleme dağılımı.



Şekil 3.24. Örnek 22-25 gerilme dağılımı.



Şekil 3.25. Örnek 26-28 gerilme dağılımı.

3.5. Elastomer Tabaka Kalınlığının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4 ve 4,5 mm elastomer tabaka kalınlığına sahip elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu farklı dizaynların geometrik parametreleri Tablo 3.5’de, gerilme dağılımı Şekil 3.30, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’de, gerilme genleme grafiği Şekil 3.31’de ve genleme dağılımları Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de görülmektedir.

Şekil 3.30’nın yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1000 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

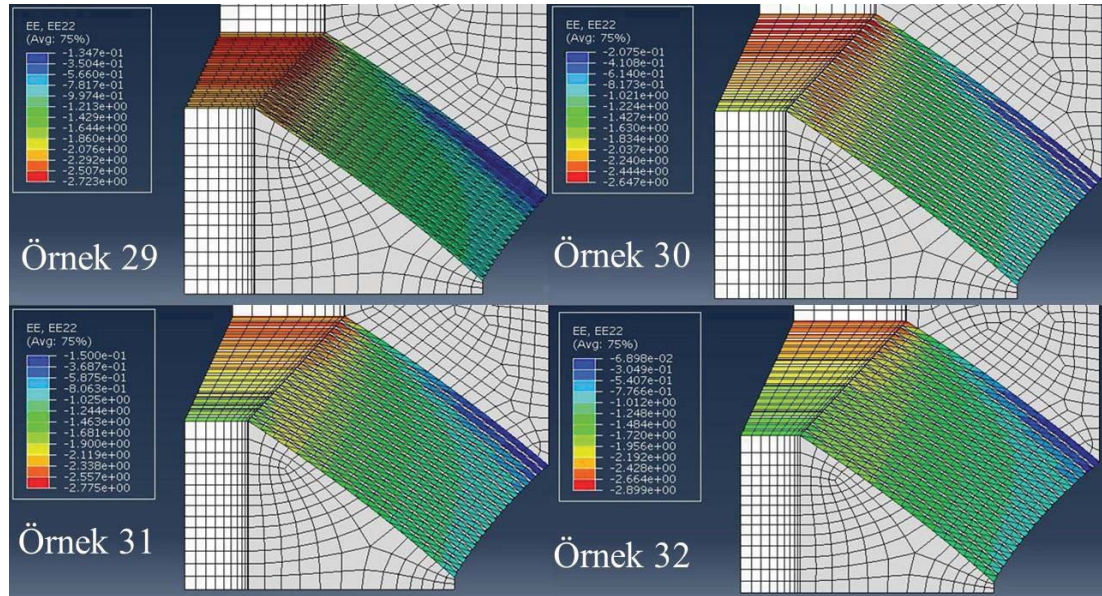
Şekil 3.31’nin yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1000 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.26’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

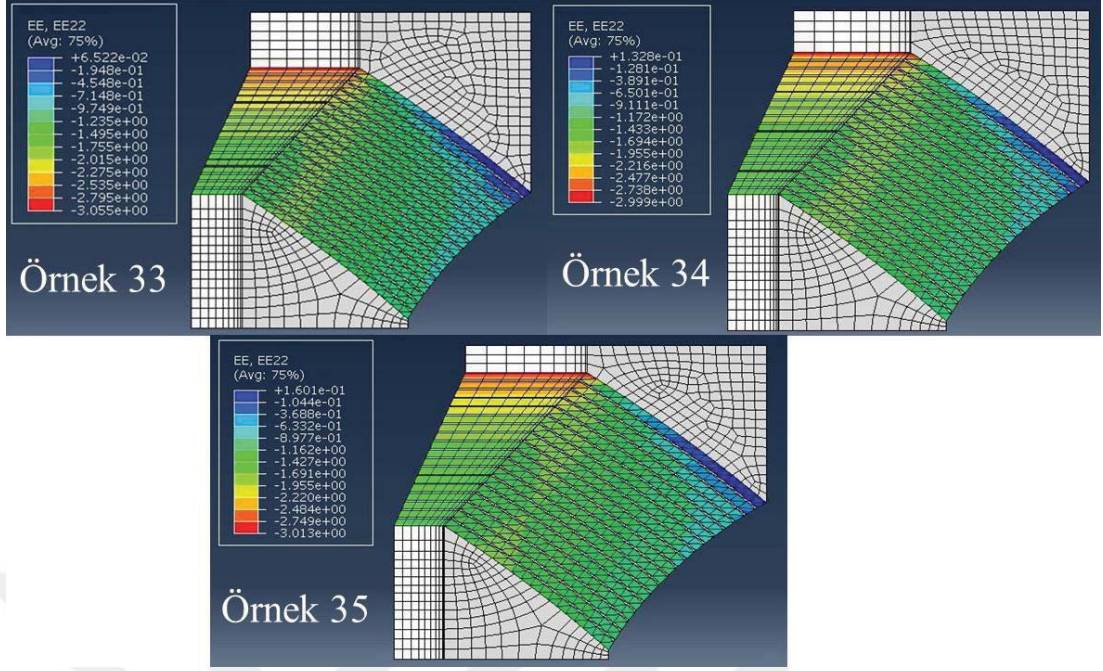
Tablo 3.5. Örnek 28-35'in geometrik parametreleri.

	Örnek 28	Örnek 29	Örnek 30	Örnek 31	Örnek 32	Örnek 33	Örnek 34	Örnek 35
a (mm)	605,5	587,5	592	596,5	601	610	614,5	619
β_0 (°)	44,18	44,49	44,4	44,32	44,25	44,11	44,06	44,01
β_1 (°)	40,15	40,31	40,27	40,23	40,19	40,11	40,07	40,04
β_2 (°)	48,51	49	48,86	48,73	48,61	48,41	48,33	48,26
φ_1 (°)	11,27	12,99	12,47	12,04	11,6	10,76	10,35	10,03
φ_p (°)	39,87	40,16	40,08	40,01	39,94	39,8	39,73	39,67
D _{son} (mm)	293,9	246,86	257,78	269,28	281,32	307,04	320,7	334,92
n _e	18	18	18	18	18	18	18	18
d _{son} (mm)	80	120,32	130,68	141,06	151,42	172,14	182,5	192,86
α (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
β (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
R (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
H (mm)	3	1	1,5	2	2,5	3,5	4	4,5

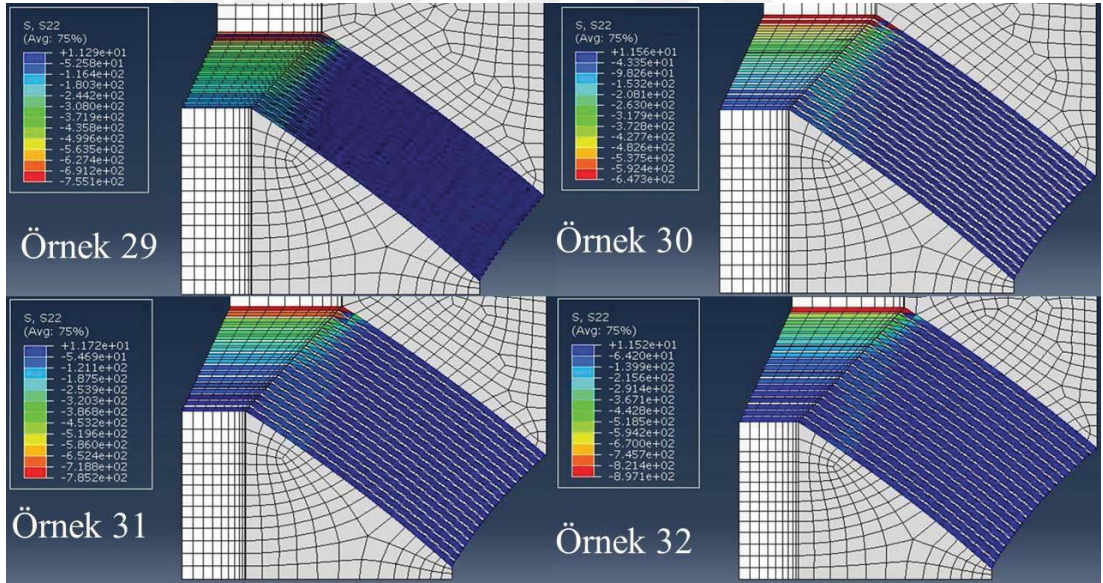
Şekil 3.27'te tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.



Şekil 3.26. Örnek 29-32 genleme dağılımı.



Şekil 3.27. Örnek 33-35 genleme dağılımı.

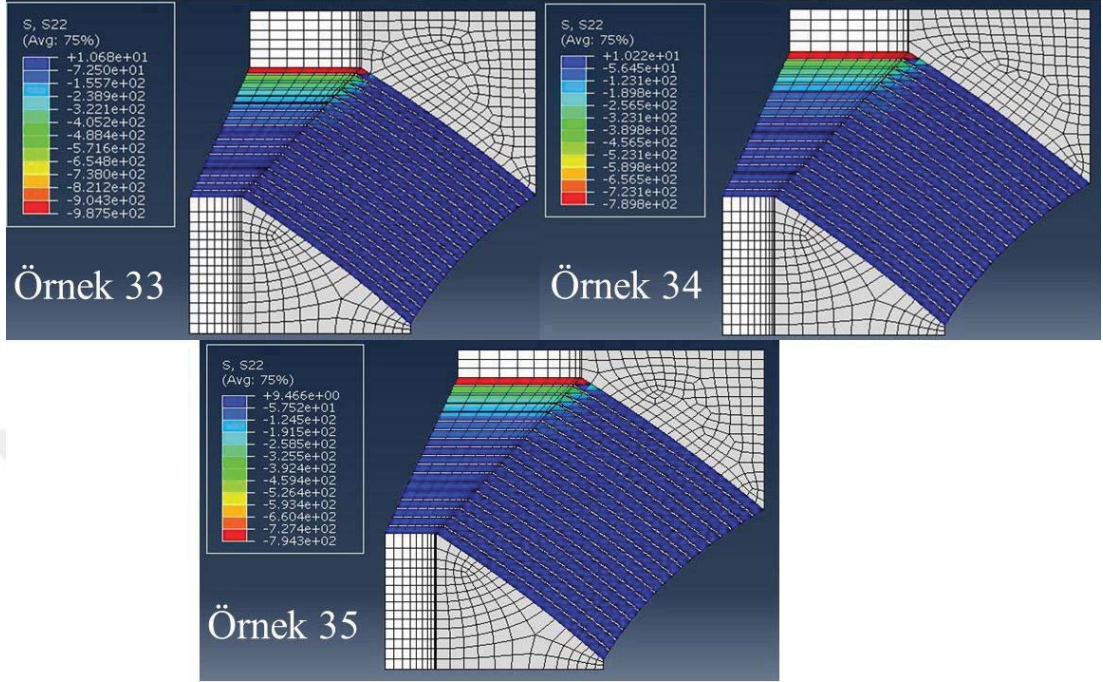


Şekil 3.28. Örnek 29-32 gerilme dağılımı.

Şekil 3.28’te tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

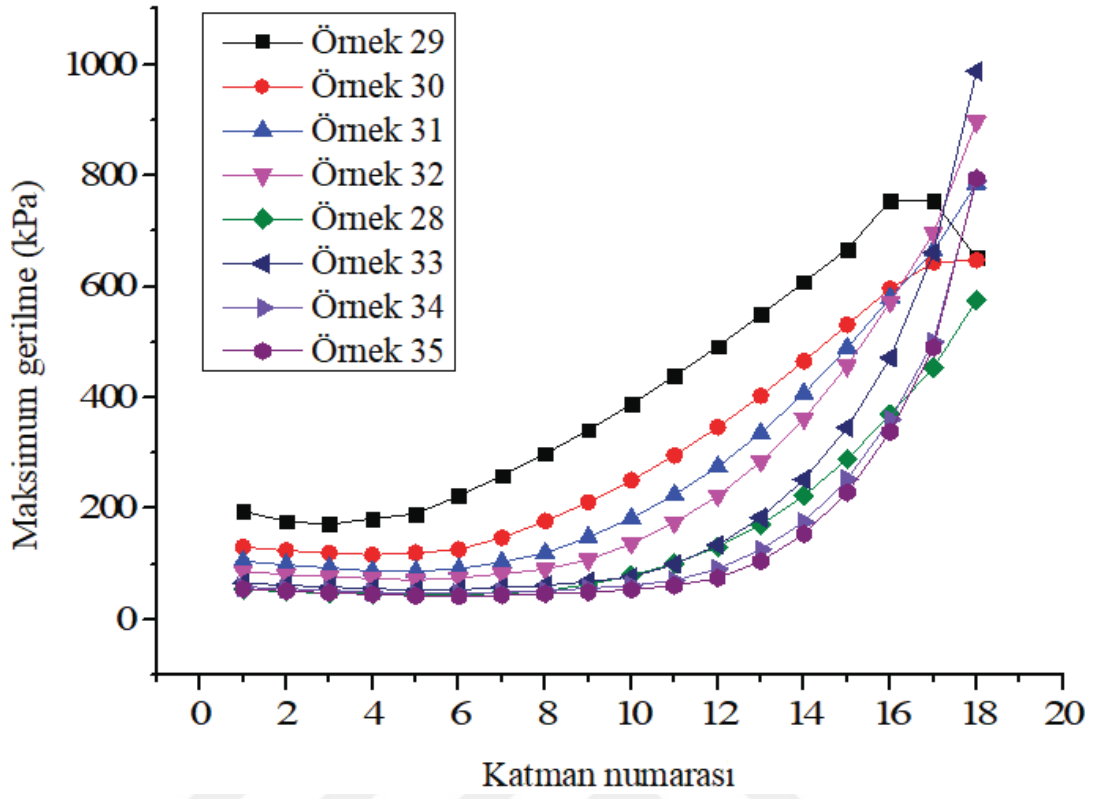
Şekil 3.29’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve

kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

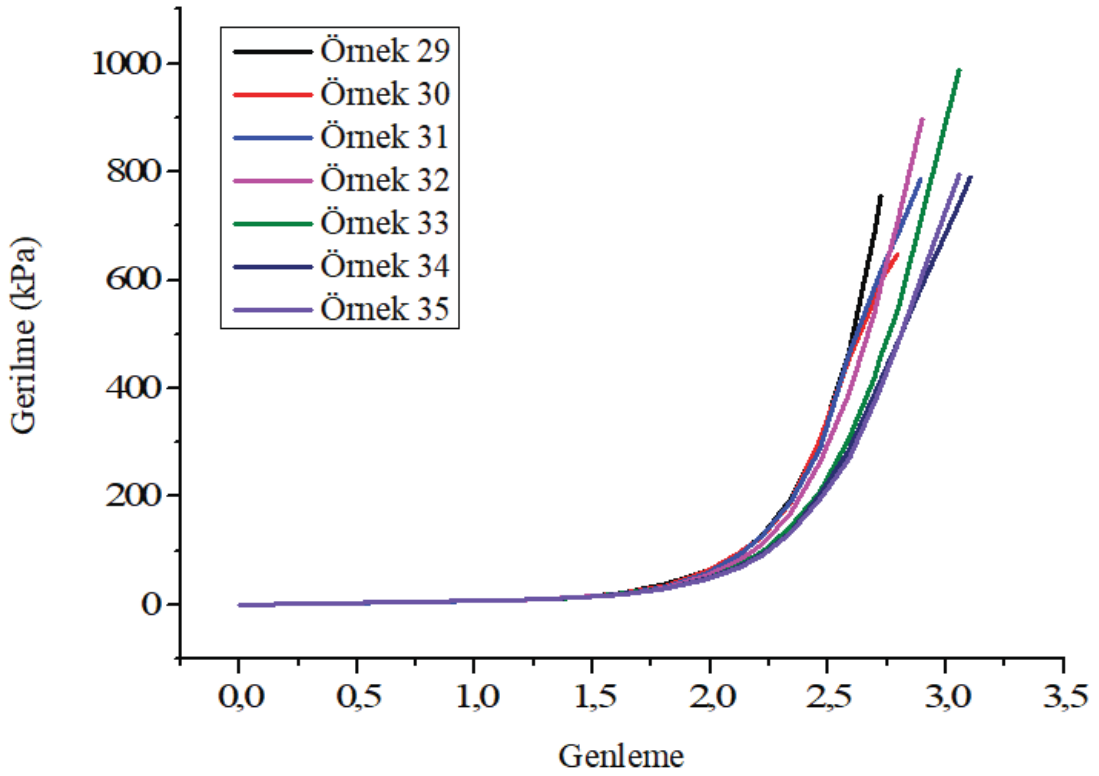


Şekil 3.29. Örnek 33-35 gerilme dağılımı.

Şekil 3.30'da görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 4 tabakada gerçekleşmekte ve elastomer tabaka kalınlığının 3mm'e kadar artmasıyla maksimum gerilmeler azalmaktadır, 3mm'den büyük tabaka kalınlıklarında maksimum gerilmeler tekrar artmaya başlamaktadır. Çünkü Eşitlik (2.9) ve Eşitlik (2.10)'da görüldüğü gibi elastomer tabakalarda oluşan gerilme a ile doğru, φ_i ve $(D_i^2-d_i^2)$ ile ters orantılıdır. Şekilden de anlaşıldığı gibi tabaka kalınlığı için optimum değer 3 mm'dir.



Şekil 3.30. Elastomer tabaka kalınlığının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



Şekil 3.31. Elastomer tabaka kalınlığının gerilme-genleme dağılımına etkisi.

3.6. Elastomer Tabaka Sayısının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 ve 21 adet elastomer tabakadan oluşan elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu farklı dizaynların geometrik parametreleri Tablo 3.6'de, gerilme dağılımı Şekil 3.32, Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'da, gerilme genleme grafiği Şekil 3.33'de ve genleme dağılımı Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'da görülmektedir.

Şekil 3.33'un yatay ekseninde 1. tabakadan 21. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-800 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Tablo 3.6. Örnek 28,36-42'nin geometrik parametreleri.

	Örnek 28	Örnek 36	Örnek 37	Örnek 38	Örnek 39	Örnek 40	Örnek 41	Örnek 42
a (mm)	605,5	597,5	599,5	601,5	603,5	607,5	609,5	611,5
β_0 (°)	44,18	44,31	44,28	44,25	44,22	44,16	44,13	44,1
β_1 (°)	40,15	40,22	40,21	40,19	40,17	40,14	40,12	40,1
β_2 (°)	48,51	48,71	48,66	48,61	48,56	48,47	48,43	48,39
φ_1 (°)	11,27	11,98	11,8	11,62	11,44	11,1	10,93	10,75
φ_p (°)	39,87	39,99	39,96	39,93	39,9	39,84	39,81	39,78
D _{son} (mm)	293,9	271,9	277,24	282,68	288,24	299,68	305,54	311,54
n _e	18	14	15	16	17	19	20	21
d _{son} (mm)	80	143,36	147,96	152,56	157,18	166,38	170,98	175,6
α (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
β (°)	35	35	35	35	35	35	35	35
R (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
H (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3

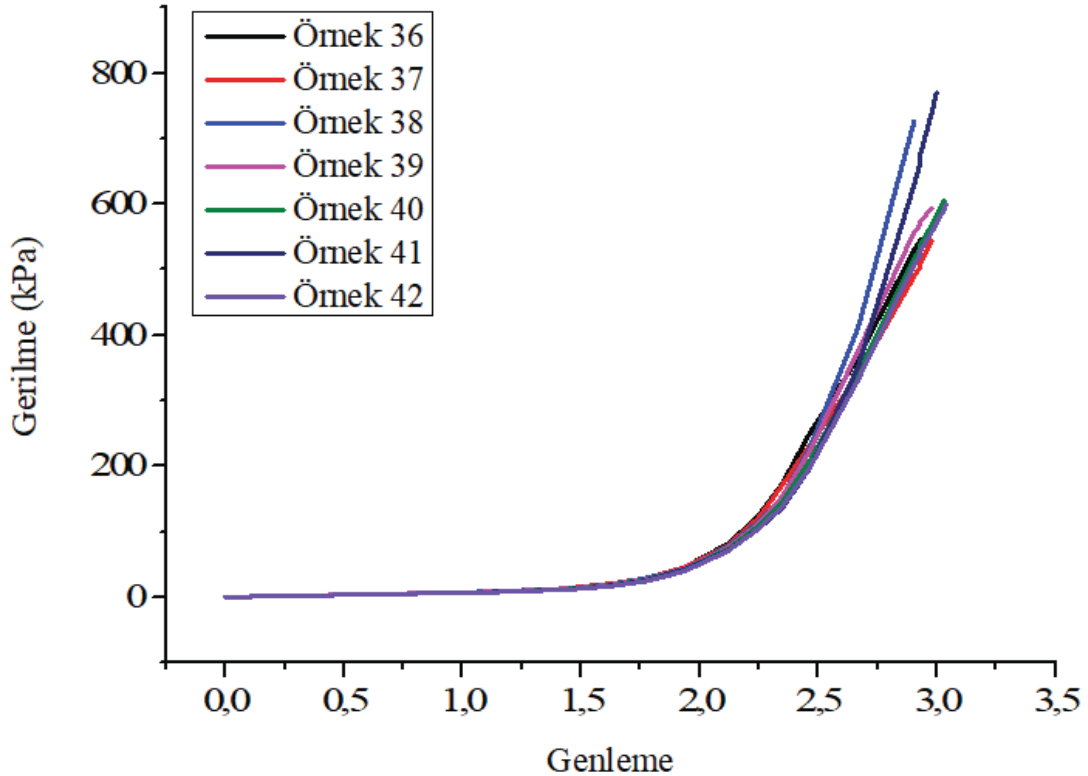
Şekil 3.32'in yatay ekseninde 0-3,5 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-800 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.34’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

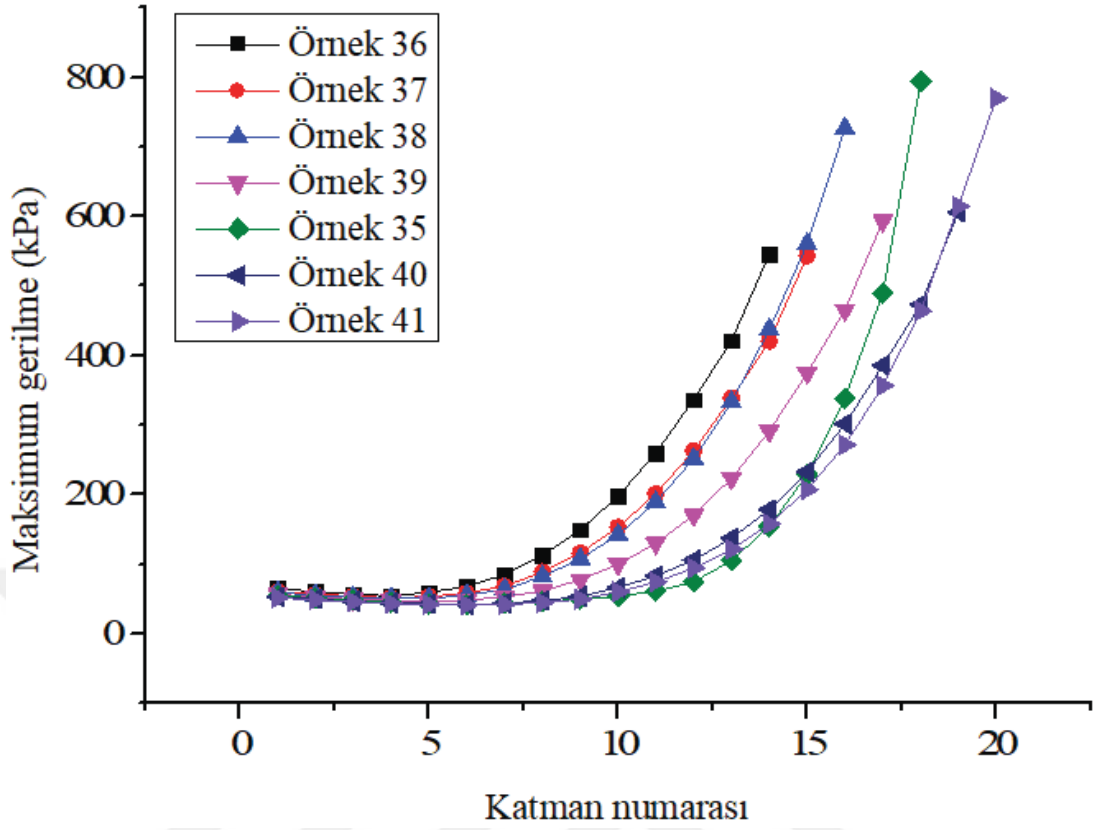
Şekil 3.35’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma olduğu görülmektedir. Yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça renk kırmızılaşmaktadır.

Şekil 3.36’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

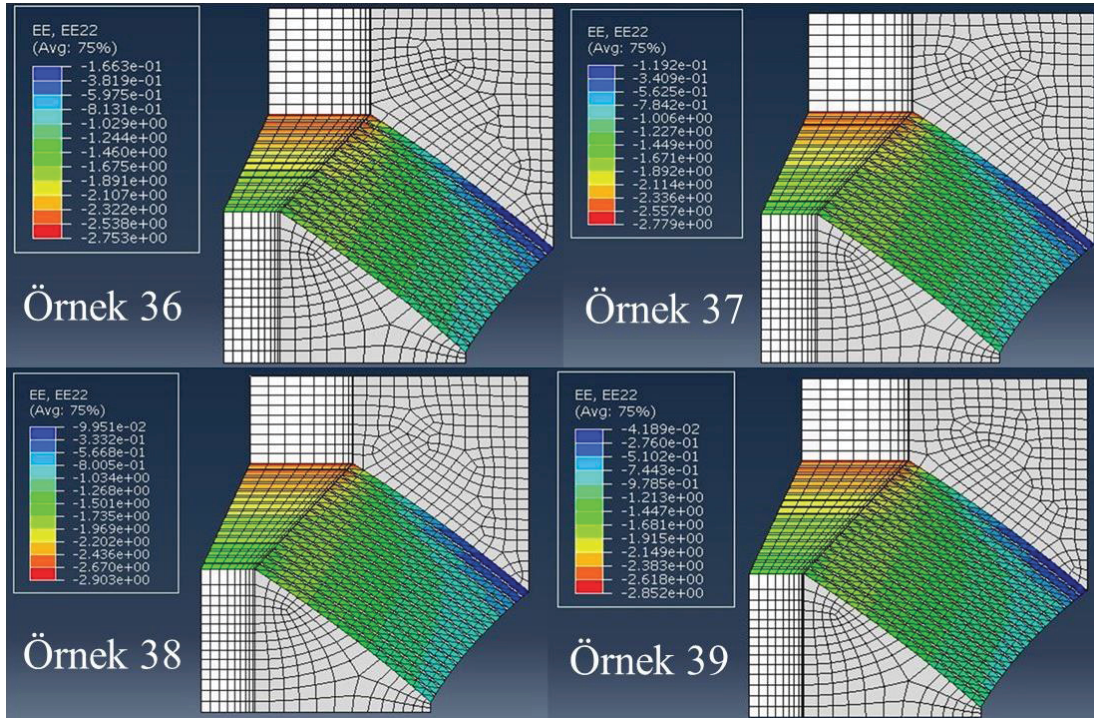
Şekil 3.37’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi ile gösterilen kısımlarda basma gerilmesi olduğu görülmektedir. Açık mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.



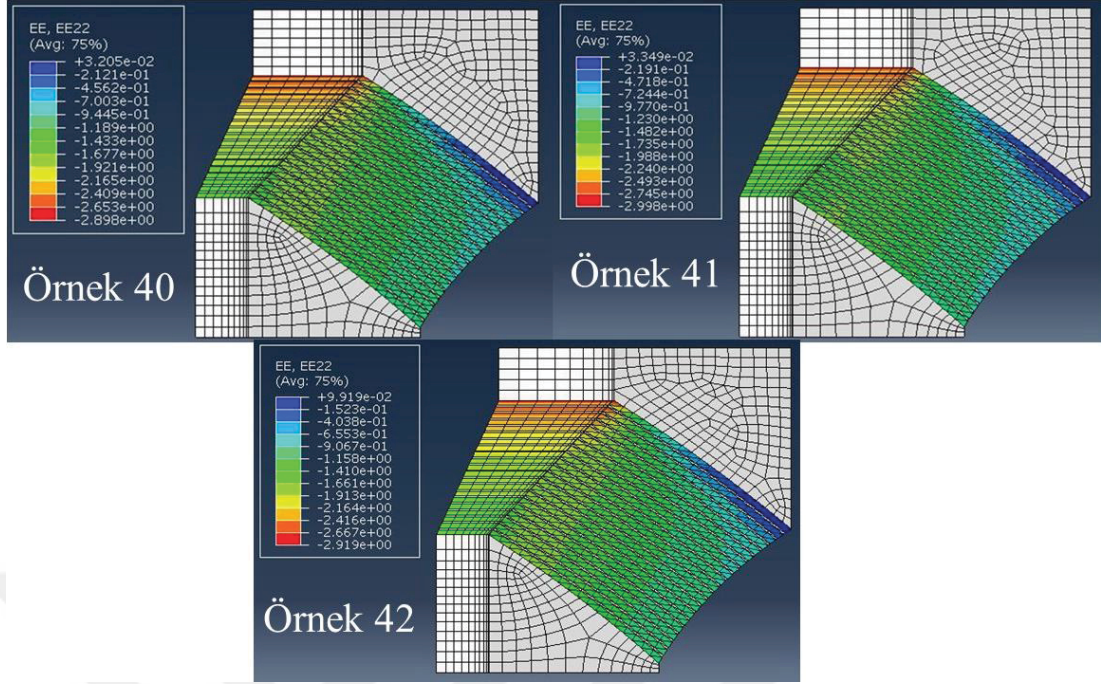
Şekil 3.32. Elastomer tabaka sayısının gerilme-genleme dağılımına etkisi



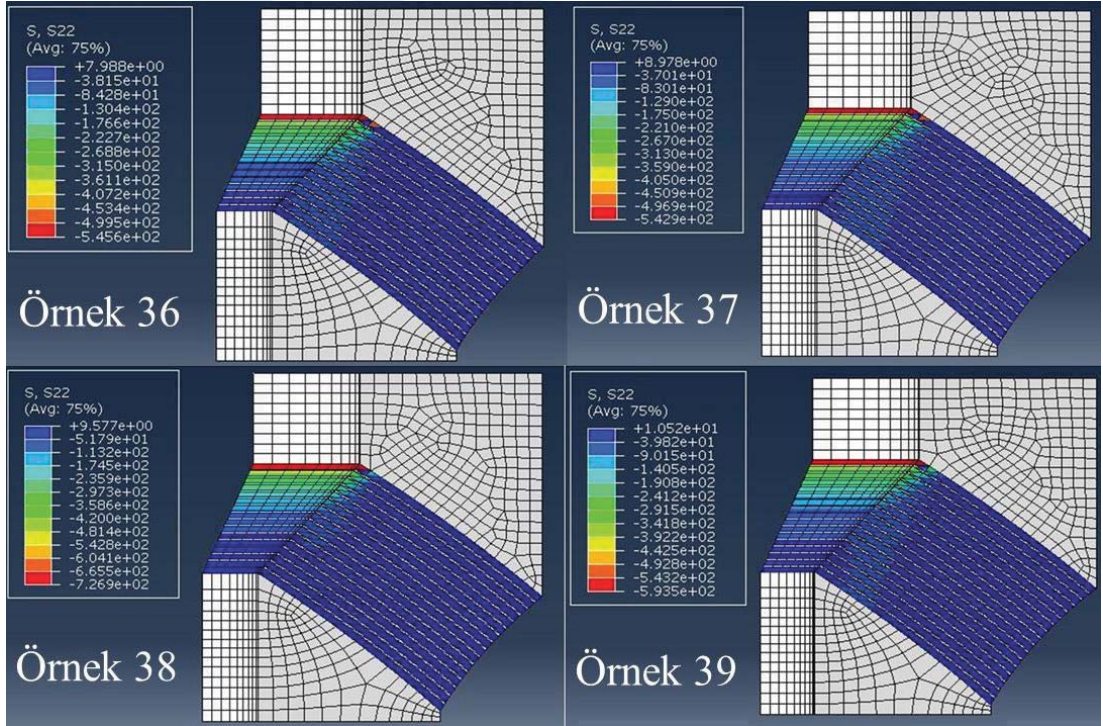
Şekil 3.33. Elastomer tabaka sayısının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



Şekil 3.34. Örnekleme 36-39 genleme dağılımı.



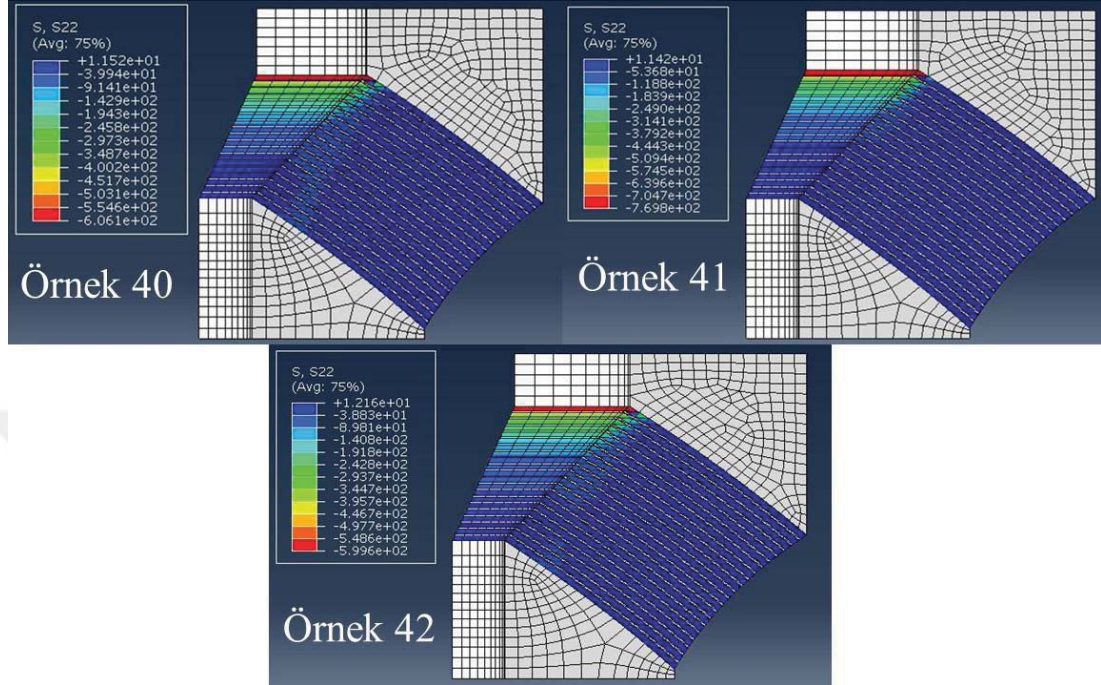
Şekil 3.35. Örnek 40-42 genleme dağılımı.



Şekil 3.36. Örnek 36-39 gerilme dağılımı.

Şekil 3.32’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 3 tabakada gerçekleşmekte ve maksimum gerilmeler tüm elastomer tabakalarda aynıdır. Çünkü elastomer tabakalara

gelen gerilme Eşitlik (2.9) ve Eşitlik (2.10)'dan anlaşıldığı gibi a ile doğru, $(D_i^2-d_i^2)$ ve n_e ile ters orantılıdır.

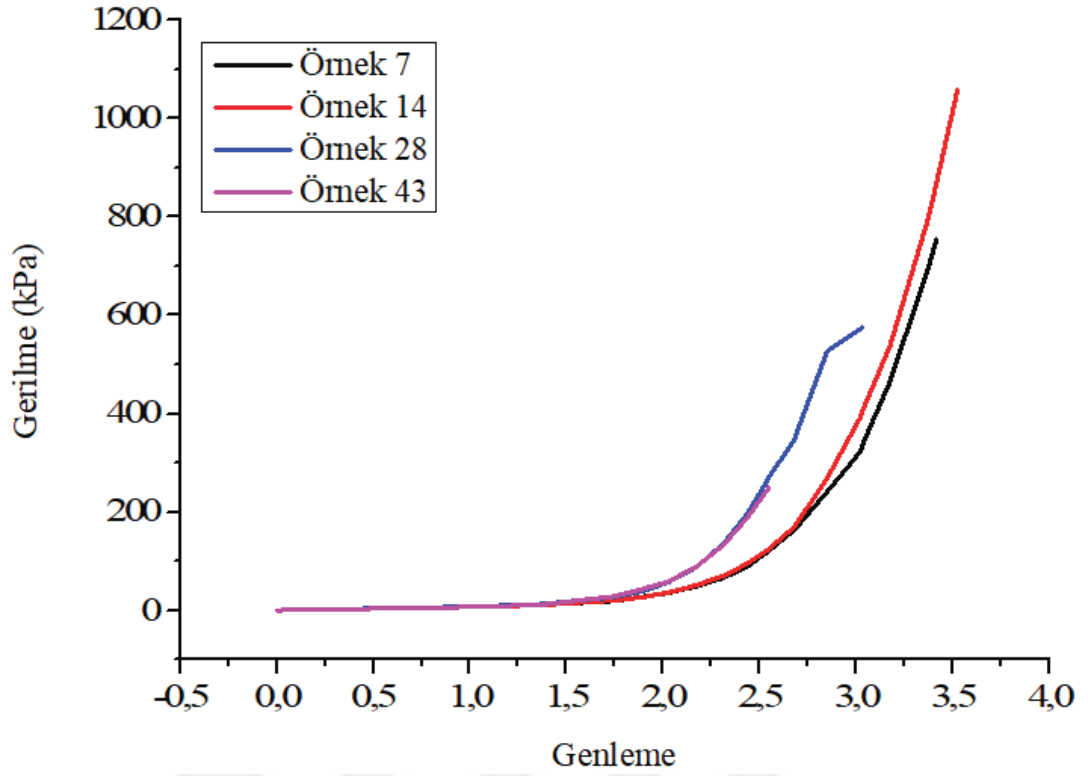


Şekil 3.37. Örnek 40-42 gerilme dağılımı.

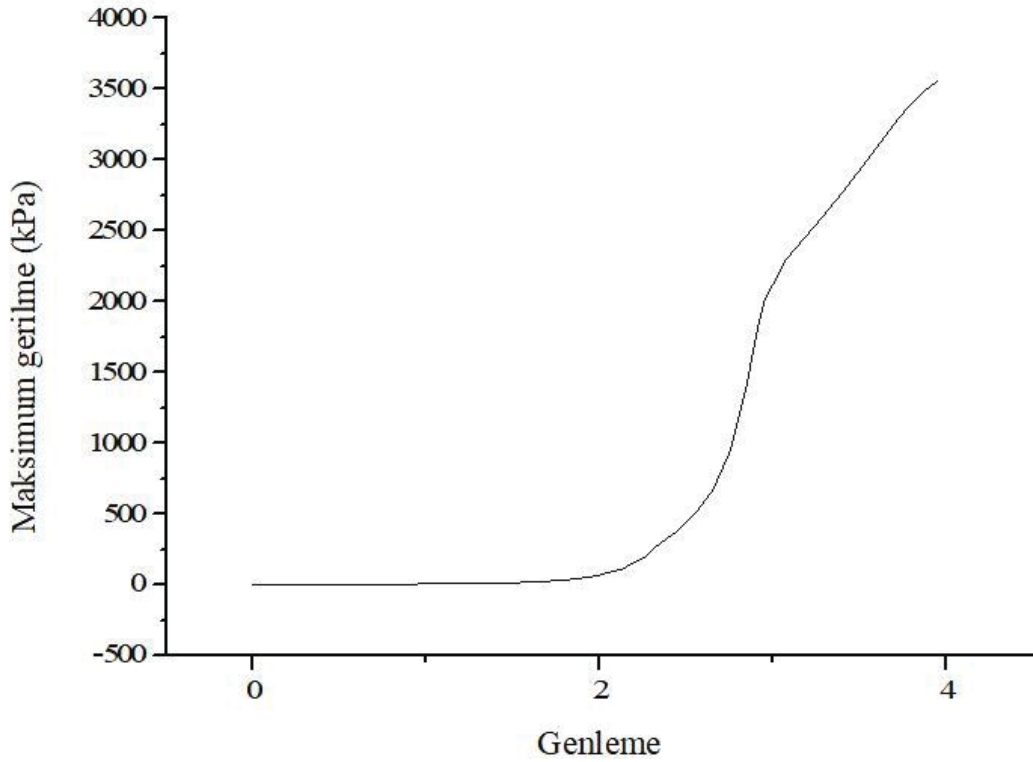
3.7. Küresel Elastomerik Yatak İçin En Uygun Geometrik Parametreler

Her elastomer katmanında düşük gerilme elde etmek için, büyük bir delik çapı (80mm), silindirik ve kavisli olmayan bir dış yüzey, büyük konik delik açısı (35°), 3mm elastomer katman kalınlığı kullanılması gerektiği yapılan çalışmalarda bulunmuştur. Bu geometrik parametreler elde edilen optimum parametrelerdir ve Tablo 3.7'de gösterilmektedir. Elde edilen en düşük gerilmelere (örnek 7, 14, 28), optimum geometrik parametrelere (örnek 43) sahip elastomer yataklarının her bir elastomer tabakaya gelen gerilme dağılımları Şekil 3.41'da, gerilme genleme grafiği Şekil 3.38'de ve gerilme genleme dağılımı Şekil 3.40'de gösterilmektedir.

Şekil 3.40'in sol tarafında tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları sağ tarafında ise tabakalarda oluşan genleme dağılımı görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı renkleri çekme miktarını göstermektedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

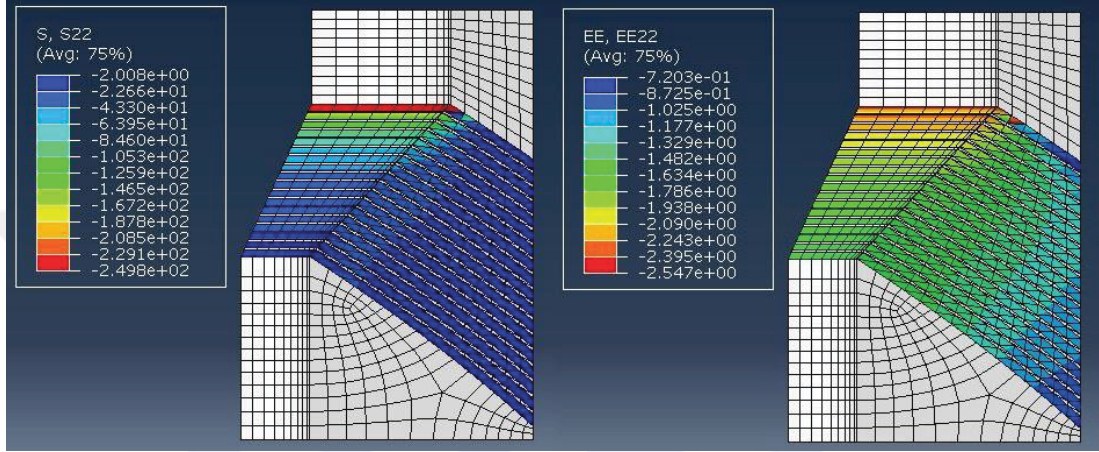


Şekil 3.38. Elde edilen en düşük gerilmelere (örnek 7, 14, 28) ve optimum geometrik parametrelere (örnek 43) sahip elastomer yatakların gerilme-genleme grafiği.

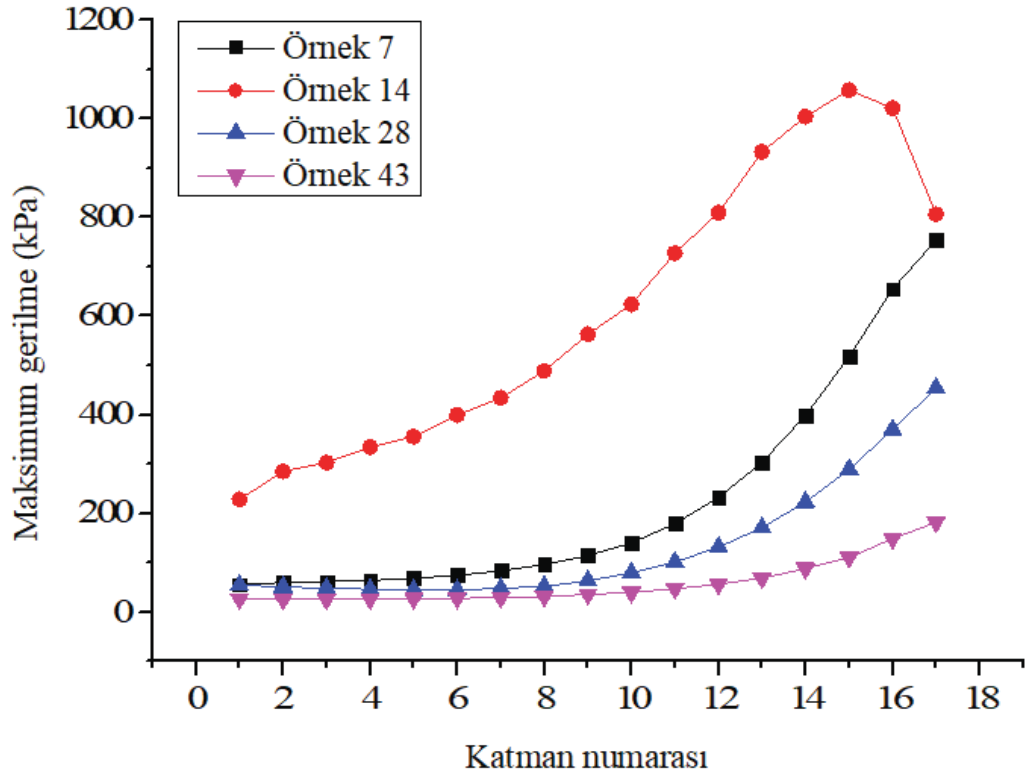


Şekil 3.39. Örnek 43 112 kN basınç yüklemesinde elde edilen gerilme genleme grafiği.

Şekil 3.39’de en düşük gerilmelerin olduğu Örnek 43’e yapılan basınç yüklemesi 112 kN’a kadar arttırıldığında elde edilen gerilme genleme grafiği görülmektedir. 112 kN’dan yüksek basınç yüklemelerinde elastomerik yatakta bozulmalar meydana gelmektedir. Bu grafikte yatay eksen 0-4 arası genleme miktarını, dikey eksen ise 0-4000 kPa arası gerilmeleri göstermektedir. Şekil 3.39’da Callister’in [13] elastomerler için verdiği gerilme genleme grafiğine benzer bir davranış görülmektedir.



Şekil 3.40. Örnek 43 gerilme ve genleme dağılımı.



Şekil 3.41. Elde edilen en düşük gerilmelere (örnek 7, 14, 28) ve optimum geometrik parametrelere (örnek 43) sahip elastomer yatakların gerilme dağılımları.

Şekil 3.41'nin yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Şekil 3.38'ün yatay ekseninde 0-4 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-1200 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Tablo 3.7. Örnek 7,14,28 ve 43 geometrik parametreleri.

	Örnek 7	Örnek 14	Örnek 28	Örnek 43
a (mm)	605,5	605,5	605,5	605,5
β_0 (°)	41,8	43,01	44,18	28,41
β_1 (°)	37,67	37,67	40,15	40,15
β_2 (°)	45,92	48,84	48,51	45,92
φ_t (°)	41,8	27,87	11,27	28,44
φ_p (°)	35,26	35,26	39,87	39,87
D_{son} (mm)	210	293,9	293,9	210
n_e	18	18	18	18
d_{son} (mm)	80	80	161,78	161,78
α (°)	0	0	35	35
β (°)	0	35	35	0
R (mm)	0	0	200	0
H (mm)	3	3	3	3

Şekil 3.41'da görüldüğü gibi, optimum geometrik parametreler kullanıldığında her elastomer katmanda en düşük gerilme elde edilecektir. Çünkü Eşitlik (2.9) ve Eşitlik (2.10)'dan görüldüğü gibi elastomer tabakalara gelen gerilmeler β_0 ile doğru orantılıdır.

3.8. Elastomer Yatağa Uygulanılan Basınç Miktarının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 kN basınç uygulanılan elastomerik yatakların gerilme dağılımı incelendi. Bu farklı yükler altında gerilme genleme grafiği Şekil 3.43, her bir elastomer tabakada oluşan gerilme dağılımları Şekil 3.42, Şekil 3.46 ve Şekil 3.47 ve genleme dağılımları Şekil 3.44 ve Şekil 3.45’de gösterilmiştir.

Şekil 3.42’nin yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-600 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Şekil 3.43’in yatay ekseninde 0-3 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-600 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.44’da tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

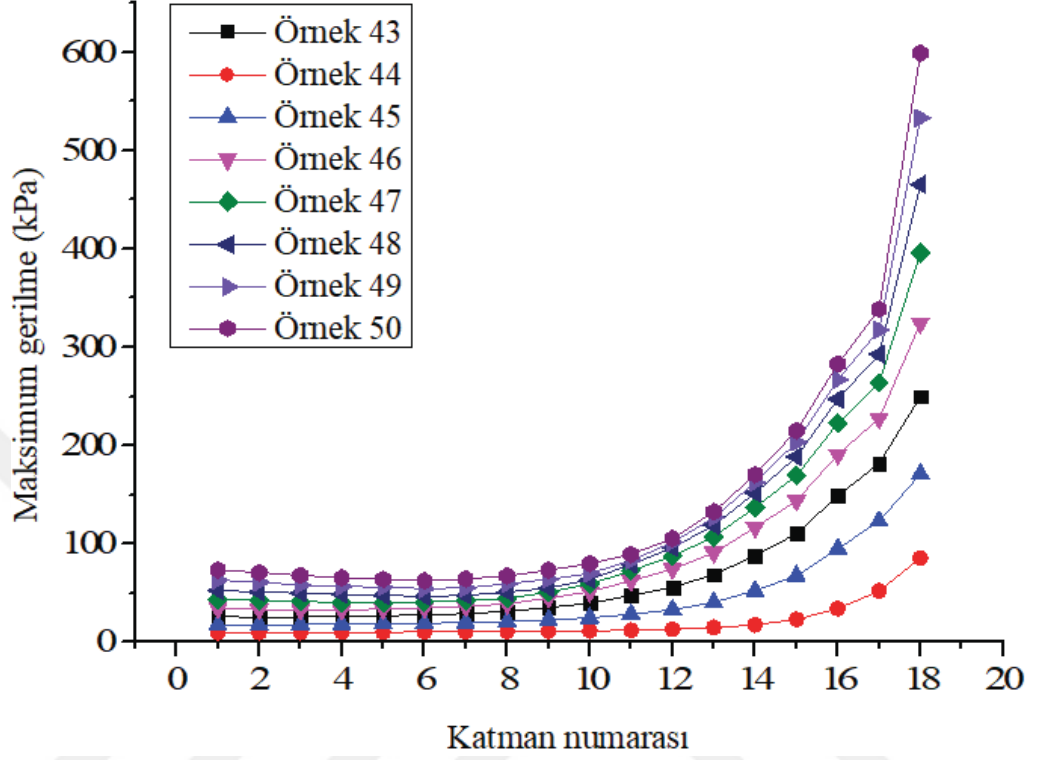
Şekil 3.45’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

Şekil 3.46’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

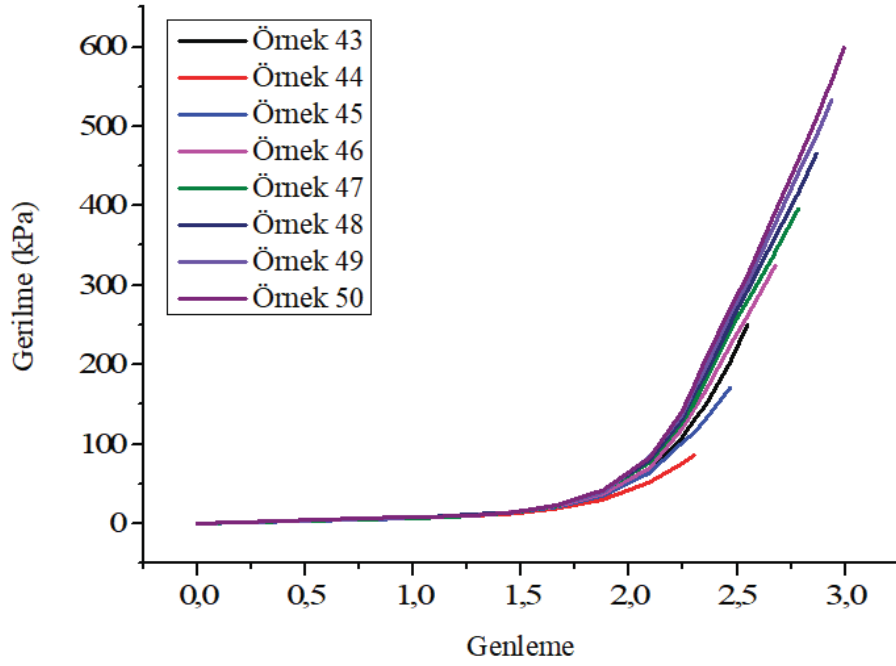
Şekil 3.47’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.

Şekil 3.42’da görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 3 tabakada gerçekleşmekte ve maksimum gerilmeler uygulanan basınç miktarıyla orantılı olarak artmaktadır. Çünkü

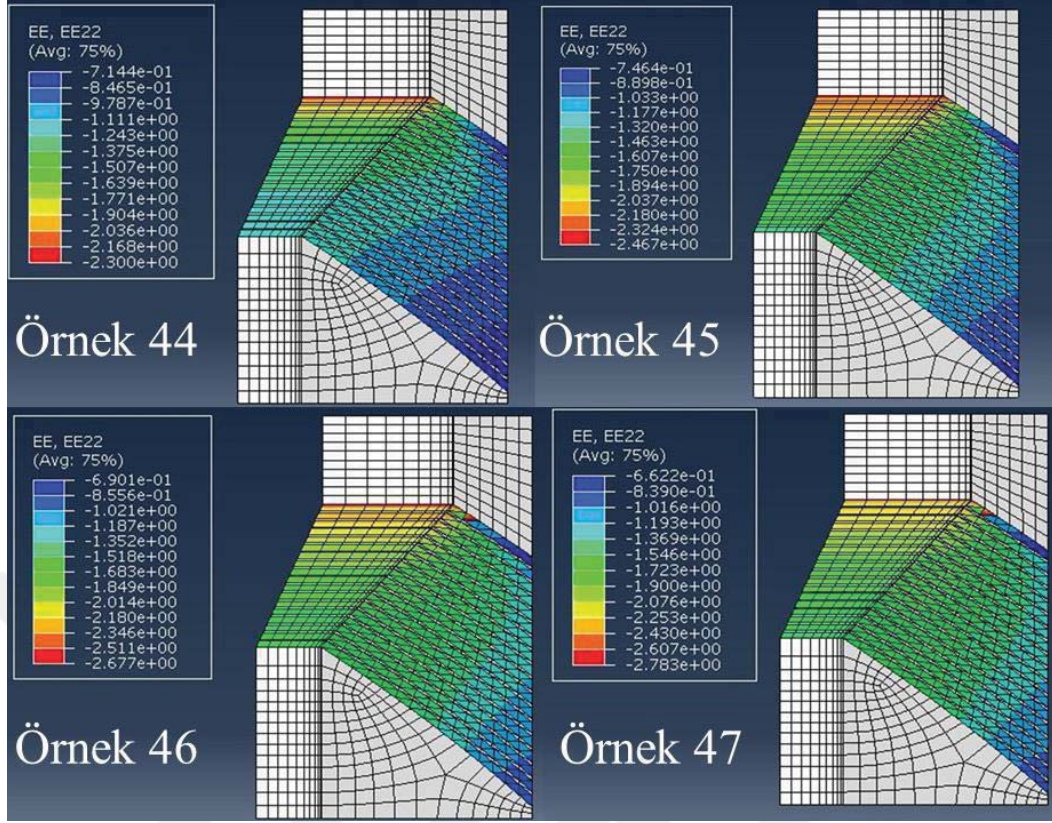
elastomer tabakalara gelen gerilme Eşitlik (2.9)'dan anlaşıldığı gibi uygulanan basınç ile doğru orantılıdır.



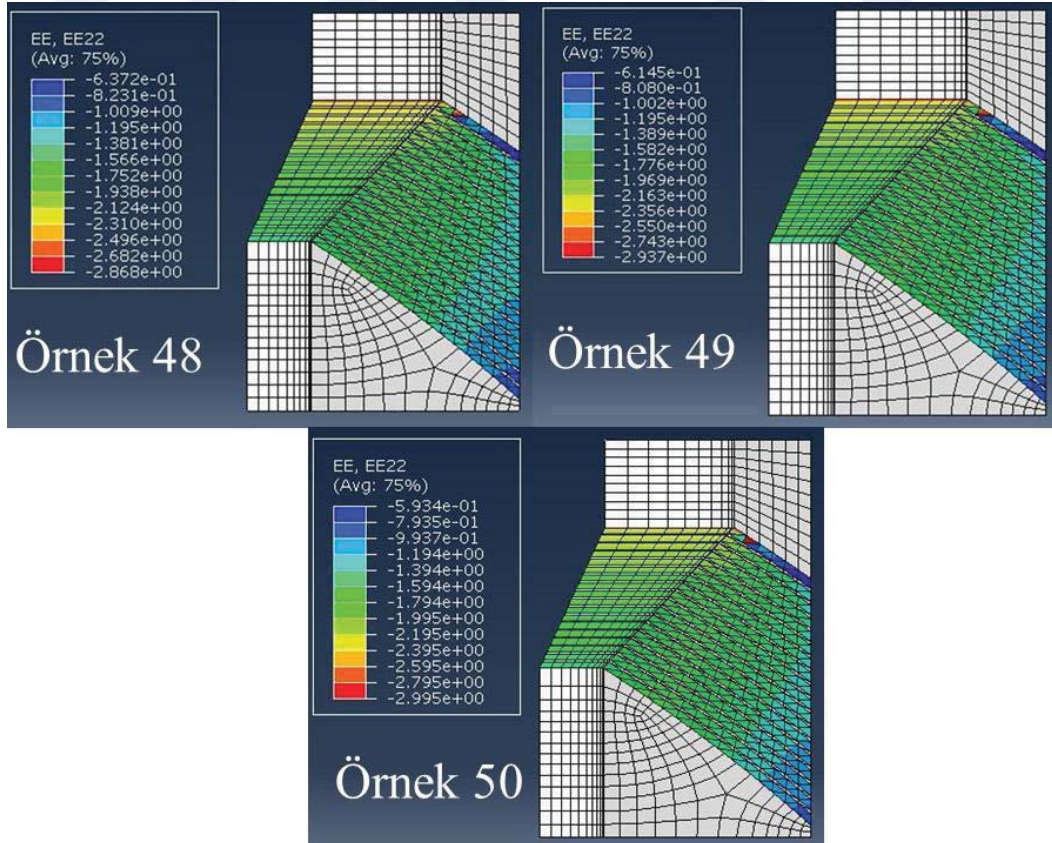
Şekil 3.42. Uygulanılan basınç miktarının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.



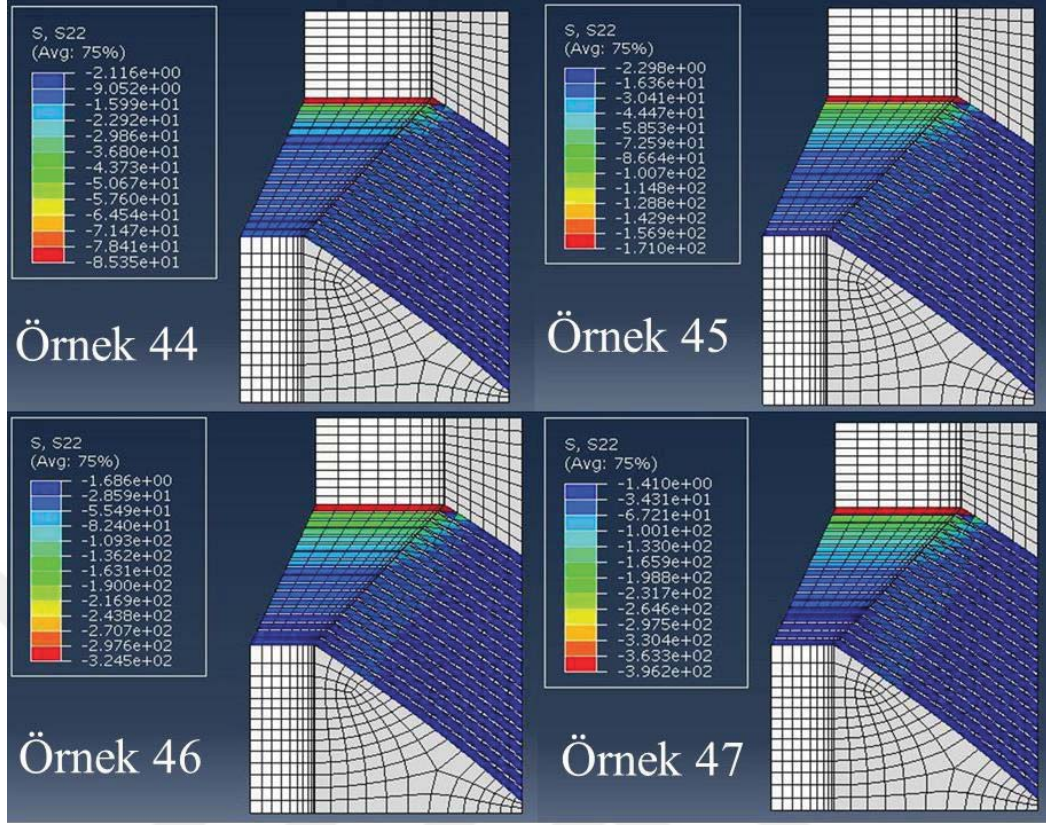
Şekil 3.43. Uygulanılan basınç miktarının gerilme-genleme dağılımına etkisi.



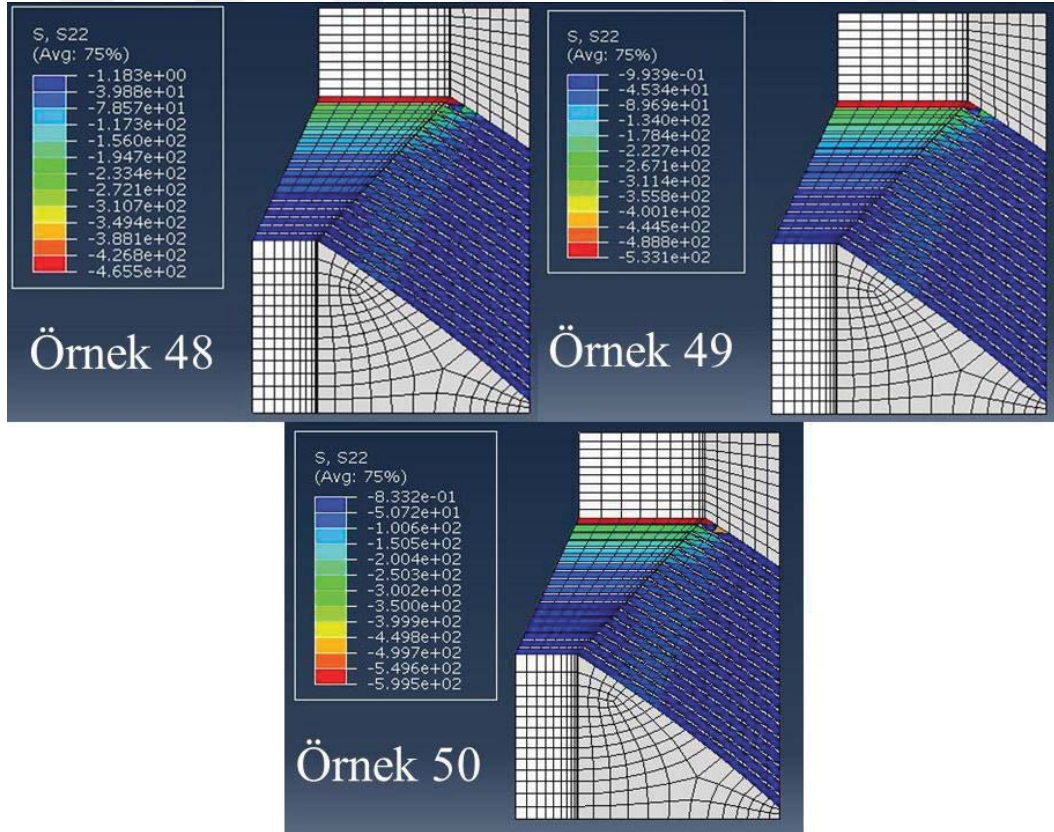
Şekil 3.44. Örnek 44-47 genleme dağılımı.



Şekil 3.45. Örnek 48-50 genleme dağılımı.

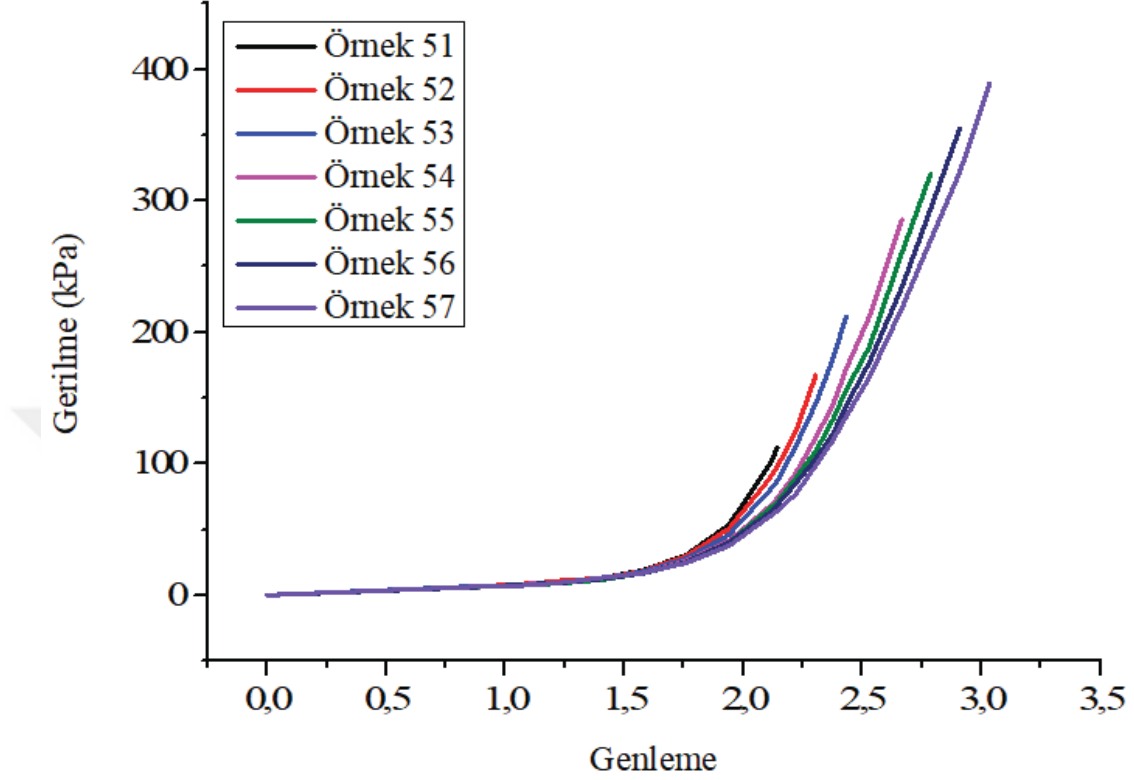


Şekil 3.46. Örnek 44-47 gerilme dağılımı.



Şekil 3.47. Örnek 48-50 gerilme dağılımı.

3.9. Elastomer Yatağa Uygulanılan Açısal Yer Değiştirme Yüklemesinin Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi



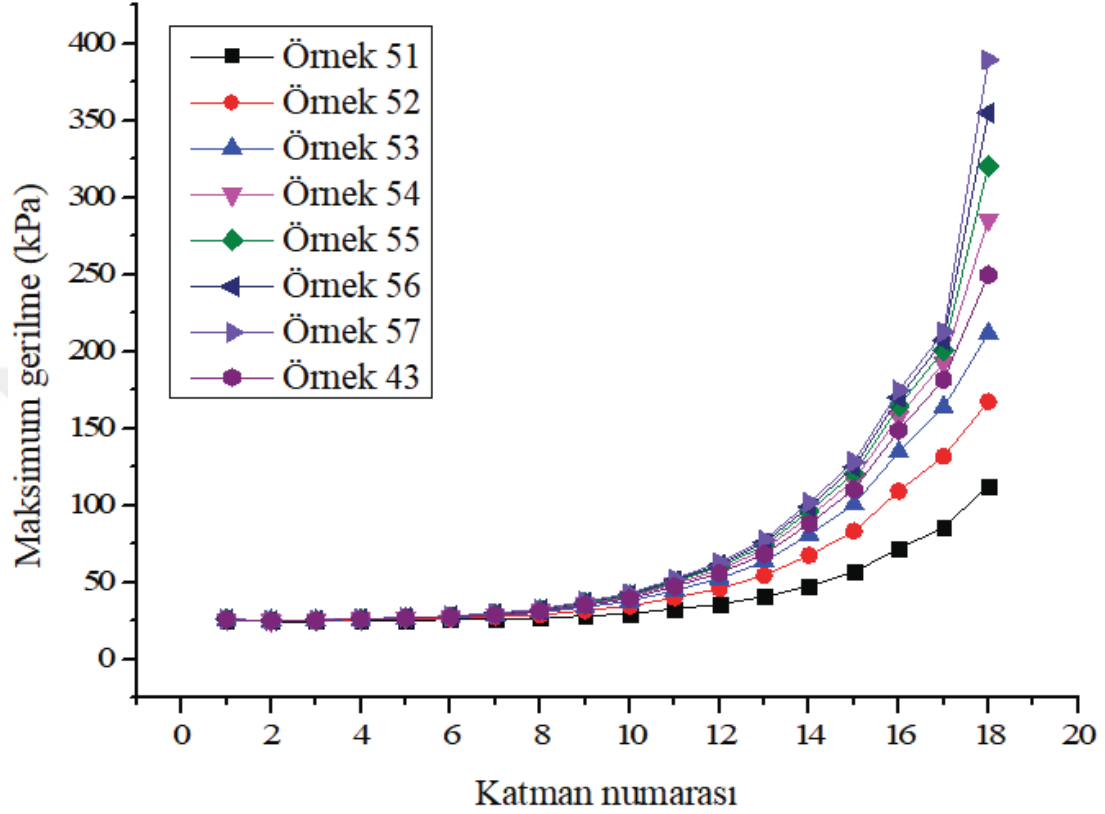
Şekil 3.48. Uygulanılan açısal yer değiştirme yüklemesinin gerilme genleme dağılımına etkisi.

Şekil 3.49'ün yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-400 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

Şekil 3.48'ün yatay ekseninde 0-3,5 arası genlemeler verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-400 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir genleme miktarına karşılık gerilme miktarını göstermektedir.

Şekil 3.52'de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir. Sadece Örnek 54'de mavi olan bölge basma bölgesi, açık mavi, yeşil sarı ve kırmızı basma bölgesidir. Açık maviden kırmızıya doğru renk değişimi çekme gerilmesinin arttığını göstermektedir.

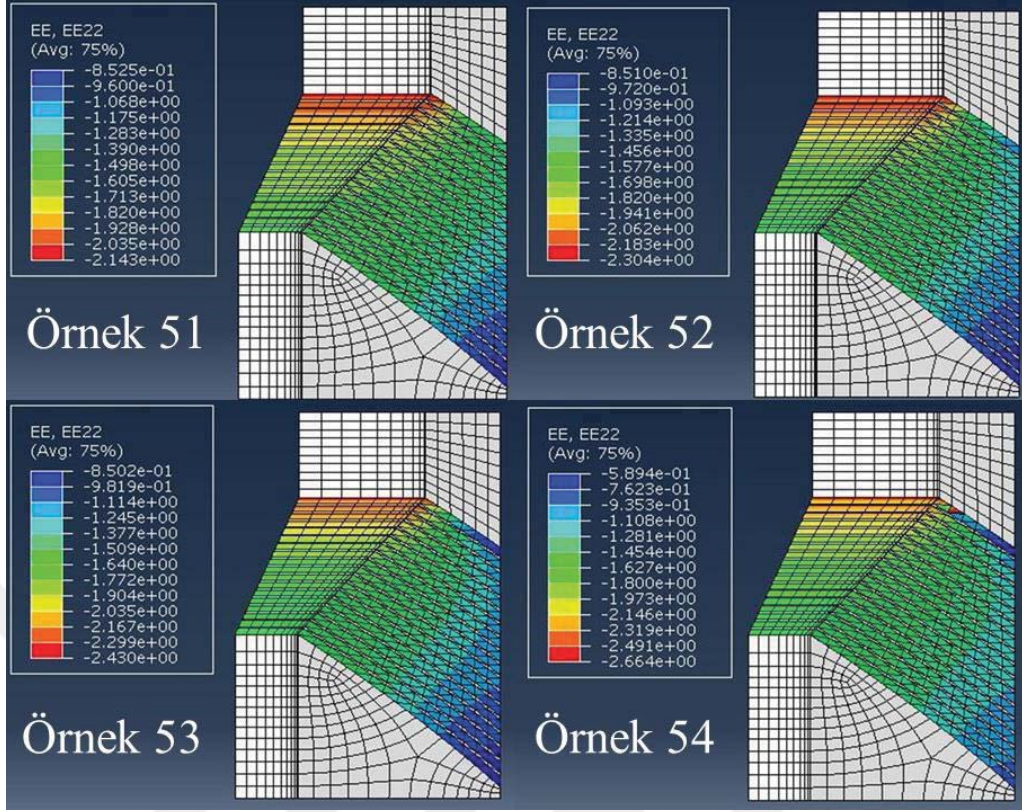
Şekil 3.53’de tabakalarda oluşan gerilmelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme gerilmesi olan bölgelerdir. Çekme miktarı arttıkça renk açık maviden kırmızıya doğru değişmektedir.



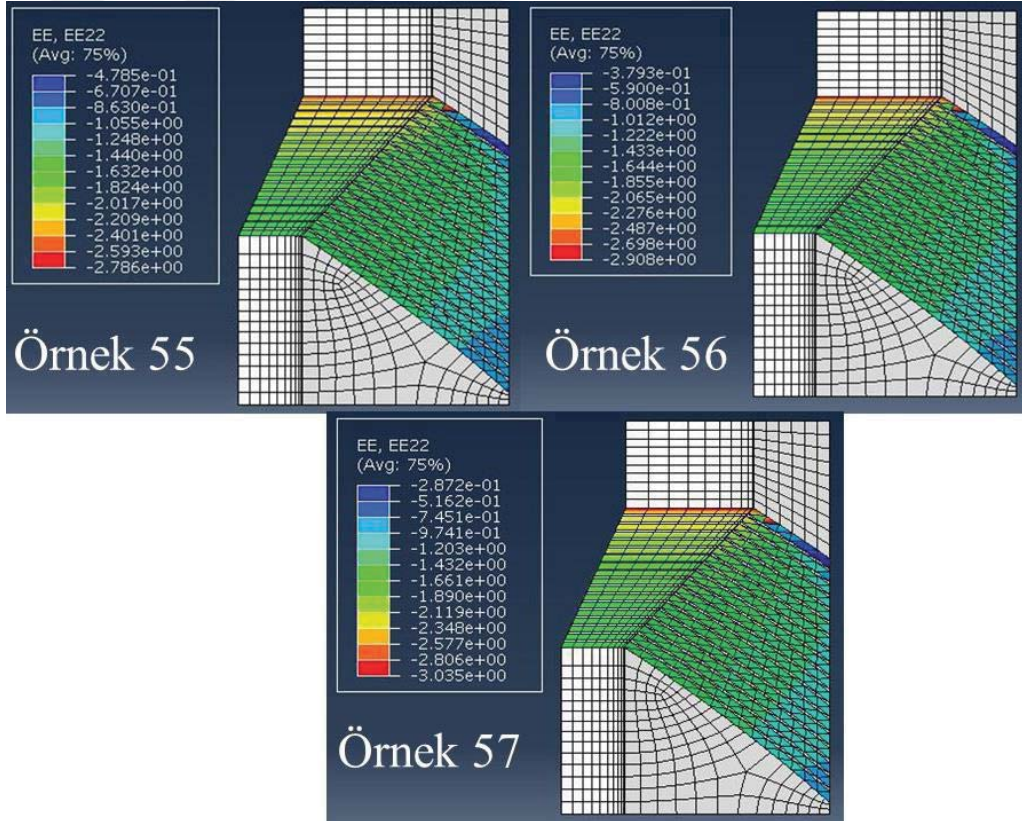
Şekil 3.49. Uygulanılan açısız yer değiştirme yüklemesinin her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.

0,02, 0,07, 0,12, 0,17, 0,22, 0,27, 0,32 ve 0,37 radyan uygulanılan açısız yer değiştirme yüklemesinin elastomerik yatakların gerilme dağılımına etkisi incelendi. Bu farklı açısız yer değiştirme yüklemeleri altında oluşan gerilme genleme grafiği Şekil 3.48, her bir elastomer tabakada oluşan gerilme dağılımları Şekil 3.49, Şekil 3.52 ve Şekil 3.53 ve genleme dağılımları Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’te gösterilmiştir.

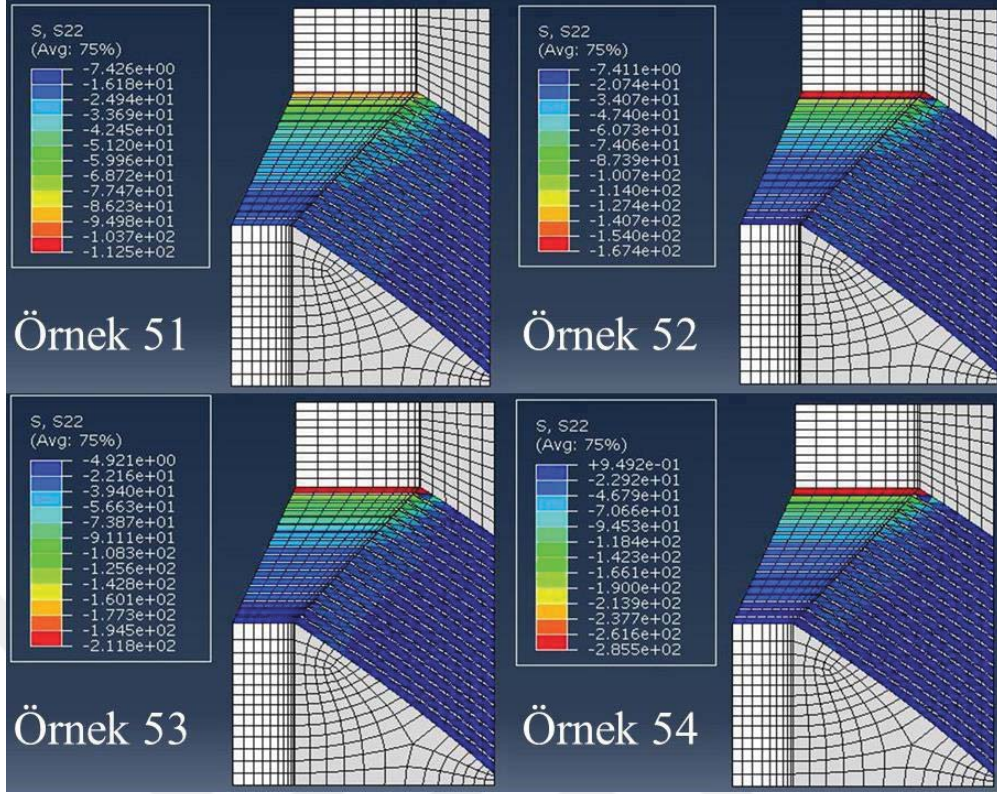
Şekil 3.49’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler son 3 tabakada gerçekleşmekte ve maksimum gerilmeler uygulanan açısız yer değiştirme yüklemesiyle orantılı olarak artmaktadır. Çünkü elastomer tabakalara gelen gerilme Eşitlik (2.9)’dan anlaşıldığı gibi uygulanılan açısız yer değiştirme yüklemesi ile doğru orantılıdır.



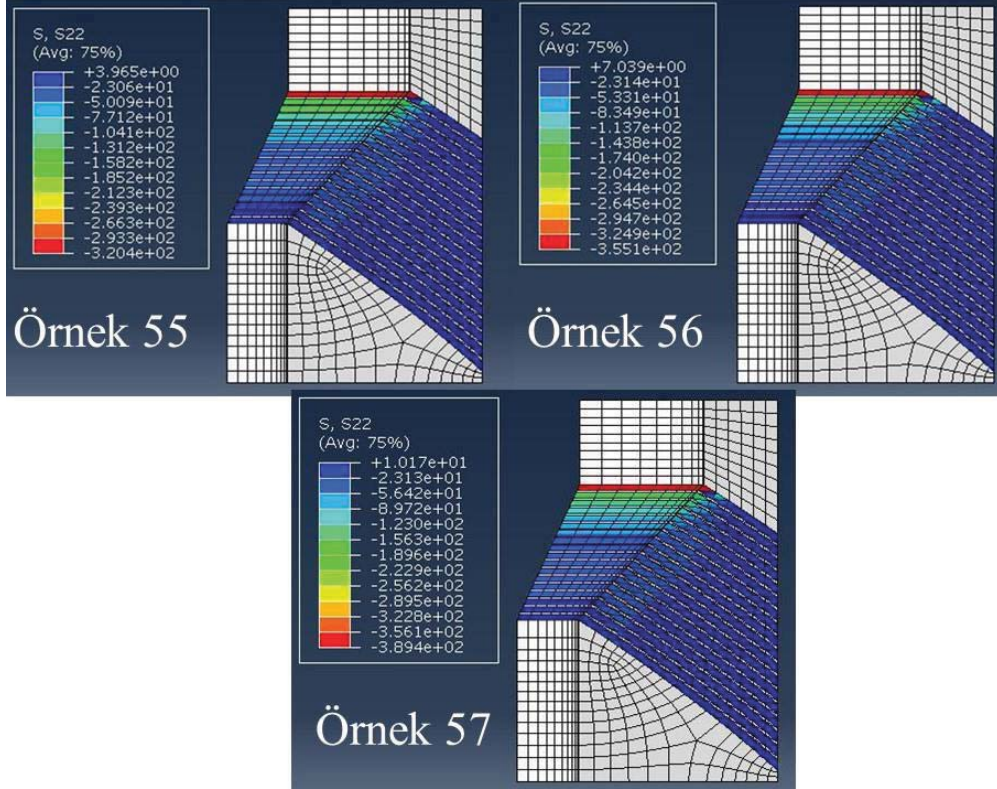
Şekil 3.50. Örnek 51-54 genleme dağılımı.



Şekil 3.51. Örnek 55-57 genleme dağılımı.



Şekil 3.52. Örnek 51-54 gerilme dağılımı.

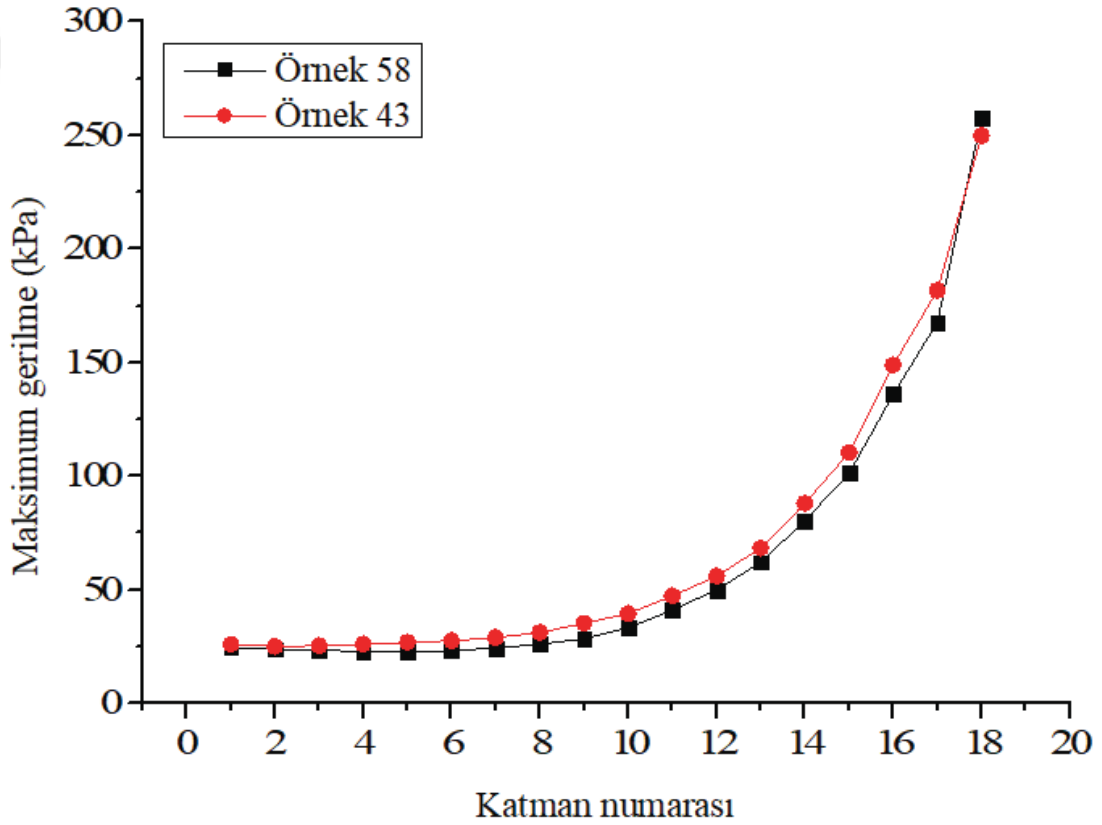


Şekil 3.53. Örnek 55-57 gerilme dağılımı.

Şekil 3.50’de tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

Şekil 3.51’da tabakalarda oluşan genlemelerin dağılımları görülmektedir. Mavi, yeşil, sarı ve kırmızı bölge çekme olan bölgedir. Çekme miktarı arttıkça maviden kırmızıya doğru renk değişmektedir.

3.10. Destek Elemanı Olarak AA7075 Kullanılmasının Gerilme ve Genleme Dağılımına Etkisi

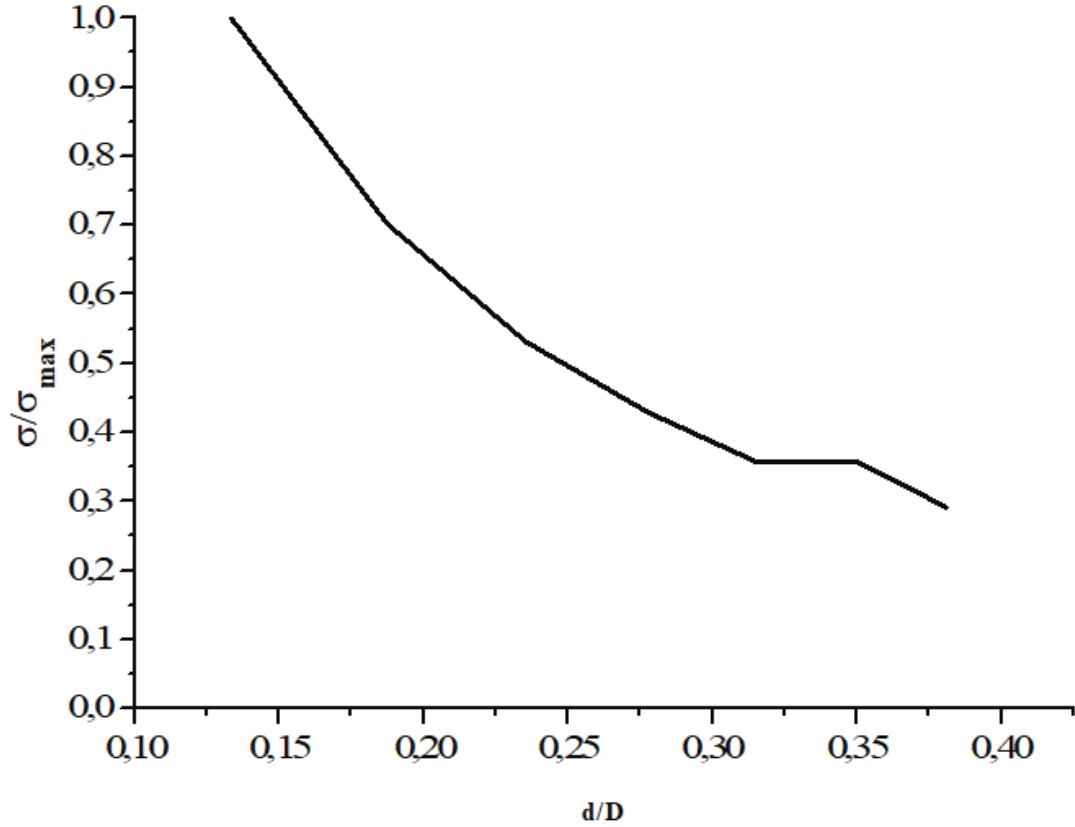


Şekil 3.54. Destek elemanı olarak AA7075 kullanılmasının her bir elastomer tabakadaki gerilme dağılımına etkisi.

Destek elemanı olarak çelik yerine Elastisite modülü 71,7 GPa ve Poisson oranının 0,33 olan AA7075 kullanıldığında elde edilen gerilme dağılımları, önerdiğimiz geometri olan Önek 43 ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.54’de görüldüğü gibi elastomer tabakalara gelen gerilmeler arasında önemli bir fark oluşmamıştır.

Şekil 3.54'un yatay ekseninde 1. tabakadan 18. tabakaya kadar elastomer tabaka numaraları verilmiştir. Dikey ekseninde ise 0-300 kPa arası maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafikte okunan değer her bir elastomer tabakada meydana gelen maksimum gerilmeleri ifade etmektedir.

3.11. Bulguların Değerlendirilmesi ve Tartışılması



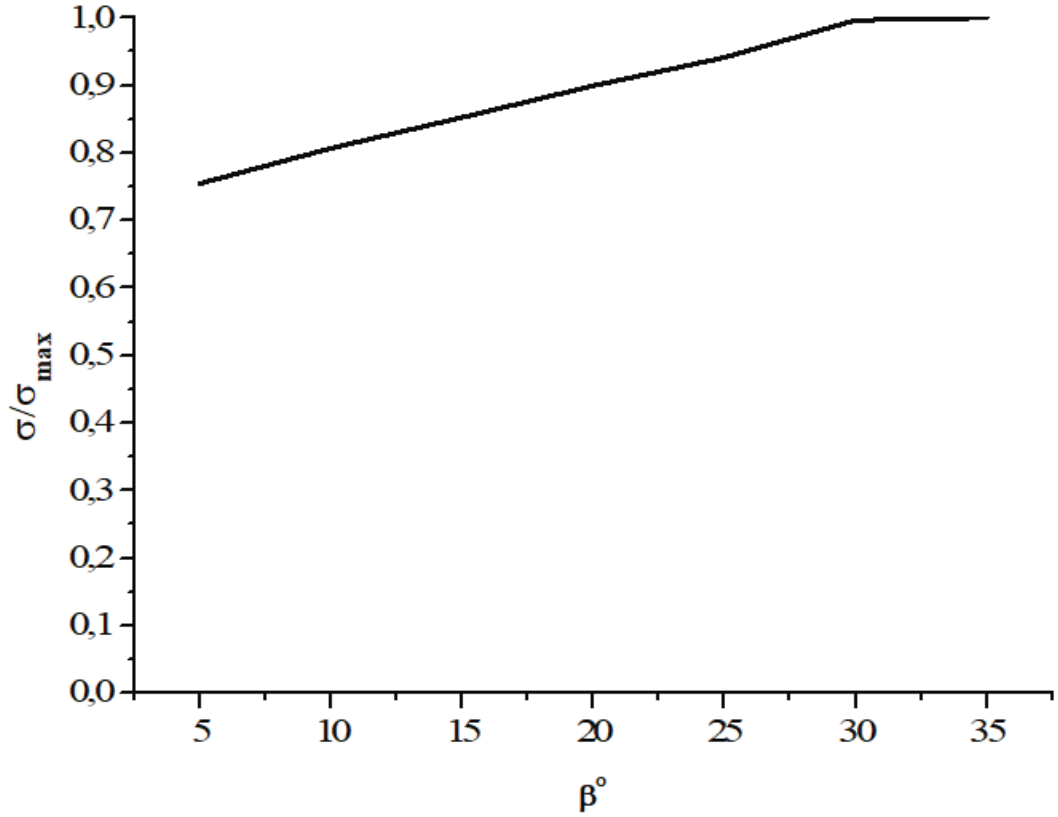
Şekil 3.55. Delik çapı-gerilme ilişkisi

Şekil 3.55'de Elastomer yatak delik çapının dış çapa oranının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağın iç çapının dış çapa oranı verilmiştir.

Elastomer yatağın iç çap, dış çap oranının artmasıyla orantılı olarak tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi bu oranın artmasıyla tabakaların yüzey alanı artmaktadır. Yüzey alanıyla gerilmeler ters orantılı olduğu için bu sonuçlar görülmektedir.

Kelly [64] düzlemsel elastomerik yataklarla ilgili yaptığı teorik çalışmada, iç çap/dış çap oranının artmasıyla maksimum gerilmelerin arttığını göstermiştir. Bu çalışmada Kelly'nin teorik olarak düzlemsel elastomerik yataklarla ilgili yaptığı çalışmanın küresel elastomerik yataklarda da aynı şekilde olduğu sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır. Düzlemsel elastomerik yataklarla küresel elastomerik yataklar birbirlerinden farklı olsa da ikisinde de iç çap, dış çap oranının artması yüzey alanını arttırmakta ve maksimum gerilmeleri düşürmektedir. Yapılan detaylı literatür taramasında küresel elastomerik yatakların iç çapıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiye dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın özgün yönlerinden birisi basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların iç çapıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışma olmasıdır.



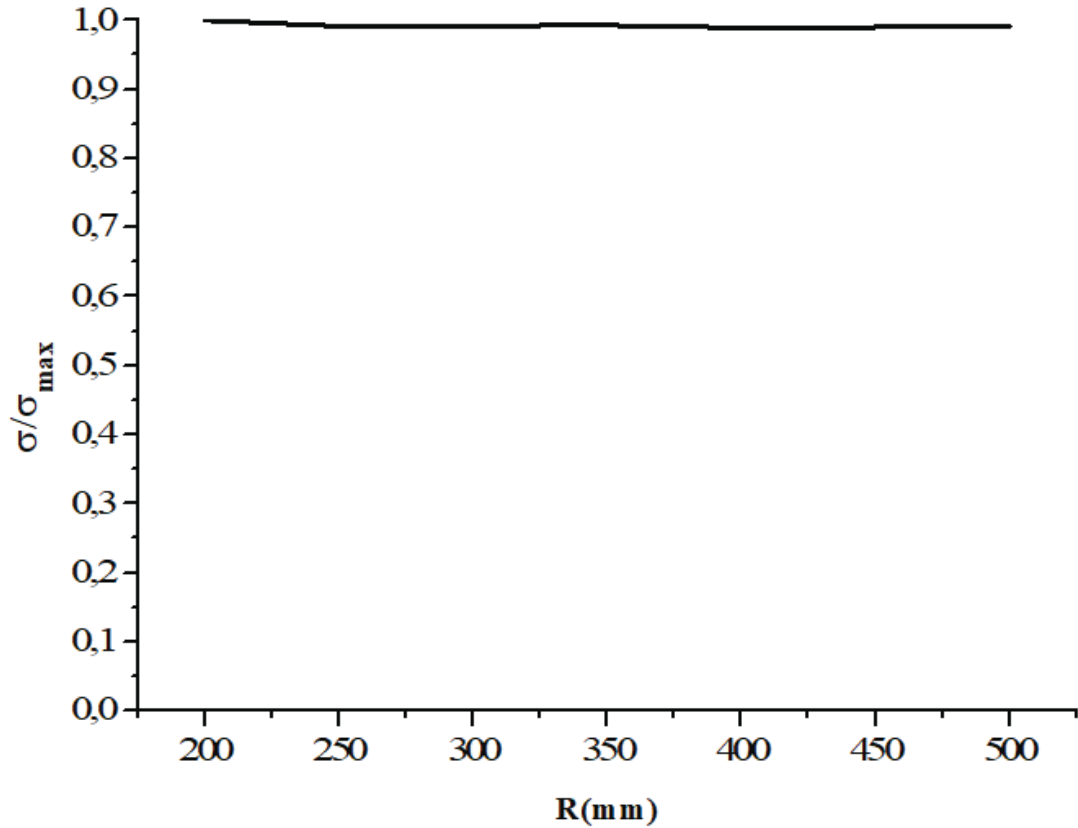
Şekil 3.56. Dış yüzey koniklik açısı-gerilme ilişkisi

Şekil 3.56'de Elastomer yatağın dış yüzey koniklik açısının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler

görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağın dış yüzey koniklik açısı verilmiştir. Elastomer yatağın dış yüzey koniklik açısının artmasıyla orantılı olarak tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi bu oranın artmasıyla tabakaların yüzey alanı artmaktadır.

Yüzey alanıyla gerilmeler ters orantılı olduğundan yüzey alanının artmasıyla maksimum gerilmelerin azalması beklenmektedir. Ancak açisal yer değiştirme yüklemesi dış çapın artmasıyla arttığından maksimum gerilmeleri arttırmıştır. Yapılan detaylı literatür taramasında küresel elastomerik yatakların dış yüzey koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiye dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın özgün yönlerinden birisi basınç ve açisal yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların dış yüzey koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışma olmasıdır.



Şekil 3.57. Dış yüzey eğrilik yarıçapı-gerilme ilişkisi

Şekil 3.57'de Elastomer yatağın dış yüzey eğrilik yarıçapının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek

gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağın dış yüzey eğrilik yarıçapı verilmiştir.

Elastomer yatağın dış yüzey eğrilik yarıçapının değişmesiyle maksimum gerilmelerde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bunun sebebi eğrilik yarıçapı orta tabakaların yüzey alanını azaltmaktadır. Bu yüzey alanlarının azalması orta tabakalardaki gerilmeleri arttırsa da maksimum gerilmeler en üst tabakalarda meydana geldiğinden maksimum gerilmeler üzerinde etki oluşturmamaktadır.

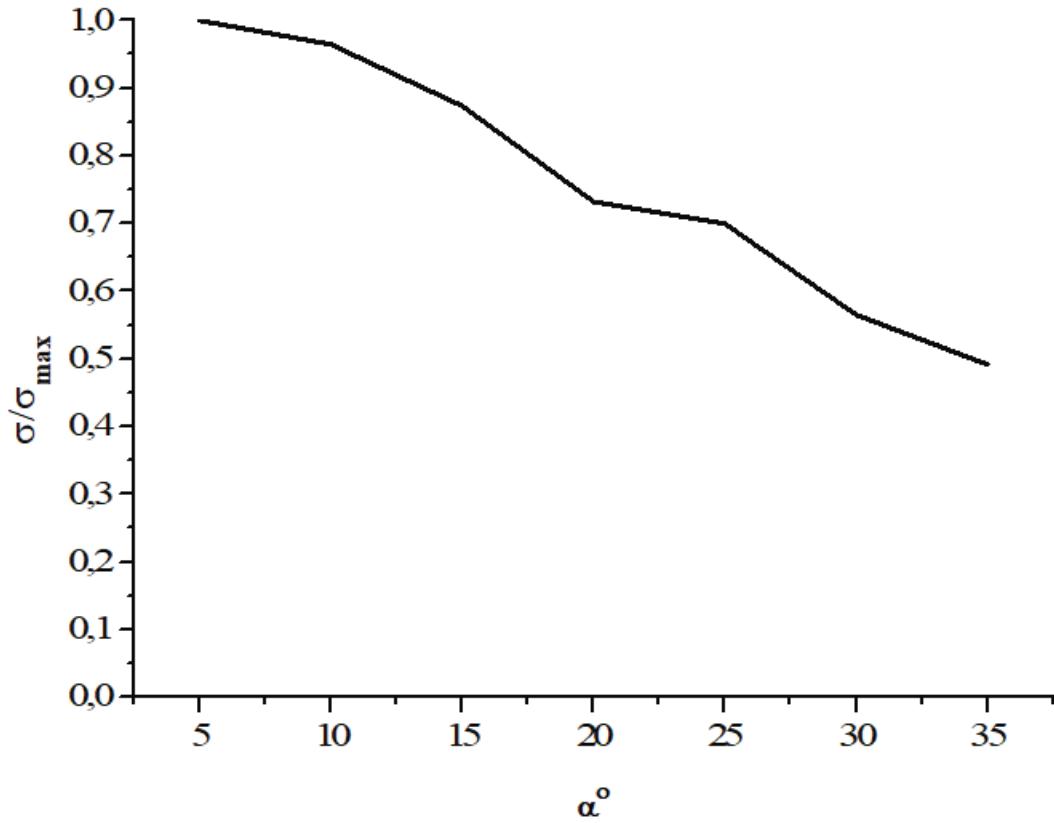
Chen ve diğ. [56] açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda dış yüzey eğrilik yarıçapının artmasıyla maksimum gerilmelerin düştüğü sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada sadece açısız yer değiştirme yüklemesi değil basınç yüklemesi de uygulandığında sonuçların farklı olduğu görülmüştür. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların dış yüzey eğrilik yarıçapı değişiminin maksimum gerilmeler üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır.

Daha önceki çalışmalarda açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda dış yüzey eğrilik yarıçapının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın özgün yönlerinden birisi basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların dış yüzey koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışma olmasıdır.

Şekil 3.58’de Elastomer yatağın delik koniklik açısının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağın delik koniklik açısı verilmiştir.

Elastomer yatağın delik koniklik açısının artmasıyla ters orantılı olarak tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Delik koniklik açısının artmasıyla elastomerin yüzey alanı azalmaktadır. Yüzey alanıyla gerilmeler arasında ters orantı olduğundan, bu durumda maksimum gerilmelerin artması beklenir. Ancak maksimum gerilmeler en üst tabakaların iç tarafında gerçekleşmektedir. Maksimum

gerilmelerin olduğu iç taraftan uzaklaştıkça gerilmeler azalmaktadır. İç koniklik açısının artması üst tabakaları iç kısmından çok uzaklaştırırken alt tabakaları iç kısımdan az uzaklaştırmıştır. Bunun sonucu olarak iç kısma yakın olan alt tabakalara gerilmeler dağılmıştır, en üst tabakada ise gerilmeler azalmıştır. Maksimum gerilmeler en üst tabakada gerçekleştiği için delik koniklik açısının artması maksimum gerilmeleri azaltmıştır.

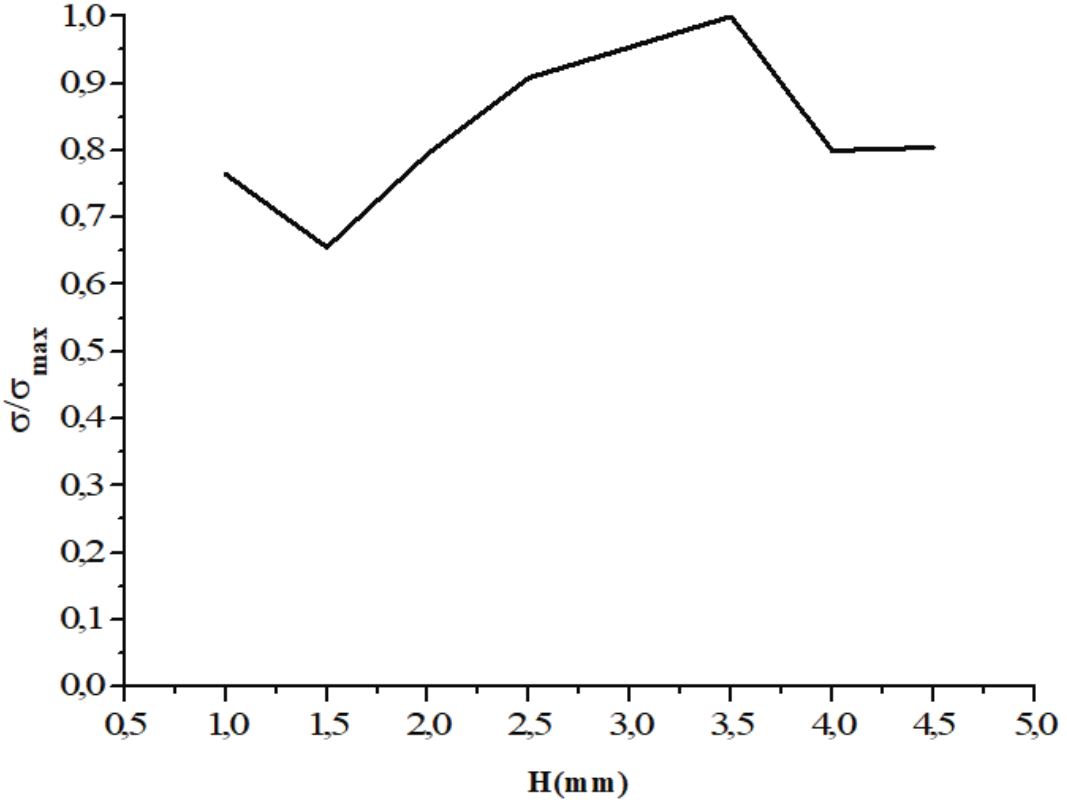


Şekil 3.58. Delik koniklik açısı-gerilme ilişkisi

Chen ve diğ. [56] açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda delik koniklik açısının artmasıyla maksimum gerilmelerin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada sadece açısız yer değiştirme yüklemesi değil basınç yüklemesi de uygulandığında sonuçların farklı olduğu görülmüştür. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların delik koniklik açısının artması maksimum gerilmeleri azaltmaktadır.

Daha önceki çalışmalarda açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda delik koniklik açısının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın özgün yönlerinden birisi basınç ve açısız yer değiştirme

yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların delik koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışma olmasıdır.



Şekil 3.59. Tabaka kalınlığı-gerilme ilişkisi

Şekil 3.59’de Elastomer yatağın tabaka kalınlıklarının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağın tabaka kalınlığı verilmiştir.

Elastomer yatağın tabaka kalınlığı artmasıyla yüzey alanı artmaktadır. Bu durumda elastomer tabaka kalınlığının artmasıyla maksimum gerilmelerin artması beklenmektedir. Grafikte görüldüğü gibi 1 mm ile 1,5 mm ve 3,5 mm ile 4 mm tabaka kalınlığı arasında beklenen sonuç elde edilmiştir. Ancak 1,5 mm ile 3,5 mm arasında maksimum gerilmelerde artma görülmüştür. Bunun sebebi yatağa sadece basınç yüklemesi yapılmamasıdır. Aynı zamanda açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanmasıdır. Tabaka kalınlığının artmasıyla yüzey alanı arttığı gibi elastomerin dış çapı da artmaktadır. Dış çapın artması açısız yer değiştirme yüklemesini arttırmakta

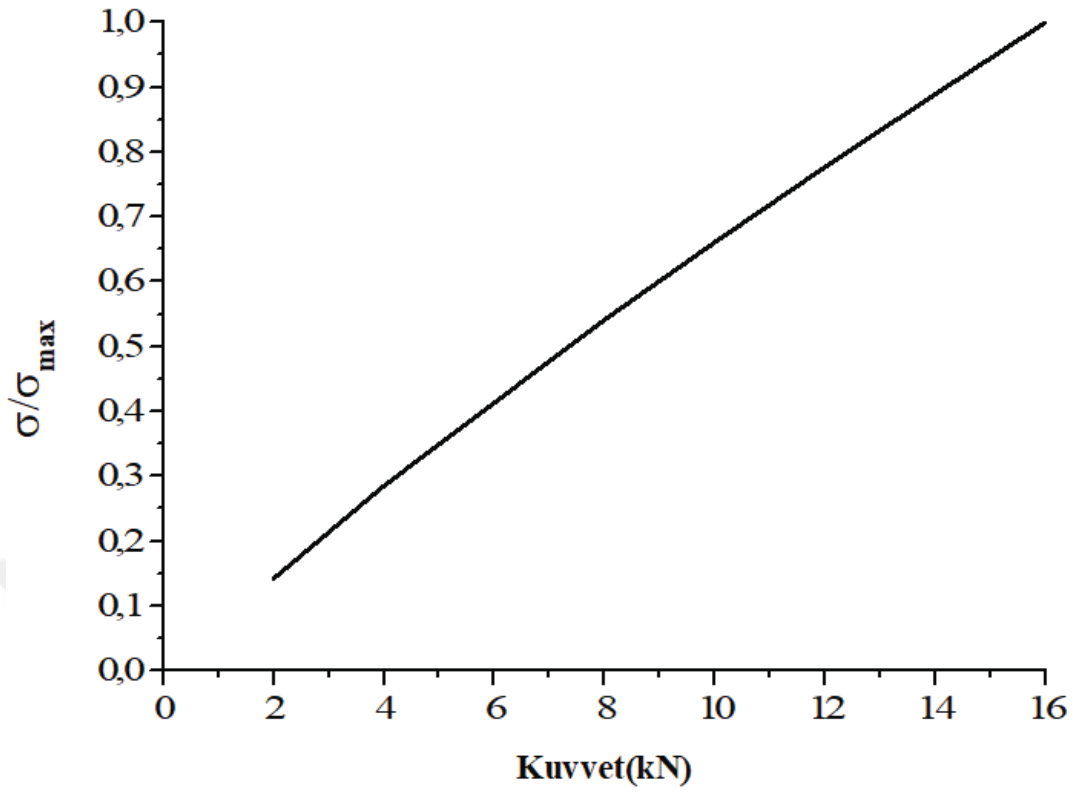
ve maksimum gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak yüzey alanının artmasının düşürdüğü gerilmeler açısız yer değiştirmenin artmasıyla tekrar artmaya başlamakta 3,5 mm'den sonra çok fazla artan yüzey alanı maksimum gerilmeleri düşürmektedir. Elastomer tabaka kalınlığıyla maksimum gerilmeler arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmüştür.

Chen ve diğ. [56] açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda elastomer tabaka kalınlığının artmasıyla maksimum gerilmelerin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ancak 0,7 mm ile 1,2 mm arasındaki tabaka kalınlıkları aralığında yaptıkları çalışmada bu sonuca ulaşmışlardır. Bu aralık için bizim çalışmamızla aynı sonuçlar elde edilmiştir.

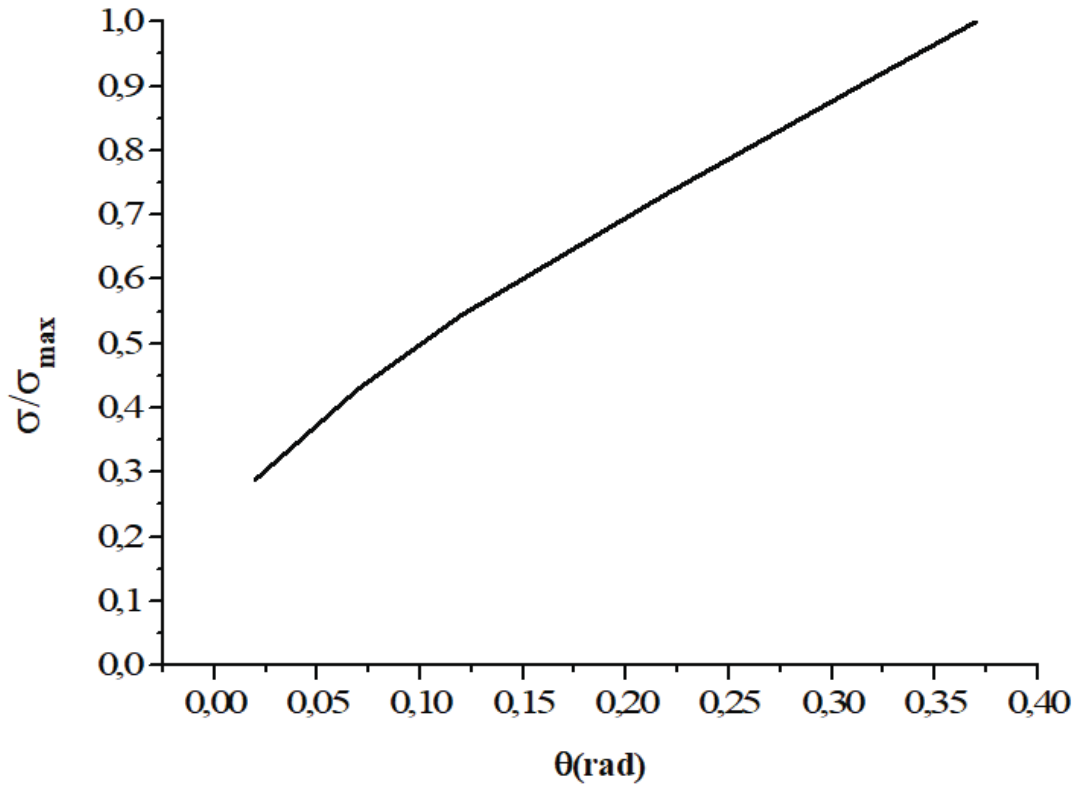
Daha önceki çalışmalarda açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda 0,7 mm ile 1,2 mm aralığındaki tabaka kalınlığının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın özgün yönlerinden birisi basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yatakların 1,5 mm ve üstü tabaka kalınlığının maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışma olmasıdır.

Şekil 3.60'de Elastomer yatağa uygulanan kuvvet miktarının maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görülmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağa gelen basınç miktarı verilmiştir. Elastomer yatağa uygulanan kuvvet miktarının artmasıyla orantılı olarak tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerin arttığı görülmektedir.

Elastomerlerde oluşan gerilmelerin sebebi elastomerik yatağa uygulanan yüklemelerdir. Elastomerik yatağa uygulanan basınç yüklemesinin artmasıyla maksimum gerilmelerin artacağı beklenmektedir. Bu yükleme miktarının artmasıyla maksimum gerilmelerin artacağı Kelly'nin [64] teorik çalışmalarında gösterildiği gibi bu çalışmada simülasyon sonuçlarıyla da doğrulanmıştır.



Şekil 3.60. Kuvvet miktarı-gerilme ilişkisi



Şekil 3.61. Açısal yer değiştirme-gerilme ilişkisi

Şekil 3.61’da Elastomer yatağa uygulanan yer değiştirme yüklemesinin maksimum gerilmeler üzerindeki etkisi görölmektedir. Grafiğin dikey ekseninde tüm gerilmelerin en yüksek gerilmeye bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş maksimum gerilmeler görölmektedir. Grafiğin yatay ekseninde ise elastomer yatağa uygulanan açısai yer değiştirme yüklemesi verilmiştir. Elastomer yatağa uygulanan açısai yer değiştirme yüklemesinin artmasıyla orantılı olarak tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerin arttığı görölmektedir.

Elastomerlerde oluşan gerilmelerin sebebi elastomerik yatağa uygulanan yüklemelerdir. Elastomerik yatağa uygulanan açısai yer değiştirme yüklemesinin artmasıyla maksimum gerilmelerin artacağı beklenmektedir. Bu yükleme miktarının artmasıyla maksimum gerilmelerin artacağı Kelly’nin [64] teorik çalışmalarında gösterildiği gibi bu çalışmada simölasyon sonuçlarıyla da doğrulanmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Her malzemenin farklı özellikleri vardır. Malzemeler farklı özellikleri sayesinde farklı yerlerde kullanılırlar. Bazı malzeme özellikleri belli alanlarda dezavantajken başka bir alanda avantaj olabilir. Elbette uygulama alanları için tüm istenilen karakteristiği gösteremez bu yüzden seçilen malzemelerde bazı avantajlar için bazı dezavantajlarına katlanılarak optimum malzeme seçmek gerekir. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelere olan ilgi artmıştır. Kompozit malzemeler birden fazla malzemenin özelliğini üzerinde taşımasından dolayı birçok sektörün dikkatini çekmeye başlamıştır. Bu sayede aynı anda istenilen iki veya daha fazla özellik bir tek malzemedan elde edilebilecektir. Bu sayede bir özellik için diğer bir özellikten vazgeçmek gerekmeyecektir.

Havacılık sanayinde istenilen özelliklerden en önemlileri yüksek dayanım ve hafifliktir. Ancak yüksek dayanım sağlayan malzemeler ağır olduğu için uygun malzemeyi seçmek oldukça zorlaşmaktadır. Bu yüzden kompozitler havacılık sanayinin ilgisini çekmiştir.

Kompozitler aynı anda birden fazla özellik göstermesinin yanı sıra yerleştirilme şekillerine göre farklı yönlerde farklı özellikler de gösterebilirler. Farklı yönlerde farklı karakteristik gösterilmesi istenilen uygulamalarda bu özellik çok işe yaramaktadır.

Elastomerik yataklar elastomer ve çelik katmanların sandviç şeklinde üst üste yerleştirilmesiyle oluşur. Bu sayede tabakalara dik gelen yüklere karşı rijit, tabakalara paralel gelen yüklere karşı esneklik sağlar. Bunun sonucunda hangi doğrultuda rijitlik isteniliyorsa tabakalar o doğrultuya dik olacak şekilde yerleştirilir. Aynı zamanda esneklik istenilen doğrultuya paralel olacak şekilde tabakalar yerleştirildiğinde, o uygulamaya en uygun elastomerik yatak şekli ortaya çıkmış olacaktır.

Helikopter pervanelerinin dönmesinden kaynaklanan merkez kaç kuvvetlerine karşı rijit, pervanelerin kanat çırpma ve sağa sola dönme hareketlerine karşı esnek davranış gösterecek yataklara ihtiyaç vardır. Pervanelerde kullanılacak elastomer yatağı seçmek

için merkez kaç kuvvetinin doğrultusuna dik olacak, aynı zamanda pervanelerin kanat çarpma ve sağa sola dönme hareket doğrultularına paralel olacak şekilde tabakalar yerleştirilir. Bu sayede ortaya küresel elastomerik yatak çıkmış olur.

Küresel elastomerik yatağın kullanımında en çok dikkat edilen konulardan birisi de yatağın ömrüdür. Elastomer yatağın ömrünü azaltan en önemli parametrelerden birisi, elastomer katmanlara gelen yüksek gerilmelerdir. Bu gerilmeler azaltıldığında elastomer malzemenin ömrü artacaktır. Bu çalışmada elastomer yatağın geometrik parametrelerini değiştirerek elastomere gelen maksimum gerilmeleri azaltmak amaçlanmıştır.

Yapılan detaylı literatür taraması sonucunda aşağıda sıralanan maddelerle ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Aşağıdaki maddeler tezin özgün yönlerini göstermektedir;

1. Küresel elastomerik yatağın iç çapıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışmadır.
2. Küresel elastomerik yatağın dış yüzey koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışmadır.
3. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi altında dış yüzey eğrilik yarıçapı ve maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışmadır.
4. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi altında delik koniklik açısıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışmadır.
5. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi altında tabaka kalınlığıyla maksimum gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren bir çalışmadır.

Bu çalışmada 112 kN'a kadar olan basınç yüklemeleri için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Basınç ve açısız yer değiştirme yüklemesi uygulanan küresel elastomerik yataklarda en yüksek gerilmeler en üst elastomer tabakalarda meydana gelmektedir.
2. Küresel elastomerik yatağın geometrik parametrelerini değiştirerek maksimum gerilmeleri azaltmak mümkündür.
3. İç çap/dış çap oranının artmasıyla küresel elastomerik yatakların elastomer tabakalarında oluşan maksimum gerilmeler azalmaktadır.

4. Dış yüzey koniklik açısının artmasıyla elastomer tabakalarda oluşan maksimum gerilmeler artmaktadır.
5. Dış yüzey eğrilik yarı çapının artması elastomer tabakalarda oluşan gerilmeler üzerinde önemli bir değişikliğe yol açmamaktadır.
6. Delik koniklik açısı arttıkça maksimum gerilmeler azalmaktadır.
7. Tabaka kalınlığı ile maksimum gerilmeler arasında lineer bir ilişki yoktur. 1 mm ile 1,5 mm ve 3,5 mm ile 4 mm arasındaki tabaka kalınlıklarında, tabaka kalınlığının artmasıyla maksimum gerilmeler azalmakta iken 1,5 mm ile 3,5 mm arasındaki tabaka kalınlıklarında, tabaka kalınlığının artmasıyla maksimum gerilmeler artmaktadır.
8. Küresel elastomerik yatağa uygulanan basınç yüklemesinin artmasıyla maksimum gerilmeler artmaktadır.
9. Küresel elastomerik yatağa uygulanan açısız yer değiştirme yüklemesinin artmasıyla maksimum gerilmeler artmaktadır.
10. Bu çalışmada küresel elastomerik yatağın önerilen geometrik parametreleri delik çapı 80 mm, silindirik ve kavisli olmayan dış yüzey, 35° delik koniklik açısı, 3 mm tabaka kalınlığı ve 18 elastomer tabaka sayısıdır. Bu parametrelere göre yapılan simülasyonlarda en düşük maksimum gerilmeler elde edilmiştir.
11. Takviye elemanı olarak çelik yerine AA7075 Alüminyum Alaşımı kullanılması tabakalarda oluşan maksimum gerilmelerde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

Havacılık sanayiinde ağırlık çok önemli bir parametredir. Bu yüzden elastomer yatağın ağırlığını azaltacak çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda çelik katmanlar yerine daha hafif malzemeler kullanılabilir. Bu malzemelerin gelen yükleri ne kadar taşıyacağı ve üretim maliyetleri üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

Elastomer yataklara uygulanan basınç yükü ve açısız yer değiştirme yüklemesi arttıkça tabakalara gelen gerilmeler artmaktadır. Yatağa gelen yüklerin azaltılması elastomerik yatağın ömrünü arttıracaktır. Sonraki çalışmalarda elastomer yatağa gelen yükleri azaltacak çalışmalara yoğunlaşılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Gent A. N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd ed., Hanser, Munich, 2011.
- [2] Byers L.K., Helicopter Rotor Lag Damping Augmentation Based on a Radial Absorber and Coriolis Coupling, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University, Department of Aerospace Engineering, Peensylvania, 2006.
- [3] Hinks W. L., Laminated Rubber Bearings: Heavy Duty Composites for Aerospace and Undersea, *183rd Technical Meeting of the Rubber Division of the American Chemical Society*, Ohio, ABD, 22-24 Nisan 2013.
- [4] Kelly J.M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd ed., Springer, USA, 1997.
- [5] Chalhoub M.S., Kelly J. M., Analysis of Infinite-Strip-Shaped Base Isolator with Elastomer Bulk Compression, *J. Eng. Mech.*, 1991, **117**(8), 1791-1805.
- [6] Tsai H. C., Compression Stiffness of Infinite-Strip Bearings of Laminated Elastic Material Interleaving with Flexible Reinforcements, *Int. J. Solids Struct.*, 2004, **41**(24-25), 6647-6660.
- [7] Tsai H., Lee C., Compressive Stiffness of Elastic Layers Bonded between Rigid Plates, *Int. J. Solids Struct.*, 1998, **35**(23), 3053-3069.
- [8] Kelly J, Analysis of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators, *J. Seismol. Earthq. Eng.*, 1999, **2**(1), 19-34.
- [9] Bramwell A. R. S., Done G., Balmford D., *Bramwell's Helicopter Dynamics.*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Melbourne, 2001.
- [10] Brackbill C.R., Helicopter Rotor Aeroelastic Analysis Using a Refined Elastomeric Damper Model, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University, Department of Aerospace Engineering, Peensylvania, 2000.
- [11] LORD Corporation, Aerospace and Defense Isolator Catalog, USA, https://lordfulfillment.com/pdf/44/PC6116_AerospaceandDefenseIsolator.pdf, (Ziyaret tarihi: 17 Ekim 2019).
- [12] Panda B., Mychalowycz E., Tarzanin F. J., Application of Passive Dampers to Modern Helicopters, *Smart Mater. Struct.*, 1996, **5**(5), 509.
- [13] Callister W. D., Rethwisch D. G., *Materials Science and Engineering*, 9th Ed., John wiley & sons, New York, 2009.
- [14] Gandhi F., Chopra I., A Time-Domain Nonlinear Viscoelastic Damper Model,

Smart Mater. Struct., 1996, **5**(5), 517.

- [15] Tarzanin F. J. Panda B., Development and Application of Nonlinear Elastomeric and Hydraulic Lag Damper Models, *36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, New Orleans, LA, ABD, 10-13 Nisan 1995.
- [16] Flügge W., *Viscoelasticity*, 2nd revised ed., Springer, Berlin, 1975.
- [17] Jones D. I. G., *Viscoelastic Materials for Damping Applications: Damping Applications for Vibration Control*, NASA, STI/Recon Technical Report A, 81, 27-51, 1980.
- [18] Rogers L., On Modeling Viscoelastic Behavior, *Shock Vib. Bull.*, 1981, **51**, 55–69.
- [19] Bagley R. L., Torvik P. J., A Generalized Derivative Model for an Elastomer Damper, *Shock Vib. Bull.*, 1979, **49**(2), 135–143.
- [20] Rogers L., Operators and Fractional Derivatives for Viscoelastic Constitutive Equations, *J. Rheol.*, 1983, **27**(4), 351-372.
- [21] Buhariwala K. J., Hansen J. S., Construction of a Consistent Damping Matrix, *J. Appl. Mech.*, 1988, **55**(2), 443–447.
- [22] Segalman D. J., Calculation of Damping Matrices for Linearly Viscoelastic Structures, *J. Appl. Mech. Trans.*, 1987, **54**(3), 585-588.
- [23] McTavish D. J., Hughes P. C., Finite Element Modeling of Linear Viscoelastic Structures: the GHM Method, *33th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Dallas, TX, USA, 13-15 Nisan 1992.
- [24] Findley W. N., Lai J. S. Y., A Modified Superposition Principle Applied to Creep of Nonlinear Viscoelastic Material Under Abrupt Changes in State of Combined Stress, *Trans. Soc. Rheol.*, 1967, **11**(3), 361-380.
- [25] Bernstein B, Kearsley E. A., Zapas L. J., A Study of Stress Relaxation with Finite Strain, *Rubber Chem. Technol.*, 1965, **38**(1), 76-89.
- [26] Glockner P. G., Szyszkowski W., An Engineering Multiaxial Constitutive Model for Nonlinear Time-Dependent Materials,” *Int. J. Solids Struct.*, 1990 **26**(1), 73–82.
- [27] Szyszkowski W., Glockner P. G., On a Multiaxial Nonlinear Hereditary Constitutive Law for Nonageing Materials with Fading Memory, *Int. J. Solids Struct.*, 1987, **23**(2), 305-324.
- [28] Kunz D. L., Elastomer Modelling for Use in Predicting Helicopter Lag Damper Behavior, *Journal of Sound and Vibration*. 1999, **3**(226), 585-594.
- [29] Zamani H. A., Aghdam M. M., Sadighi M., Free Vibration Analysis of Thick

Viscoelastic Composite Plates on Visco-Pasternak Foundation Using Higher-Order Theory, *Compos. Struct.*, 2017, **182**, 25–35.

- [30] Shariyat M., A Double-Superposition Global-Local Theory for Vibration and Dynamic Buckling Analyses of Viscoelastic Composite/Sandwich Plates: A Complex Modulus Approach, *Arch. Appl. Mech.*, 2011, **81**(9), 1253-1268.
- [31] Shariyat M., Nasab F. F., Low-Velocity Impact Analysis of the Hierarchical Viscoelastic FGM Plates, Using an Explicit Shear-Bending Decomposition Theory and the New DQ Method, *Compos. Struct.*, 2014, **113**, 63-73.
- [32] Assie A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F., Behavior of a Viscoelastic Composite Plates under Transient Load, *J. Mech. Sci. Technol.*, 2011, **25**(5), 1129.
- [33] Adamczak S., Bochnia J., Estimating the Approximation Uncertainty for Digital Materials Subjected to Stress Relaxation Tests, *Metrol. Meas. Syst.*, 2016, **23**(4), 545-553.
- [34] Sy N. N., Lee J., Cho M., Application of the Laplace Transformation for the Analysis of Viscoelastic Composite Laminates Based on Equivalent Single-Layer Theories, *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, 2012, **13**(4), 458-467.
- [35] Temel B., Şahan M. F., Transient Analysis of Orthotropic, Viscoelastic Thick Plates in the Laplace Domain, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 2013, **37**, 96-105.
- [36] Cederbaum G., Aboudi J., Dynamic Response of Viscoelastic Laminated Plates, *J Sound Vib*, 1989, **133**(2), 225–238.
- [37] Yim J. H., A Damping Analysis of Composite Laminates Using the Closed Form Expression for the Basic Damping of Poisson's Ratio," *Compos. Struct.*, 1999, **46**(4), 405-411.
- [38] Pritz T., The Poisson's Loss Factor of Solid Viscoelastic Materials, *J. Sound Vib.*, 2007, **306**(3-5), 790-802.
- [39] Hilton H., The Elusive and Fickle Viscoelastic Poisson's Ratio and Its Relation to the Elastic-Viscoelastic Correspondence Principle, *J. Mech. Mater. Struct.*, 2009, **4**(7), 1341-1364.
- [40] Gent A. N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 1st ed., Hanser Publishers, New York, 1992.
- [41] Shames I. H., Cozzarelli F. A., *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Revised Printing, Taylor and Francis, USA, 1997.
- [42] Austrell P., Modeling of Elasticity and Damping for Filled Elastomers, Doktora Tezi, Lunds University, Lund Institut of Technology, Sweden, 1997.
- [43] Lesieutre G. A., Govindswamy K., Finite Element Modeling of Frequency-Dependent and Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Viscoelastic

Materials in Simple Shear, *Int. J. Solids Struct.*, 1996, **33**(3), 419-432.

- [44] Hausmann G., Gergely P., Approximate Methods for Thermoviscoelastic Characterization and Analysis of Elastomeric Lead-Lag Dampers, *18th European Rotorcraft Forum*, Avignon, France, 1992.
- [45] Brackbill C. R., Lesieutre G. A., Smith E. C., Gowindswamy K., Thermomechanical Modeling of Elastomeric Materials, *J. Smart Mater. Struct.*, 1996, **5**(5), 529-539.
- [46] Wittig D., Finite Element Analysis of Helicopter Main Rotor Hub Plates to Evaluate the Possibility of Increasing the Time to Retirement, Yüksek Lisans Tezi, University of Texas, Mechanical Engineering, Arlington, 2008.
- [47] Chen G., Zhang L., Qin H., Finite Element Analysis for the Influence of Spherical Layered Elastomeric Bearing Structure on the Mechanical Behavior, *Journal Mater. Eng.*, 2009, **10**, 005.
- [48] Warley R. L., Silica-Silicone Interactions: Nonlinear Viscoelastic Behavior of Silica Filled Silicone Rubber, Doktora Tezi, Case Western Reserve University, Chemical Engineering, Ohio, 1993.
- [49] Naghshineh A. K., Experimental Studies on Fiber-Mesh Reinforced Elastomeric Bearings, Doktora Tezi, Middle East Technical University, Civil Engineering, 2013.
- [50] K. A. Domaniç, “Seismic Performance of Unbonded Elastomeric Bearings on Bridges: An Experimental and Parametric Study,” Middle East Technical University, Ankara, 2015, 416448.
- [51] Ruano P. C., Strauss A., An Experimental Study on Unbonded Circular Fiber Reinforced Elastomeric Bearings, *Eng. Struct.*, 2018, **177**, 72-84.
- [52] Zhang X., Liu Y., Ren J., Zhan K., Nonlinear Finite Element Analysis of the SRM Flexible Joint, *53th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Hawaii, 23-26 Nisan 2012.
- [53] Su H., Ren J. X., Xue M. Y., Tong Y., Zheng Q., Yang J. X., Influence of Pressure and Deflection Loads on the Critical Behavior of Flexible Joints, *Compos. Struct.*, 2017, **180**, 772-781.
- [54] Ren J., Zhang X., Yang J., Wang C., Liu Y., Yang W., Structural Analysis and Testing of a Miniature Flexible Joint under Pressure and Vector Loading, *J. Mech. Sci. Technol.*, 2014, **28**(9), 3637-3643.
- [55] Kelly J. M., Konstantinidis D. A., *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. 1st ed., John Wilay and Sons, UK, 2011.
- [56] Gent A. N., Lindley P. B., The Compression of Bonded Rubber Blocks, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1959, **173**(1), 111-122.

- [57] Gent A. N., Meinecke E. A., Compression, Bending, and Shear of Bonded Rubber Blocks, *Polym. Eng. Sci.*, 1970, **10**(1), 48-53.
- [58] Polukoshko S., Martinovs A., Gonca V., Torsional, Compression and Shear Stiffness of Thin-Layer Rubber-Metal Spherical Joint-Hinge, *The International Scientific Conference*, Latvia, 2017.
- [59] Chen G., Zhang L., Qin H., Finite Element Analysis for the Influence of Spherical Layered Elastomeric Bearing Structure on the Mechanical Behavior, *Journal Mater. Eng.*, 2009, **10**, 005.
- [60] Marusak R. E., Becker E. B., A Finite Element Procedure for Axisymmetric Elastomeric Solids under General Loading, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 1993, **36**(12), 2031-2048.
- [61] Schapery R. A., Shim Analysis for Spherical Elastomeric Bearings, *Int. J. Solids Struct.*, 2018, **144**, 276-288.
- [62] Schapery R. A., Elastomeric Bearing Sizing Analysis Part 1: Spherical Bearing,” *Int. J. Solids Struct.*, 2018, **152**, 118-139.
- [63] Cancellara D., De Angelis F., Nonlinear Dynamic Analysis for Multi-Storey RC Structures with Hybrid Base Isolation Systems in Presence of Bi-directional Ground Motions, *Compos. Struct.*, 2016, **154**, 464-492.
- [64] Osgooei P. M., Konstantinidis D., Tait M. J., Variation of the Vertical Stiffness of Strip-Shaped Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators under Lateral Loading, *Compos. Struct.*, 2016, **144**, 177-184.
- [65] Moghadam S. R., Konstantinidis D., Finite Element Study of the Effect of Support Rotation on the Horizontal Behavior of Elastomeric Bearings, *Compos. Struct.*, 2017, **163**, 474-490.
- [66] Lejeunes S., Boukamel A., Cochelin B., Analysis of Laminated Rubber Bearings with a Numerical Reduction Model Method, *Arch. Appl. Mech.*, 2006, **76**(5-6), 311-326.
- [67] Ding L., Zhu H. P., Wu L., Analysis of Mechanical Properties of Laminated Rubber Bearings Based on Transfer Matrix Method, *Compos. Struct.*, 2017, **159**, 390-396.
- [68] Markou A. A., Manolis G. D., Mechanical Models for Shear Behavior in High Damping Rubber Bearings, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 2016, **90**, 221-226.
- [69] Chen S. C., Tian X. K., Yan W. M., Kim K. S., Modeling and Analysis of Laminated Rubber Bearings under Axial Tensile Loading, *Mater. Struct. Constr.*, 2014, **47**(6), 987-997.
- [70] Ogden R., Large Deformation Isotropic Elasticity-on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids, *Proc. R. Soc. London. Ser. A*, 1972, **326**(1567), 565-584.

- [71] Mooney M., A Theory of Large Elastic Deformation, *J. Appl. Phys.*, 1940, **11**(9), 582-592.
- [72] Hibbitt D., Karlsson B., Sorenson P., *Getting Started with ABAQUS—Version (6.5)*, Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc., 2005.
- [73] Shahzad M., Kamran A., Siddiqui M. Z., Farhan M., Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material, *Mater. Res.*, 2015, **18**(5), 918-924.
- [74] NASA Lewis Research Center, Solid Rocket Thrust Vector Control., *NASA*, SP-8114, 18-116, 1974.
- [75] Woodberry R., Flexible Joints for Thrust Vector Control, *11th Propulsion Conference*, USA, 29 Eylül-1 Ekim 1975.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Karabay S., **Bayraklılar M.**, Balcı E., Influence of Different Heat Treatments on the Solid Particle Erosion Behavior of Aluminum Alloy AA 7075 in Industrial Applications, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **4**(127), 1052-1054.
- [2] **Bayraklılar M. S.**, Karabay S., Performance of HSS, HSS-Co and HSS-TiN Drill Bits When Drilling Aluminium Alloy AA 6082-T6, *4th International Advances in Applied Physics and Material Science Congress and Exhibition*, Fethiye, 24-27 Nisan 2014.
- [3] Karakulak E., **Bayraklılar M. S.**, Zeren M., Karabay S., Al-Si Ötektik Alaşımının İşlenebilirliğine Bakır Katkısının ve Isıl İşlemin Etkisi, *Metal Makina*, 2013, 222-225.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Düzce’de doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Gaziantep’te tamamladı. 2005 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2010 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılında yüksek lisansını tamamladı, aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda doktora öğrenimine başladı. 2010-2011 yılları arasında Bayraklılar Kalıp’ ta üretim müdürü olarak çalıştı. 2011 yılında Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde ÖYP kapsamında Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 2011 yılında 35. Madde kapsamında yüksek lisans yapmak üzere Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne görevlendirmeye geldi. 2018 yılında kadrosunun bulunduğu Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak döndü. 2018 yılından beri Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.