

**T.C.**

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAPIŞTIRILARAK BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN  
EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**HALİL MURAT ENGİNSOY**

**KASIM 2017**

**UŞAK**

**T.C.**  
**UŞAK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAPIŞTIRILARAK BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN**  
**EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞLARININ**  
**İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**  
**HALİL MURAT ENGİNSOY**

**UŞAK 2017**

## Kabul ve Onay Sayfası

Halil Murat ENGİNSOY tarafından hazırlanan “Yapıştırılarak Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Eksantrik Yükleme Altındaki Yapısal Davranışlarının İncelenmesi” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Osman ASİ .....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman ASİ .....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Doç. Dr. Abdullah YILDIZ .....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Prof. Dr. Mevlüt TERCAN .....

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ .....

Mekanik Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi

Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU .....

Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi

Tarih: ...../...../.....

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Halil Murat ENGİNSOY

# YAPIŞTIRILARAK BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Halil Murat ENGİNSOY

UŞAK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım, 2017

## ÖZET

Akrilik polimer grubunun bir elemanı olan ve viskoelastik bir yapıda bulunan yapıştırıcı bant VHB 4950 (3M™) elastomer malzemesinin, farklı ön gerilme koşulları ve farklı geometrik parametrelerin oluşturduğu eksantrik yüklemeler altındaki mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, viskoelastik malzemenin mekanik karakterizasyonu için standartlaşmış farklı testlerden biri olan ve sonlu elemanlar modeli için en uygun yakınsamaya sahip optimizasyon parametrelerini veren çevrimsel yükleme-boşaltma testleri uygulanmıştır. Nümerik olarak yapılan tüm model çalışmalarında, çevrimsel yükleme-boşaltma test sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak, farklı malzeme modelleri de incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, Mcalibration® yazılımı ortamında oluşturulan 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ modeli ile en uygun malzeme parametreleri belirlenmiştir. Ardından bu malzeme parametreleri kullanılarak, ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus®/Explicit ile üç boyutlu doğrusal olmayan viskoelastik bir yapıda modellenerek sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizi sonuçlarının maksimum yük taşıma kapasitesine sahip yapısal numuneleri için elde edilen deneysel Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) verileri ile iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir.

**Bilim Kodu:** 625.02.00.

**Anahtar Kelimeler:** Viskoelastisite, PRF modelleme, VHB 4950, nümerik simülasyon

**Sayfa Adedi:** 187

**Tez Yöneticisi:** Prof. Dr. Osman ASİ

# INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIORS UNDER THE ECCENTRIC LOADING OF ADHESIVELY BONDED COMPOSITE MATERIALS

(Ph.D. Thesis)

Halil Murat ENGİNSOY

UŞAK UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

November, 2017

## ABSTRACT

Mechanical behaviors of adhesive tape VHB 4950 (3M™) elastomeric material, which is an element of acrylic polymer group and which is in viscoelastic behavior, under different pre-stress conditions eccentric forces of different geometric parameters created by eccentric loadings have been experimentally and numerically investigated. In experimental studies, loading-unloading cyclic tests, one of the different standardized tests for the mechanical characterization of viscoelastic material, have been applied which give the most suitable convergent optimization parameters for the finite element model. Different material models were also investigated by using the data obtained from loading-unloading test results in all numerical models. According to the experimental results, the most suitable material parameters were determined with the Abaqus Parallel Rheological Framework Model (PRF) for 4 Yeoh Networks with Bergstrom-Boyce Flow model created in the Mcalibration® software for finite element analysis. Subsequently, using these material parameters, finite element analysis was performed as three dimension non-linear viscoelastic with a commercial finite element software Abaqus®/Explicit. The finite element analysis results showed good correlation to the Force (N)-Displacement (mm) experimental data for maximum load-carrying capacity of structural specimens.

**Science Code:** 625.02.00.

**Key Words:** Viscoelasticity, PRF modelling, VHB 4950, numerical simulation

**Page Number:** 187

**Adviser:** Prof. Dr. Osman ASİ

## TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmasının başlangıcından itibaren tamamlanıncaya kadar ki olan tüm aşamalarında bana daima yol gösteren, çözüm odaklı yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, kıymetli tecrübeleriyle çalışmanın gerçekleştirilmesine çok büyük emekler veren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Osman ASİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarına zaman ayırarak, değerli bilgi birikimleri ile çok önemli katkılar sağlayan ve her zaman titiz bir şekilde beni yönlendiren tez izleme komitesi hocam Prof. Dr. Halit GÜN'e çok teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında bana tüm içtenliğiyle yardımcı olan tez izleme komitesi üyesi hocam Prof. Dr. Mevlüt TERCAN'a çok teşekkür ederim.

2015/TP003 numaralı proje ile bu tez çalışmasını destekleyen Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (UBAP) teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında her zaman desteğini gördüğüm ve ayrıca karşılaşmış olduğum problemlere yönelik bilimsel açıdan çözüm üretme yaklaşımını bana sürekli aktaran değerli hocam, Supmeca/Paris, School of Mechanical and Manufacturing Engineering öğretim üyesi Prof. Dr. Emin BAYRAKTAR'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmasının oluşturulması esnasında vermiş olduğu desteklerden dolayı Araş. Gör. Dr. H. Ersen BALCIOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Çalışmamın teknik aşamalarının gerçekleştirilmesi için; kompozit plakaların teminini sağlayan Izoreel firmasına, viskoelastik bantın tedarikini sağlayan SDS Satış Destek Sistemleri firmasına ve Onur ÇULHA ile Cengiz İNCEDERE'ye, pres üretimini sağlayan Hidro Metal firmasına ve Salim POLAT'a, proses ekipmanları ve yazılımını tedarik ettiğimiz Gentek Elektronik firmasına, su jeti ile kesim işlemlerinde destek olan Kardeş Cam firmasına ve İbrahim TÜRKYILMAZ'a, çekme testleri esnasında tecrübeleriyle destek olan BESMAK firmasına ve Murat ÖZBEN'e, sonlu elemanlar modellemesinde destek sağlayan A-Z Tech firmasına ve Zeki ERMAN'a, BİAS Mühendislik firmasına ve Berkman KANTAR'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca sabırlı bir şekilde sürekli yanımda olan, her türlü zorluğun üstesinden gelmemde büyük katkıları bulunan ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Melike ENGİNSOY'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Kasım 2017

Halil Murat ENGİNSOY

Makine Yük. Müh.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|  |      |
|--|------|
| ÖZET.....  | v    |
| ABSTRACT .....   | vi   |
| TEŞEKKÜR .....   | vii  |
| İÇİNDEKİLER.....   | viii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....  | xi   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....   | xiii |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....   | xxiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                       | xxvi |
| 1. GİRİŞ .....   | 1    |
| 1.1. Ön Bilgiler .....   | 1    |
| 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....                             | 7    |
| 1.3. Literatür Araştırması.....                                    | 8    |
| 2. KURAMSAL TEMELLER .....   | 23   |
| 2.1. Sürekli Ortam Mekaniğinin Temelleri .....                     | 24   |
| 2.1.1. Yapısal Denklemlerin Genel Esasları .....                   | 25   |
| 2.1.2. Şekil Değiştirme Kinematığı ve Oluşumunun İncelenmesi ..... | 27   |
| 2.1.3. Gerilme Oluşumlarının İncelenmesi .....                     | 29   |
| 2.1.4. Yapısal Denklemlerin Oluşumu .....                          | 30   |
| 2.2. Reolojik Modellerin İncelenmesi .....                         | 31   |
| 2.2.1. Reolojik Modeller ve Temel Bileşenleri .....                | 32   |
| 2.2.2. Maxwell Modeli .....  | 33   |
| 2.2.3. Kelvin Modeli .....   | 34   |
| 2.2.4. Genelleştirilmiş Modeller.....                              | 35   |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.3.     | Paralel Ağ Modelleri ve Bileşenlerinin İncelenmesi .....           | 36 |
| 2.3.1.   | Elastik Davranışın Model Teorileri .....                           | 37 |
| 2.3.1.1. | Yeoh Hiperelastik Modeli .....                                     | 37 |
| 2.3.1.2. | Mooney-Rivlin Hiperelastik Modeli .....                            | 38 |
| 2.3.1.3. | Ogden Modeli .....   | 39 |
| 2.3.2.   | Akış Karakterinin Model Teorileri .....                            | 39 |
| 2.3.2.1. | Bergstrom-Boyce Akış Modeli .....                                  | 39 |
| 2.3.2.2. | Sinüs-Hiperbolik Akış Modeli .....                                 | 40 |
| 2.3.2.3. | Güç Kanunu Akış Modeli .....                                       | 40 |
| 2.3.2.4. | Şekil Değişimli Güç Kanunu Akış Modeli .....                       | 40 |
| 2.4.     | Malzeme Parametrelerinin Deney Verileri Aracılığıyla Oluşumu ..... | 41 |
| 2.4.1.   | Model Parametrelerinin Tanımlanması .....                          | 41 |
| 2.4.2.   | Model Parametrelerinin Optimizasyon Süreci .....                   | 42 |
| 2.5.     | Viskoelastik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi .....   | 43 |
| 2.5.1.   | Genel Modelleme Aşamaları .....                                    | 43 |
| 2.5.2.   | Viskoelastik Modelleme Süreci .....                                | 44 |
| 3.       | MATERYAL VE METOT .....  | 46 |
| 3.1.     | Deneysel Çalışmalar .....  | 46 |
| 3.1.1.   | Deney Numunesi Tasarımı .....                                      | 46 |
| 3.1.2.   | Deney Numunesi Üretimi ve İsimlendirme Sistemi .....               | 52 |
| 3.1.3.   | Yapısal Bileşenlerin Deneyleri .....                               | 56 |
| 3.1.3.1. | Kompozit Malzeme Deneyleri .....                                   | 56 |
| 3.1.3.2. | Viskoelastik Deneyler .....  | 59 |
| 3.1.4.   | Yapısal Deneyler .....   | 65 |
| 3.1.4.1. | Ön Gerilme Deney Düzenineğinin Tasarımı ve Üretimi .....           | 65 |
| 3.1.4.2. | Ön Gerilmeli Yapısal Birleştirmelerin Gerçekleştirilmesi .....     | 69 |
| 3.1.4.3. | Yapı Üzerinde Eksantrik Yüklemelerin Oluşumu .....                 | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2. Analitik Çalışmalar .....   | 71  |
| 3.2.1. Malzeme Model Parametrelerinin ve Kalibrasyon Hata Değerlerinin Elde Edilmesi .....   | 71  |
| 3.2.2. Optimum Malzeme Modelinin Belirlenmesi ve Teorik Açıklaması .....   | 75  |
| 3.3. Nümerik Çalışmalar .....  | 76  |
| 3.3.1. Yapısal Bileşenlerin Modellenmesi .....   | 76  |
| 3.3.2. Yapının Bütünsel Olarak Modellenmesi .....  | 78  |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....  | 80  |
| 4.1. Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve Maksimum Yük Taşıyan Numunelerin Tespiti .....   | 80  |
| 4.1.1. 16a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi ...  | 80  |
| 4.1.2. 20a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi ...  | 87  |
| 4.1.3. 24a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi ...  | 93  |
| 4.1.4. 28a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi .  | 100 |
| 4.2. Maksimum Yük Taşıyan Numunelerin Nümerik Analizlerle Karşılaştırmalı Sonuçları .....  | 106 |
| 4.3. Öneriler .....  | 114 |
| 5. KAYNAKLAR .....   | 115 |
| 6. EKLER .....   | 121 |
| 6.1. EK-1 Farklı Deformasyon-Şekil Değiştirme Hızları Altında Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışlarının Deneysel ve Analitik Olarak Karşılaştırılmaları ..... | 121 |
| 6.2. EK-2 Farklı Deformasyon-Şekil Değiştirme Hızları Altındaki Malzeme Modellerine Ait Modelleme Parametreleri .....  | 153 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 160 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge  | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 3.1 Tasarlanan deney numunesini oluşturan oransal geometrik parametreler .....   | 53    |
| Çizelge 3.2 Tasarımı yapılan deney numunelerinin boyut değerleri ve isimlendirmeleri .....   | 53    |
| Çizelge 3.3 Tabakalı kompozit plakaların ilgili ASTM standartlarına göre mekanik özellikleri ve değerleri.....   | 58    |
| Çizelge 3.4 VHB 4950 bant için üretici firma tarafından verilen dinamik ve statik olarak yapışma performansları değerleri [77] .....   | 61    |
| Çizelge 3.5 VHB 4950 bant için üretici firma tarafından verilen fiziksel özellikleri [77] .....  | 61    |
| Çizelge 3.6 VHB 4950 bantı için farklı malzeme modellerinden elde edilen % 10 hata değeri altındaki kalibrasyon sonuçları (% 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değişimi).....  | 72    |
| Çizelge 3.7 Farklı deformasyon ve farklı gerinim seviyelerinde bulunan VHB 4950 için model kalibrasyon hata değerleri .....  | 73    |
| Çizelge 3.8 Çevrimsel yükleme - boşaltma testleri ile elde edilen 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom - Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ Model parametreleri (% 50 deformasyon – $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değişimi oranı koşulları altında) ..... | 75    |
| Çizelge 4.1 Maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin karşılaştırılması .....   | 110   |
| Çizelge 6.1 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....   | 153   |
| Çizelge 6.2 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....   | 153   |
| Çizelge 6.3 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....  | 154   |
| Çizelge 6.4 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....   | 154   |
| Çizelge 6.5 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....   | 155   |
| Çizelge 6.6 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akışı için göre farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri .....  | 155   |

|  |     |
|--|-----|
| Çizelge 6.7 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....          | 156 |
| Çizelge 6.8 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....                | 156 |
| Çizelge 6.9 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....                | 157 |
| Çizelge 6.10 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....               | 157 |
| Çizelge 6.11 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki parametreleri ..... | 158 |
| Çizelge 6.12 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki parametreleri ..... | 158 |
| Çizelge 6.13 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....          | 159 |
| Çizelge 6.14 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri.....          | 159 |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil   | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 1.1 Polimerlerin yapı ve özelliklerine göre sınıflandırılması [1, 2] .....  | 3     |
| Şekil 1.2 Yıllara göre dünya genelinde toplam plastik üretim miktarlarının değişimi [5].....  | 5     |
| Şekil 1.3 Yıllara göre Dünya ve Avrupa genelindeki toplam üretim miktarlarının değişimi [6]<br>.....  | 5     |
| Şekil 2.1 Yapının referans ve anlık durumlarına ait hareket/şekil değişiminin zamanın bir<br>fonksiyonu olarak şematik gösterimi [2].....                                   | 27    |
| Şekil 2.2 Şekil değişimine uğramış yapısal bileşenin üzerinde etki eden dış kuvvetler ve tepki<br>olarak oluşan iç kuvvetlerin şematik gösterimi [2] .....                  | 29    |
| Şekil 2.3 Reolojik modelin temel bileşenleri, (a) Yay (Hooke modeli) ve (b) Sönümleyici<br>(Newton modeli) [4].....   | 33    |
| Şekil 2.4 Maxwell modeline ait; (a) Şematik görünümü, (b) Sürünme test davranışı, (c)<br>Gevşeme test davranışı [4] .....   | 33    |
| Şekil 2.5 Kelvin modeline ait; (a) Şematik görünümü, (b) Sürünme test davranışı, (c)<br>Gevşeme test davranışı [4] .....  | 34    |
| Şekil 2.6 (a) Genelleştirilmiş Maxwell ve (b) Genelleştirilmiş Kelvin modellerine ait<br>zincirlerin oluşumu [4] .....  | 35    |
| Şekil 2.7 Viskoelastik sonlu elemanlar analizine ait modelleme algoritması .....  | 45    |
| Şekil 3.1 Polimerlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesinde kullanılan<br>yükleme modelleri [2] .....   | 47    |
| Şekil 3.2 Problemin çözümü için önerilen yapının şematik gösterimi.....   | 50    |
| Şekil 3.3 Tasarlanmış eksantrik yükleme deney numunesinin şematik gösterimi .....   | 51    |
| Şekil 3.4 Tabakalı kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan<br>ASTM standartlarına göre deney numunelerinin boyutlandırmaları .....            | 57    |
| Şekil 3.5 Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında oluşan adhezyon ve kohezyon<br>kuvvetlerinin şematik gösterimi [80] .....   | 59    |
| Şekil 3.6 Yapısal birleştirmelerde kullanılan viskoelastik yapıdaki VHB 4950 çift taraflı<br>bantının yüzey enerjisi ve adhezyon kuvveti değişimlerini gösterimi [77] ..... | 60    |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.7 Akrilik, kauçuk ve silikon esaslı viskoelastik bantların karşılaştırmalı yapışma dayanımları [80] .....   | 60 |
| Şekil 3.8 Farklı şekil değişim oranları ( $0,05 s^{-1}$ ve $0,01 s^{-1}$ ) ve farklı (a) % 50 deformasyon, (b) % 100 deformasyon, (c) % 150 deformasyon, (d) % 200 deformasyon koşulları altındaki çevrimsel yükleme - boşaltma testlerine ait nominal gerilme - gerinim seviyesi ..... | 64 |
| Şekil 3.9 Paralel Reolojik Ağ Modeli Sistemi'nin şematik gösterimi .....  | 73 |
| Şekil 4.1 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 81 |
| Şekil 4.2 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 81 |
| Şekil 4.3 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 82 |
| Şekil 4.4 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 82 |
| Şekil 4.5 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 83 |
| Şekil 4.6 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 83 |
| Şekil 4.7 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 84 |
| Şekil 4.8 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 84 |
| Şekil 4.9 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 85 |
| Şekil 4.10 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 85 |
| Şekil 4.11 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 86 |
| Şekil 4.12 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 86 |
| Şekil 4.13 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A1 numunesinin Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 87 |
| Şekil 4.14 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 88 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.15 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 88 |
| Şekil 4.16 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 89 |
| Şekil 4.17 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 89 |
| Şekil 4.18 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 90 |
| Şekil 4.19 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 90 |
| Şekil 4.20 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 91 |
| Şekil 4.21 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 91 |
| Şekil 4.22 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı ..... | 92 |
| Şekil 4.23 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı ..... | 92 |
| Şekil 4.24 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı ..... | 93 |
| Şekil 4.25 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 94 |
| Şekil 4.26 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 94 |
| Şekil 4.27 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 95 |
| Şekil 4.28 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 95 |
| Şekil 4.29 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 96 |
| Şekil 4.30 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 96 |
| Şekil 4.31 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 4.32 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 97  |
| Şekil 4.33 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 98  |
| Şekil 4.34 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 98  |
| Şekil 4.35 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 99  |
| Şekil 4.36 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A12 numunesinin Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) davranışı ..... | 99  |
| Şekil 4.37 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 100 |
| Şekil 4.38 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 101 |
| Şekil 4.39 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 101 |
| Şekil 4.40 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 102 |
| Şekil 4.41 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 102 |
| Şekil 4.42 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 103 |
| Şekil 4.43 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 103 |
| Şekil 4.44 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 104 |
| Şekil 4.45 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....    | 104 |
| Şekil 4.46 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 105 |
| Şekil 4.47 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 105 |
| Şekil 4.48 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....   | 106 |



|  |     |
|--|-----|
| Şekil 4.49 Maksimum yük taşıyan 16a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 108 |
| Şekil 4.50 Maksimum yük taşıyan 20a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 108 |
| Şekil 4.51 Maksimum yük taşıyan 24a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 109 |
| Şekil 4.52 Maksimum yük taşıyan 28a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı .....  | 109 |
| Şekil 6.1 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....  | 121 |
| Şekil 6.2 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....  | 121 |
| Şekil 6.3 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 122 |
| Şekil 6.4 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 122 |
| Şekil 6.5 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 123 |
| Şekil 6.6 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 123 |
| Şekil 6.7 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 124 |
| Şekil 6.8 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 6.9 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....   | 125 |
| Şekil 6.10 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....  | 125 |
| Şekil 6.11 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 126 |
| Şekil 6.12 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 126 |
| Şekil 6.13 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 127 |
| Şekil 6.14 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 127 |
| Şekil 6.15 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 128 |
| Şekil 6.16 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması ..... | 128 |
| Şekil 6.17 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....   | 129 |
| Şekil 6.18 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....   | 129 |
| Şekil 6.19 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....  | 130 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 6.20 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....                            | 130 |
| Şekil 6.21 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....                            | 131 |
| Şekil 6.22 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....                            | 131 |
| Şekil 6.23 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....                            | 132 |
| Şekil 6.24 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması .....                            | 132 |
| Şekil 6.25 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 133 |
| Şekil 6.26 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 133 |
| Şekil 6.27 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 134 |
| Şekil 6.28 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 134 |
| Şekil 6.29 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 135 |
| Şekil 6.30 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 6.31 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....   | 136 |
| Şekil 6.32 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....   | 136 |
| Şekil 6.33 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....  | 137 |
| Şekil 6.34 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....  | 137 |
| Şekil 6.35 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 138 |
| Şekil 6.36 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 138 |
| Şekil 6.37 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 139 |
| Şekil 6.38 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 139 |
| Şekil 6.39 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 140 |
| Şekil 6.40 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 140 |
| Şekil 6.41 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....        | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 6.42 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                     | 141 |
| Şekil 6.43 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 142 |
| Şekil 6.44 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 142 |
| Şekil 6.45 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 143 |
| Şekil 6.46 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 143 |
| Şekil 6.47 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 144 |
| Şekil 6.48 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                    | 144 |
| Şekil 6.49 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....  | 145 |
| Şekil 6.50 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....  | 145 |
| Şekil 6.51 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 146 |
| Şekil 6.52 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 6.53 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 147 |
| Şekil 6.54 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 147 |
| Şekil 6.55 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 148 |
| Şekil 6.56 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... | 148 |
| Şekil 6.57 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 149 |
| Şekil 6.58 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 149 |
| Şekil 6.59 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 150 |
| Şekil 6.60 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 150 |
| Şekil 6.61 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 151 |
| Şekil 6.62 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve $0,05 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 151 |
| Şekil 6.63 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve $0,01 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.....                | 152 |

Şekil 6.64 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması..... 152



## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim   | Sayfa |
|---|-------|
| Resim 3.1 Yapıştırıcı bant ile yapılan çeşitli uygulamalara ait örnekler [80].....  | 48    |
| Resim 3.2 Çalışma kapsamında incelenen problemin uygulama alanlarına ait örnek gösterimi [81] .....   | 49    |
| Resim 3.3 E-cam ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit plakalar .....   | 52    |
| Resim 3.4 Kesim sonrası oluşan çapakların giderilmesini sağlayan taş motoru.....  | 55    |
| Resim 3.5 3M™ firması tarafından üretilen; (a) VHB 4950 akrilik çift taraflı viskoelastik yapıştırıcı bant, (b) Ön yüzey hazırlama işlemi için kullanılan Primer 94 .....   | 55    |
| Resim 3.6 Çevrimsel yükleme-boşaltma testleri için numune ve düzenek sisteminin genel görünümü .....  | 63    |
| Resim 3.7 Yapısal birleştirmeler üzerinde ön gerilme uygulanmasını sağlayan hidrolik pres makinesi .....  | 65    |
| Resim 3.8 Hidrolik sistem üzerinde bağlanan basınç vericisi.....  | 67    |
| Resim 3.9 Hidrolik sistem üzerinde bağlanan mekanik ve elektronik devre elemanları .....  | 67    |
| Resim 3.10 Sistemdeki basınç vericisinde elde edilen değeri gösteren dijital indikatör .....  | 68    |
| Resim 3.11 Hidrolik sisteme ait kontrol verilerinin iletişimini sağlayan Usb-RS485 adaptörü .....   | 68    |
| Resim 3.12 Bilgisayar kontrollü hidrolik preste, (a) Ön gerilme uygulanacak birleştirilmiş yapısal numunelerin genel görünüşü, (b) Yapısal numuneler üzerinde ön gerilmenin uygulanması .....   | 69    |
| Resim 3.13 Çekme testi altındaki deney numunesinin, (a) Test sonucundaki durumu ve (b) Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucu (G1-20a4 numunesi). .....   | 70    |
| Resim 3.14 Farklı yapısal bileşimlere ait çekme testi esnasında oluşan eksantrik yüklemelere tepki olarak bant üzerinde ortaya çıkan viskoelastik şekil değişimleri .....   | 71    |
| Resim 3.15 Deneysel ve tahmin edilen model parametreleri için Mcalibration® yazılımında karşılaştırma sonuçları.....  | 74    |
| Resim 3.16 Abaqus®/Explicit ile yüklemeyi oluşturan yapısal alt bileşenlerin oluşum aşamaları: (a) Geometrik modelleme, (b) Tabakaların oluşturulması, (c) Çözüm adımını oluşturulması, (d) Çözüm ağının hazırlanması, (e) Gerilme-şekil değişimi analizi sonucu .... | 77    |



Resim 3.17 Abaqus®/Explicit ile VHB 4950 bantının oluşum aşamaları: (a) VHB 4950 bantının geometrik modellemesi, (b) İlgili malzeme parametrelerinin ve sınır koşullarını çözümlerini oluşturulması, (c) Çözümler ağının hazırlanması, (d) Viskoelastik bant üzerinde oluşan gerilme Şekil değişimi analizi sonucu ..... 78

Resim 3.18 Abaqus®/Explicit ile yapısal tasarımı bütöl olarak modellenmesi:(a) Yapısal alt bileşenler ve VHB 4950 bantı arasındaki temas ilişkilerinin oluşumu, (b) Yükleme ve sınır koşullarının oluşumu, (c) Çözümler ağının yapılması, (d) Yapı üzerinde oluşan gerilme-Şekil değişimi analizi sonucu ..... 79



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| <b>Simgeler</b>                 | <b>Açıklama</b>                            |
|---------------------------------|--|
| $\Omega_0$                      | Yapısal şekil değiştirme fonksiyonu        |
| $t$                             | Zaman değişkeni                            |
| $\chi$                          | Vektör fonksiyonu                          |
| $\mathbf{x}$                    | Kuvvetin vektörel konumu                   |
| $\mathbf{F}$                    | Şekil değiştirme gradyeni                  |
| $\mathbf{X}$                    | Yapının referans durumu                    |
| $d\mathbf{f}$                   | İç kuvvet                                  |
| $\mathbf{n}$                    | Yüzey normali                              |
| $\sigma$                        | Cauchy gerilmesi                           |
| $\hat{\sigma}(\mathbf{F})$      | Şekil değişimi gradyeni fonksiyonu         |
| $\dot{\mathbf{F}}$              | Şekil değişimi oranını                     |
| $\sigma(\mathbf{t})$            | Zamana bağlı gerilme                       |
| $\varepsilon(\mathbf{t})$       | Zamana bağlı şekil değişimi                |
| $\mathbf{E}$                    | Elastisite modülü                          |
| $\dot{\varepsilon}(\mathbf{t})$ | Zamana bağlı şekil değiştirme oranı        |
| $\varepsilon_E(\mathbf{t})$     | Yayın zamana bağlı şekil değişimi          |
| $\varepsilon_n(\mathbf{t})$     | Sönümleyicinin zamana bağlı şekil değişimi |
| $\sigma_E(\mathbf{t})$          | Yaydaki zamana bağlı oluşan gerilme        |
| $\Psi$                          | Helmholtz serbest enerjisi                 |
| $\theta_0$                      | Referans yapıdaki sıcaklık                 |
| $\eta_0$                        | Referans hacimdeki entropi                 |
| $\kappa$                        | Hacim (Bulk) modülü                        |
| $\lambda$                       | Temel gerinim oranları                     |
| $\dot{\gamma}^p$                | Akış oranı                                 |
| $\lambda_L$                     | Moleküler zincir gerinimi                  |
| $\tau$                          | Kayma gerilmesi                            |

|                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| $\tau_{base}$    | Akış direnim gerilmesi     |
| $\dot{\gamma}^0$ | Girişim frekansı           |
| $\Delta G$       | Aktivasyon enerjisi        |
| $k_B$            | Boltzmann sabiti           |
| $\hat{\tau}$     | İzotropik kayma direnci    |
| $\epsilon^p$     | Mises şekil değişimi       |
| $\hat{\epsilon}$ | Şekil değişimi geçişi      |
| $E_1$            | Boyuna elastisite modülü   |
| $\nu_{12}$       | Ana poisson oranı          |
| $X_t$            | Boyuna çekme mukavemeti    |
| $E_2$            | Enine elastisite modülü    |
| $Y_t$            | Enine çekme mukavemeti     |
| $X_c$            | Boyuna basma mukavemeti    |
| $Y_c$            | Enine basma mukavemeti     |
| $G_{12}$         | Düzlemsel kayma modülü     |
| $S$              | Düzlemsel kayma mukavemeti |
| $V_f$            | Fiber hacim oranı          |
| $m_f$            | Fiber kütle oranı          |
| $\rho_f$         | Fiber yoğunluğu            |

### **Kısaltmalar Açıklama**

|               |  |
|---------------|--|
| <b>PVC</b>    | Polivinilklorür  |
| <b>EAP</b>    | Elektroaktif polimerler  |
| <b>HVH</b>    | Hiperelasto-Visko-Histerezis   |
| <b>PUR</b>    | Poliüretan   |
| <b>UHMWPE</b> | Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen)   |
| <b>FEA</b>    | Finite Element Analysis (Sonlu elemanlar analizi)                                |
| <b>PSA</b>    | Pressure Sensitive Adhesive (Basınca duyarlı yapıştırıcı)                        |
| <b>ASTM</b>   | American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği) |
| <b>DMA</b>    | Dinamik Mekanik Analizör   |
| <b>TSE</b>    | Türk Standartları Enstitüsü  |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Ön Bilgiler

Evrenin meydana gelişinden hemen sonra büyük bir enerji açığa çıkmıştır. Bu büyük enerjinin farklı dönüşümleri sonucunda ise madde meydana gelmiştir. Madde ortamının insanlıkla çeşitli etkileşimlerini konu alan tüm araştırmalarda, insanların her zaman için yaşamış oldukları maddesel ortamı anlama ve kontrol etme sürecinde oldukları gözlenmiştir. Bu nedenle bilinen tarihten günümüze kadar olan süreçteki tüm insanlar; barınma, yeme-içme, giyinme, avlanma, savunma, seyahat, iletişim gibi öncelikli temel ihtiyaçlarını gidermede etkin bir şekilde farklı maddelerden oluşan malzemeleri kullanma ve geliştirme çabası içinde bulunmuşlardır. Ayrıca malzemeleri farklı amaçlarla kullanmayı ve geliştirmeyi öğrenen insanların kurmuş oldukları uygarlıklar tarihsel olarak incelendiğinde, elde etmiş oldukları malzeme bilgilerinin kurmuş oldukları uygarlıklara köklü bir etkisi olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Böylece insanlar ilk olarak çevresindeki mevcut bulunan malzemeleri kullanmayı ve ardından da geliştirmenin yollarını öğrenerek yani maddeye hâkim olarak kendi uygarlıklarını kapsamlı olarak şekillendirebilmişlerdir.

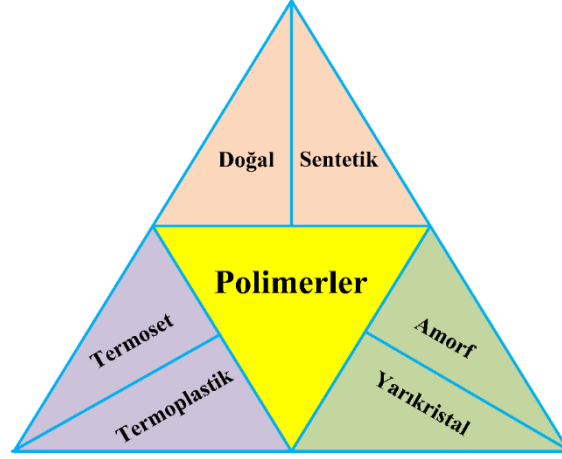
Malzeme bilgisinin tarihi en az insanlık tarihi kadar eskiye dayanmaktadır. Doğada kullanıma hazır olarak bulunan çeşitli malzemeler gün geçtikçe artan ve gelişen ihtiyaçları karşılayamaz duruma geldiğinde, mevcut malzemelerin yerine bu ihtiyaçları karşılayabilecek yeni malzemelerin elde edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Yani doğada hazır olarak bulunan ancak işlenmesi gerekli olan ham maddelerin kullanımı söz konusu olmuştur. Bu nedenle günümüze kadar malzeme bilimi sürekli bir gelişim içerisinde olmuştur. Bu gelişimin sistemli olarak gerçekleşebilmesi için çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır.

Temelde madde fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerine göre sınıflandırabilmektedir. Ancak günümüzde malzeme bilimi genel bir oluşum olarak ele alındığında metaller, seramikler, polimerler, kompozit malzemeler ve bunların bileşimi ile oluşturulan yarı iletkenler ve ileri malzemeler olmak üzere kabul gören bu türde özellikli bir sınıflandırmaya sahiptirler [1]. Yeni malzemelerin geliştirimi için çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal süreçlerden oluşan farklı teknikler keşfedilmiştir. Böylece farklı özelliklere sahip yeni tarz malzemeler insanlığın kullanımına sunulmuştur. Ancak yeni malzemelerin elde edilmesi ise farklı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Üretilen yeni malzeme nasıl bir davranışa sahiptir? Kullanım yerine uygun olarak üretilmiş midir? Üretim maliyetlerinin malzemenin kullanım alanları üzerindeki etkileri hangi düzeydedir? Fiziksel, kimyasal, mekanik vb. özellikleri nelerdir?

Kullanım koşulları altında uygun bir karaktere ve ihtiyaçlara cevap verebilecek niteliklere sahip midir? Yeni türdeki malzemeler için bu tarzda sorulabilecek tüm sorulara cevap verme zorunluluğu doğmuş olup, yeni üretilen malzemenin her yönüyle belirlenmesi gerekmiştir. Bu çalışma kapsamında, polimer malzemeler içerisinde yer alan ve farklı fiziksel şartlandırmalar altındaki akrilik yapıştırıcı bant için bu soruların cevapları deneysel, analitik ve nümerik yöntemlerle detaylı olarak araştırılmıştır.

*Polimer* sözcüğü bileşik bir yapıda olup, *poli* ve *mer* sözcüklerinin birleşiminden meydana gelmiştir. *Mer* sözcüğü parça, bileşen, kısım anlamlarına gelen Yunanca sözcük *Meros*'tan türemiştir. *Poli* sözcüğü ise çok, çoklu, birden çok gibi anlamları vardır. Polimer sözcüğü böylece çok parçalı, çoklu bileşenli veya çoklu kısım şeklindeki anlamlarla polimerler hakkında bir ön tanımlama göstermektedir. Polimerler kendilerini oluşturan alt tekil bileşenlerden oluşan (monomer) uzun ve geniş molekül zincirleri ve yapılarına sahip çoklu yapıdaki malzemelerdir. Ayrıca monomerlerin birleşiminde zayıf van der Waals kuvvetleri de etki etmektedir. Tekil bileşenler yani monomerler, bünyesinde farklı türdeki atomların kovalent bağı ile birleşerek oluşan yapılardır. Bu yapıların büyük bir kısmı organik bileşiklerden oluşmakta olup, çoğu bünyesinde karbon (C), hidrojen (H), silisyum (Si), azot (N) gibi elementlerin atomlarını bulundurmaktadırlar [1]. Polimerler, ağırlıklarına göre değerlendirildiğinde rijitlikleri yüksek seviyelere getirilebilmekle beraber kolayca şekillendirilebilme özelliğine, sünek bir yapıda olduğundan dolayı sahiptirler. Fiziksel özellikleri olarak, elektrik/ısı iletkenliklerinin düşük olması ve manyetik alanlardan etkilenmemeleri bulunmaktadır. Kimyasal özellikleri olarak da, kimyasal tepkimelere girmeme eğilimleri bulunmaktadır. Mekanik özellikleri ise moleküller arasındaki zayıf etkileşimlerden dolayı diğer malzemelere göre daha farklı karakteristik bir yapıya sahiptir. Nem, sıcaklık, basınç, test esnasında uygulanan şekil değişim hızı gibi parametrelerin değişimine karşı duyarlı olduğundan değişken sonuçlar göstermektedir ki, bu da bu malzeme grubunun mekanik özelliklerinin araştırılmasını önemli ve güncel bir alan olarak tutmaktadır [1, 2].

Polimerler geniş bir yelpazede sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar genel olarak yapılarına ve özelliklerine göre olmakla birlikte üç ana grupta olacak şekilde; doğal-sentetik, termoset-termoplastik, amorf-yarı kristal oluşlarına göre de kabul gören genel bir sınıflandırmaya sahiptirler. Bu sınıflandırma özet olarak Şekil 1'de gösterilmiştir [1, 2].



Şekil 1.1 Polimerlerin yapı ve özelliklerine göre sınıflandırılması [1, 2]

Polimer malzemelerin geçmişi çok eski dönemlere dayanmaktadır. Canlıların var oluşuna kadar giden eski bir geçmişe sahiptir. Çünkü bitki, hayvan, insanlar gibi tüm canlıların bünyesinde yani dokularında (protein, DNA, selüloz vb.) doğal polimerler bulunmaktadır. Günümüzde üretilen çeşitli sentetik polimerlerin özellikle biyopolimer olarak insanların çeşitli rahatsızlıklarının tedavisinde biyomedikal amaçlarla kullanabilme araştırmaları insanlar açısından polimerlere verilen büyük bir önemin ifadesi olarak gösterilebilir. Bu nedenle ilk insanlardan günümüze kadar insanlar bu malzeme türü ile çeşitli şekillerde etkileşim halinde olmuşlardır. Bu etkileşim neticesinde polimer malzemeler de, değişim ve gelişim içinde bulunmuştur.

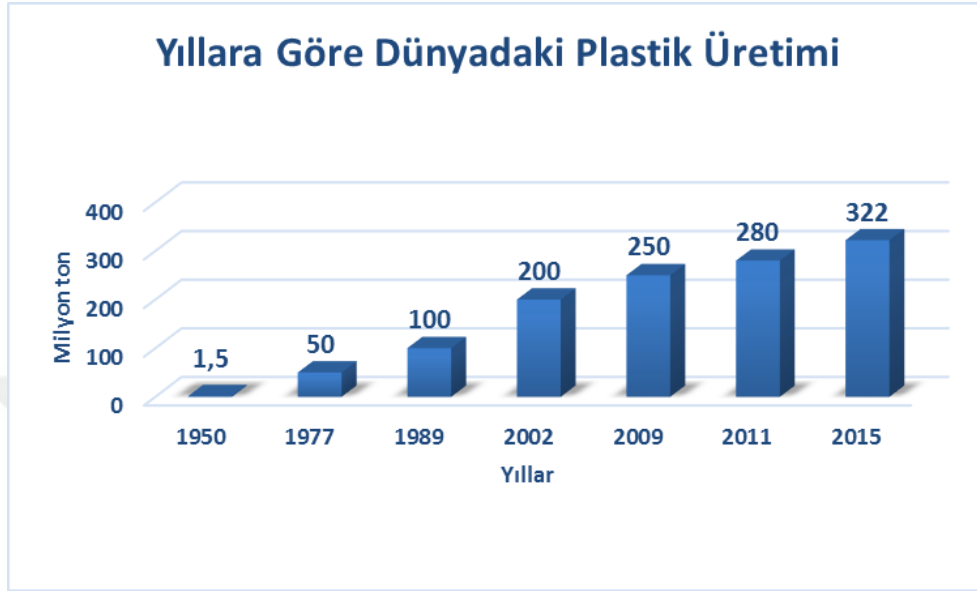
Bilimsel açıdan polimer malzemelerin tarihsel gelişimleri incelendiğinde geçmişi M.Ö. 4000 yıllarına kadar dayanmaktadır. İlkel olarak doğal reçineler yardımıyla yapılan çömlek ve benzeri araç-gereçlerin doğal polimerler aracılığıyla yapıldıkları belirlenmiştir. M.Ö. 1350 yıllarında ise Kral Tutankhamun zamanında yapılan çeşitli yapılarda yapıştırıcı bir unsur olarak kullanıldığı bilinmektedir [3]. Dünyanın farklı bölgelerindeki insanlar, doğal olarak bulunan polimerlerden çok çeşitli şekillerde faydalanmaya devam etmişlerdir. Yazılı kayıtlar açısından ise, 16. Yüzyılda İngiliz kâşifleri tarafından Mayalıların kauçuk ağaçlarından elde ettikleri kauçuk malzemesini kullandıkları belirlenmiştir. Genel olarak malzemelerin mekanik özellikleri hakkındaki ilk yazılı çalışmalarda bu kadar eskiye gidilememekle beraber, malzemelerin incelenmesinde 17. ve 18. Yüzyıllarda belirlenen ve kabul gören malzemenin Hooke elastik katısı ve Newton'un viskoz akış özelliklerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. İlk olarak 1835 yılında Wilhelm Weber, ipek iplikler üzerinde farklı mekanik testler yapmıştır. 1839 yılında ise Charles Goodyear tarafından doğal kauçuğa eklenen sülfürün belirli bir sıcaklıkta ısıtılması neticesinde daha dayanıklı bir yapıya dönüştürme işlemi olan ve

vulkanizasyon adı verilen kimyasal bir süreç tekniği keşfedilmiştir. 1862 yılında Alexander Parks ilk insan yapımı olan ve Parkesine isimli polimeri üretmeyi başarmıştır. 1867 yılında ise James Clark Maxwell, akışkanların tanımlanması için gereken elastik özellikleri belirlemiştir. Aynı tarihlerde Lord Kelvin tarafından da benzer denklemler geliştirilmiştir. Ardından 1874 yılında Ludwig Boltzman tarafından lineer viskoelastik denklemler geliştirilmiştir [4]. 1907 yılında ise Leo Bakalite, kendi ismiyle anılan ilk tam sentetik malzeme olan Bakalit malzemesini bulmuştur. 1925 yılına gelindiğinde polimer malzemelerin uzun makro molekül zincirlerinden oluştuğu X-ray cihazları tarafından tespit edilmiştir. Ardından 1927 yılında ise büyük miktarlarda PVC üretimine sanayi odaklı olarak başlanmıştır. Bu durumun ardından polimer malzeme teknolojisi artan bir hıza kavuşmuş olup, 1930 yılında polistiren, ardından 1933 yılında polietilen ve 1938'de ise poliamid ve floropolimer malzemeleri bulunmuştur. II. Dünya savaşının ardından galip devletlerin çoğunlukta olduğu yani özellikle sanayileşmesini hızlandıran ülkeler polimer malzemeler üzerinde daha geniş çalışmalara başlamışlardır. Bu sürecin ardından 1971 yılında savunma sanayinde önemli bir kullanım alanı olan Kevlar malzemesi bulunmuştur. 1976 yılına gelindiğinde ise sanayide en yaygın mühendislik malzemesi olan çeliği geride bırakarak yeni en yaygın malzeme konumuna polimerler ulaşmıştır. 1980'lerin başına kadar üretilen polimerlerin büyük bir çoğunluğu ısı ve/veya elektriği iletmemeye özelliğine sahipti. Ancak bu yıllarda polimerler üzerinde yapılan geliştirme çalışmaları neticesinde ısı ve elektriği iletebilen özellikte polimerler geliştirilmiştir [2]. Bu tarihten günümüze kadar olan süreçte ise biyomedikal uygulamalarda kullanılabilecek sentetik polimerlerin geliştirme çabaları yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Polimer malzemelerin üretim tekniklerinde de büyük bir gelişim bulunmaktadır. Günümüzde kullanılan bu üretim yöntemlerine kısaca değinecek olursak, temelde iki ana yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler; katılım polimerizasyonu ve yoğunlaşma polimerizasyonudur. Katılım polimerizasyonunda, monomerler çeşitli kimyasal tepkimelerle birbirlerine bağlanarak uzun makro moleküllere sahip polimerler üretilebilmektedir. Yoğunlaşma polimerizasyonunda ise, çeşitli yoğunlaşma tepkimeleri neticesinde polimer molekülleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca polimerlerin üretimine mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirmek için çeşitli dolgu malzemeleri, dengeleyici (stabilizatörler), alev geciktiriciler, yumuşatıcılar (plastikleştirici) ve renklendiriciler de katılmaktadır [1].

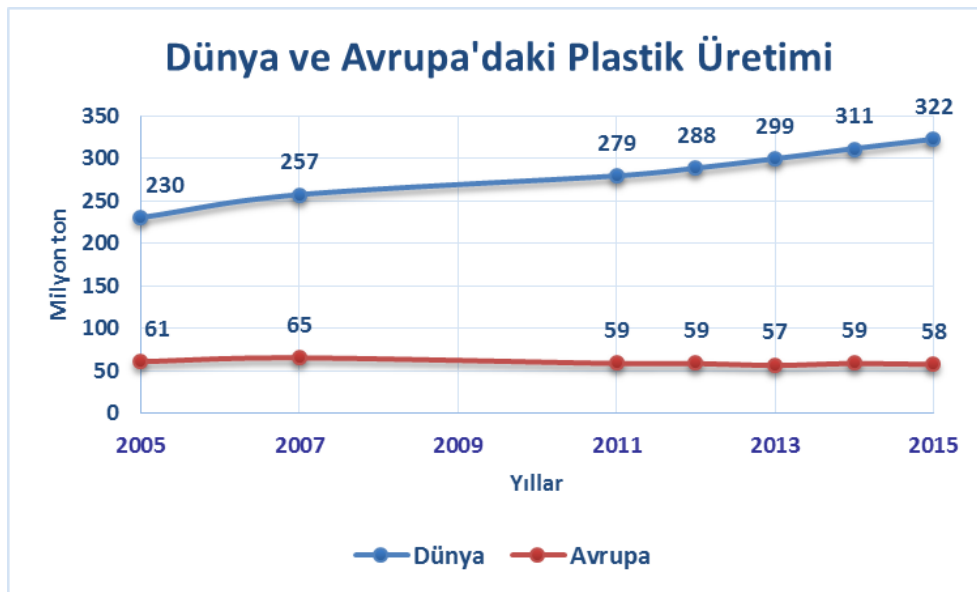
Polimer malzemelerin üretimleri farklı parametreler çerçevesinde incelenecek olursa, polimerler hakkında bazı önemli değerlendirmelerde bulunulabilir. Günümüzde polimer malzemelerin en önemli ve büyük bir üretim hacmine sahip mühendislik malzemeleri olduğu

gerçeği göz önünde tutulursa, üretimini yapan sanayi kuruluşlarının ve bulunduğu ülkelerin teknolojik seviyelerinin gelişimi hakkında önemli veriler elde edilerek ileri teknolojik düzeyleri hakkında çeşitli bulgular elde edilebilir. Örneğin plastiklerin, 1950 yılından günümüze kadarki süreçte dünya genelindeki üretim miktarlarının değişimi Şekil 1.2’de verilmiştir [5].



Şekil 1.2 Yıllara göre dünya genelinde toplam plastik üretim miktarlarının değişimi [5]

Şekil 1.2’de görüldüğü üzere 1950-2002 yılları arasında çok hızlı bir üretim artışı meydana gelmiştir. 2002 ve sonrasında ise artış devam etmekte olup, biraz daha yavaş bir yükselişte olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.3’de ise Dünya ve Avrupa’da üretimi yapılan plastiklerin 2005-2015 yılları arasındaki değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir [6].



Şekil 1.3 Yıllara göre Dünya ve Avrupa genelindeki toplam üretim miktarlarının değişimi [6]



PAGEV yani Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı tarafından 2016 yılından yayınlanan Dünya ve Türkiye Sektör İzleme Raporu'nda yer alan verilere göre, dünyadaki toplam plastik üretiminin büyük bir kısmını Çin ile birlikte diğer Asya ülkeleri, Birleşik Devletler, Almanya, S.Arabistan ve Hindistan yapmaktadır. Türkiye ise 2015 yılında 8,6 milyon ton plastik üretimi yapmış olup, Dünya genelindeki toplam üretimde % 2,7 değere sahiptir. Böylelikle ülkemiz bu değerlerle dünyada 6. sırada ve Avrupa Birliği'nde ise 2.sırada yer almıştır [7].

Polimer malzemeler hakkında yukarıda verilen bu veriler, her geçen gün üretim miktarlarının ve kullanım alanlarının arttığını, teknolojik ve ekonomik olarak büyük bir katkıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle günümüzde, bu malzeme türü ile ilgili farklı yönlerden yapılacak çalışmalar büyük bir öneme sahip olmaktadır. Polimer malzemelerin mekanik davranışlarının araştırılmasını konu alan çalışmalar ise mühendislik uygulamaları açısından daha farklı bir öneme sahiptir. Polimerlerin mekaniği ile ilgili çalışmalarda katı polimerlerin davranışlarının incelenmesi detaylı ve geniş bir alandır. Polimer mekaniğinin temel amacı, polimer malzemelerin farklı yüklemeler ve koşullar altındaki mekanik karakterizasyonunu deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar yaparak daha iyi anlamayı sağlamaktır. Polimer mekaniğinde malzeme modellemesinde kullanılan iki temel yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşım; polimerlere farklı mekanik deneyler uygulanarak elde edilen veriler, farklı gerilme, hasar teorileri ve sonlu elemanlar metodu ile modellenmesidir. Bu yaklaşımın en önemli eksikliği, her simülasyon için koşulların deneysel olarak da yenilenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. İkinci yaklaşım ise, polimerleri oluşturan monomerler içyapı davranışlarını karakterize edecek şekilde mikro (veya nano) seviyede olarak modellenmesini yaparak makro düzeyde davranışların oluşumunu elde etmektir. Bu yaklaşımın en önemli eksikliği ise, polimerlerin karmaşık monomer zincirlerin kaynaklanan yapılarının modellenmesi aşamasındaki oluşturduğu süreç zorluğudur. Günümüzde her iki yaklaşım şekliyle çalışmalar yapılmaya devam edilmekte olup, artık bu iki yaklaşımın birleştirilerek uygulanması daha çok ön plana çıkmış durumdadır. Bu bütünleşik model yaklaşımında hem deneysel veriler hem de mikro (veya nano) yapı dikkate alınarak daha kısa sürede güncellenebilir yapıya sahip daha gerçekçi malzeme modelleri geliştirilebilmektedir. Ayrıca polimerlerin elastik, plastik, hiperelastik, viskoelastik, viskoplastik gibi sürekli mekanik davranışlarının birlikte modellenmesinde etkin olarak kullanılan Paralel Reolojik Sistemi (Parallel Rheological Framework Model - PRF) bütünleşik olarak yapılan yaklaşımın önemli bir türüdür. Bu yaklaşım ve modelleme sürecinde kullanılan sonlu elemanlar metodu ile polimerler daha gerçekçi bir

şekilde modellenebilmektedirler. Çalışmamız kapsamında bu yaklaşım kullanılmış olup, daha sonraki bölümlerde detaylı olarak verilmiştir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Çalışmamızın temel amacı, kompozit malzemeler kullanılarak oluşturulan yapıların birden fazla bileşenden oluşmasından dolayı zayıflamış olan ara geçiş bölgesinin optimum düzeyde dayanıklılığının artırılması ile çeşitli yüklemeler altında oluşabilecek hasarın ana bileşenler yerine bağlantı üzerinde oluşmasını sağlayarak yapısal bileşimin uzun kullanım süresine sahip olmasını sağlamaktır. Çalışma konusu, uygulama alanlarında ise farklı birçok öneme sahiptir. Birleştirme esnasında kullanılacak olan akrilik yapıştırıcı bant sayesinde herhangi bir ön yüzey hazırlama işlemine gerek duyulmadan hızlı bir şekilde uygulama ile yapısal üretim esnasında yüksek oranda zaman ve maliyet kazanımı elde edilmesini sağlamıştır. Kompozit malzemelerin birleştirilerek kullanıldığı tüm alanlarda uygulanabilecek ve geometrik tasarımın zor olduğu yerlerdeki bileşik zorlamalara karşı sabit bir yapışma kalınlığıyla birlikte alternatif çözüm olarak tercih edilebilecek yüksek bir potansiyele sahiptir. Ayrıca yapısal bağlantı, yapıştırıcı bant sayesinde belli bir oranda esneklik kazanarak ani yüklemeler karşısındaki gevrek davranışını ortadan kaldırmaktadır.

Çalışmamız kapsamında, polimer malzemeler içerisinde yer alan VHB 4950 (3M™) akrilik yapıştırıcı bantı tercih edilmiştir. Bu bantın tercih edilme sebebi ise; yüksek yüzey enerjisine sahip plastik esaslı malzemeler için çift taraflı olarak genel birleştirme amaçlı özelliğe sahip olmasıdır. Bu bantın, belirlenmiş farklı geometrilere sahip kompozit plakalardan üretilen alt bileşenlerin oluşturduğu yükleme koşulları ve farklı fiziksel ön gerilme koşulları altında oluşturulan yapısal birleşimlerin sahip olduğu mekanik davranışlarının deneysel, analitik ve nümerik yöntemlerle detaylı olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma için tabakalı kompozit plakaların tercih edilmesi sebebi ise, yaygın bir mühendislik malzemesi olarak kullanılmaları ve matris malzemesi olan epoksi ile bant arasında iyi bir yapışma performansının elde edilmiş olmasıdır. Kompozit plakaların önceden belirlenen tasarım parametrelerine göre oluşturulan farklı geometrik birleşimleri, birleşme unsuru olan akrilik bantın standartlaşmış çoğu mekanik karakterizasyon testlerine göre gerçekliği artırılmış yükleme koşullarının oluşumunu sağlamıştır. Böylelikle havacılık, deniz yolu taşımacılığı, otomotiv sektörü gibi birçok alanda kullanılan birleştirmeler için daha gerçekçi bir tasarım oluşturulmuştur.

Birleşim unsuru olarak kullanılan VHB 4950 bantının mekanik davranışlarının belirlenebilmesi için ayrıca viskoelastik testler de gerçekleştirilmiştir. Polimer mekaniğinde kullanılan modelleme yöntemlerinden bütünleşik yani deney verileri ve mikro modelleme tekniği beraber kullanılarak analitik çalışmalar yapılmıştır. Analitik çalışmalarda Mcalibration® yazılımı kullanılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalar sonucu elde edilen çeşitli malzeme model parametreleri ticari bir sonlu elemanlar metodu yazılımı olan Abaqus™ ortamında üç boyutlu doğrusal olmayan (nonlinear) nümerik simülasyonları gerçekleştirilerek, kullanılan malzeme modellerinin doğrulaması ve geçerlilikleri karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır.

Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir; Bölüm 1’de polimerler hakkında genel bilgilendirmeler yapılmış olup, literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Bölüm 2’de malzeme modelleri ve polimer malzemeler için yapılan modellemelerin kuramsal altyapısı verilmiştir. Bölüm 3’de çalışma kapsamında tasarlanan deney numunelerin alt bileşenlerinin mekanik davranışları uygun standart testler ile belirlenmiştir. Bileşik yüklemeleri sağlayacak yapısal birleştirmeler üzerinde farklı ön gerilmelerin uygulanması açıklanmıştır. Ardından üç boyutlu ve doğrusal olmayan nümerik modellemelerdeki uygulanan yöntemler ifade edilmiştir. Deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Son olarak Bölüm 4’de ise yapılan deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar sonucunda numuneler üzerinde oluşturulan farklı değerlerdeki ön gerilmelerin, farklı geometrik boyutsal parametreler sonucunda oluşan sistematik değişken eksantrik yükleme değerlerinin ve değişken yapışma yüzeyi miktarları olarak belirlenen fiziksel parametrelerin, maksimum yük taşıma kapasitesi ve deformasyon mekanizması üzerindeki etkilerinin çok yönlü olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

### **1.3. Literatür Araştırması**

Günümüzde elastomerik malzemelerin üretiminin ve kullanımının hızlı bir şekilde artmakta olmasından dolayı, fiziksel-kimyasal-mekanik davranışlarının araştırılması üzerine yapılan çalışmalar çok aktif bir alan oluşturmuştur. Elastomerik malzeme olan akrilik polimerler, otomotiv, deniz taşımacılığı, havacılık ve biyomekanik gibi çok çeşitli uygulamalarda yapıştırıcı olarak geniş kullanım alanlarına sahiptir. Akrilik yapıştırıcı olarak kullanıldığı yerlerde çeşitli yüklemeler altındaki mekanik davranışlarının tam olarak belirlenebilmesi için, viskoelastik özelliklerinin deneysel, analitik ve nümerik yöntemlerle nicel olarak belirlenmesi ile ilgili literatürde birçok detaylı çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında çok sayıda yapı için statik ve dinamik yüklemeler gibi benzeri durumlar içinde yük taşıma kapasitesi

davranışları da incelenmiştir. Ancak literatürde yapılan çalışmalarda sistemli olarak uygulanan bileşik yüklemeler ve farklı ön gerilmeler altındaki etkilerin incelendiği araştırmaların çok sınırlı olduğu belirlenmiştir.

Bergström ve Boyce tarafından elastomerik malzemelerin mekanik davranışının, test hızı oranına bağlı olduğu ve çevrimsel yükleme üzerinde histerezis sergilediği belirtilmiştir. Kauçuksu yapısal tepkinin bu özelliklerinin iyi tanınmış ve kullanım işlevleri için önemli olmasına rağmen, muhtemelen davranışın karmaşık doğası ve mevcut olarak bulunan makul derecede başarılı elastik kauçuk modelleri ile olan belirgin tutarsızlığı nedeniyle, birkaç model ile tepkinin bu yönlerini nicelleştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmalarında, farklı zaman - bağımlı şekil değiştirme koşullarındaki karbon karası dolu kloropren kauçuğunun, malzeme tepkisini araştıran ayrıntılı bir deneysel araştırma sunmuşlardır. Deneylelerden elde ettikleri önemli gözlemlerden bazıları şunlardır: (1) dolgulu ve dolgusuz elastomerler, çevrimsel yükleme esnasında önemli miktarda histerezis sergilerler ; (2) karbon karası partiküllerinin miktarı, normalleştirilmiş histerezis miktarını güçlü bir şekilde etkilemez; (3) hem dolgulu hem de dolgusuz elastomerler, yükleme süreci esnasında, yükün kaldırılması sürecinden daha yüksek şekil değiştirme oranına ve test hızına bağımlıdır. (4) sabit şekil değişimdeki gerilme, hem yükleme hem de yükün kaldırılması esnasında aynı denge seviyesinde bir gevşeme zamanı seviyesi ile gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Deneysel verilere dayanarak yeni bir yapısal model geliştirmişlerdir. Modelin temeli, mekanik davranışın iki parçaya ayrılabilmesini sağlamakta olup: uzun süreli gerilme gevşeme testlerinde yaklaşılan duruma karşılık gelen bir denge ağı ve denge durumundan doğrusal olmayan hız bağımlı sapmayı kapsayan ikinci bir ağı bulunduğunu göstermişlerdir. İkinci ağın zaman bağımlılığının, önemli derecede değişimsel uyumu olan ve genel gerilme kayma gevşemesine sahip moleküllerin sürünme hareketi tarafından daha fazla yönetildiğini varsaymışlardır. Önermiş oldukları üç boyutlu yapısal modelin teorik sonuçları ile tek eksenli ve düzlem şekil değiştirme basma testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması neticesinde, yapısal modelin test hızı bağımlılığının ve gevşeme davranışının iyi bir uyum içinde olduğunu ortaya koymuşlardır [8].

Johlitz ve arkadaşları, bir poliüretan (PUR) ağının doğrusal olmayan viskoelastik davranışını, sürekli tek eksenli gerilme testleri ve kademeli gevşeme testleri ile belirlendiğini ifade etmişlerdir. Modelleme esnasında kullanmış oldukları iç değişkenler kavramının devamında yer alan iç değişkenler için doğrusal gelişim denklemleri ile birleştirilen sonlu Neo-Hookean malzeme modeli, viskoelastisitenin neden olduğu zaman bağımlılığını içermesi nedeniyle uygulamışlardır. Parametreleri, test numune geometrisi ve test koşulları tarafından verilen sınır

değer problemini çözen doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar analizi ile birleştirilmiş bir gelişim stratejisi ile tanımlamışlardır. Sonuç olarak, tanımlanması yapılan deneylerin ve modellemenin bileşiminin, verilen malzemenin mekanik davranışının tam bir tanımını sağladığını göstermişlerdir [9].

Miehe ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada, yüksek şekil değişimine sahip kauçuksu polimerlerin elastik tepkilerinin tanımlanması için yeni bir mikro-mekanik tabanlı ağ modelini ve sayısal uygulamasının detaylarını dikkate almışlardır. Yaklaşım modeli, yüzeyin uzayda zincir yönelimlerinin kesintisiz dağılımını temsil ettiği bir mikro küre ile simgelenecek bir mikro yapıya dayanan bir kauçuk benzeri malzeme modellemesi ile yapmışlardır. Modelin özü, iki mikro-kinematik değişken tarafından tanımlanan kısıtlı bir ortamdaki tek bir polimer zincirinin mikro-mekanik tepkisinin yeni iki boyutlu yapısal bir düzeneğe dayanmaktadır. Bu boyutları ise, zincirin gerginliği ve zinciri içeren bir mikro tüp kesitinin daralması olarak tanımlamışlardır. İkinci temel özellik ise, uzay yönlendirmelerinin mikro küresinde tanımlanan mikro değişkenlerin karakteristik bir homojenizasyon sürecine dayanan polimer ağının üç boyutlu toplam tepkisini tanımlayan yeni bir ilgili olmayan mikrodan makroya geçiş olduğunu belirtmişlerdir. Yapısal gerginlik, minimum ortalama serbest enerjinin bir ilkesi ile mikro küredeki dalgalanma alanı ve makro sürekliliğin alan gerilimi ve alan gerilimi olmayan bir mikro-kinematik değişkenlerinin birbirlerine bağlanması şeklinde tanımlamışlardır. Dolayısıyla bu yeni model, serbest zincir hareketlerinden ve topolojik kısıtlamalardan kaynaklanan iki üst üste binmiş durumu hem mikro hem de makro düzeyde cazip bir şekilde ikili geometrik yapıya dayandırarak açıklamaktadırlar. Mikro küre üzerindeki ortalama işlemleri, etkin bir sayısal bütünleşme şeması ile doğrudan değerlendirmişlerdir. Genel modeli ise, gerilme-şekil değiştirme deneylerinde gözlemlenen karakteristik olgulara açık bir şekilde tanımlanabilir ilişkilerle kurulan ağın özelliklerini ve tekli zincir istatistiklerinden elde edilen beş etkili malzeme parametrelerini içerdiğini ifade etmişlerdir. Bu yaklaşımlarıyla, modelleme kapasitesinin önemli ölçüde geliştirilmesini sağlayarak, tam ağın ve sekiz zincir modelinin özelliklerini geliştirmişlerdir. Modelin mükemmel tahmin performansı, daha önce geliştirilen ağ modelleri ile karşılaştırmalı çalışmalarla ve homojen - homojen olmayan testlerin çeşitli mevcut verileriyle göstermişlerdir [10].

Ask ve arkadaşları, elektroaktif polimerler (EAP'ler) için ortak bir kullanımın, elektrik alanından dolayı polimerin deformasyonundan fayda sağlandığı farklı aktüatörler tipinde bulunmasından dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Bu uygulamalarda zamana bağlı etkilerin bulunduğunu ifade ederek bu etkilerden birinin de polimer malzemenin viskoelastik davranışı

olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmalarında, elektro-viskoelastik malzeme modeli için olgusal açıdan, sürekli ortam mekaniği düzenindeki EAP uygulamalarına yönelik modelleme ve simülasyonlar geliştirmişlerdir. Farklı spesifik modelleri, literatürde bulunan deneysel verilere uyarlamışlardır. Doğal elektriksel boyut değişimi için kullanılan deneysel veriler küçük şekil değişimleri ile sınırlandırılmış olmakla birlikte, önceden ön deformasyona uğramış polimer aktüatörler gibi, büyük deformasyonlara maruz kaldıkları olası uygulamaları da kapsamına yönelik model için büyük bir şekil değiştirme düzeni kullanmışlardır [11].

Vu ve arkadaşları, doğrusal olmayan elektroelastikliğin sayısal modellenmesini sunmuşlardır. Doğrusal olmayan elektroelastisitenin iyi kurulmuş temel denklemlerine dayanarak varyasyonel bir formülasyon oluşturmuşlar ve doğrusal olmayan elektromekanik birleştirme problemini çözmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Uygulamış oldukları formülasyonun doğruluğunu gösteren sayısal örnekler de sunmuşlardır [12].

Vu ve arkadaşları, bu çalışmalarında ise, lineer olmayan elektro-elastostatiklerin sayısal simülasyonlarını, birleştirilmiş sınır ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının amacı, çevredeki alanın yapıdaki elektrik alanı üzerindeki önemli etkisinden dolayı elektriksel uyarılara maruz kalarak büyük deformasyona uğramış elektroelastik yapıdaki bu durumun oluşturduğu mevcut deformasyonunun düzgün bir şekilde simülasyonlarını gerçekleştirmek olduğunu ifade etmişlerdir. Sonlu elemanlar, hem doğrusal olmayan mekanik hem de doğrusal olmayan elektriksel durumları da kapsayan bir şekilde doğrusal olmayan elektroelastik yapının modellenmesinde kullanmışlardır. Sınır elemanlar, yapının sınırlarının büyük deformasyonlarını dahil ederek ve yapıyı çevreleyen alanı modellemek için kullanmışlardır [13].

Büschel ve arkadaşları, akıllı malzemelerin sensör ve aktüatör uygulamaları için önemli bir rol oynayan aktif ve çok fonksiyonlu malzemeler olduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemelerin, pasif yapılara uyarlanabilir sistemlere dönüşüm potansiyeline sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, bu malzemelerin tasarımı ve optimizasyonu için bir ön şart olarak, termal, elektriksel, manyetik, optik ve mekanik etkilerin farklı kombinasyonları arasındaki etkileşimini içeren güvenilir modellerin bulunması gerekliliğini belirtmişlerdir. Elektroaktif polimer (EAP) olarak adlandırılan polimerik elektroelastik malzemelere, bir elektrik alanının uygulanması durumunda deforme olma özelliğine sahip oldukları göstermişlerdir. Elektroaktif polimerler, polimerin karakteristik olarak sahip oldukları hafif, ucuz, kırılmaya dayanıklı, elastik, kimyasal ve fiziksel yapı özelliklerini paylaştıkları için malzemenin davranışlarının tanımlanmasında birçok faydası bulunduğunu belirtmekle beraber, "elektroaktif polimer" tanımı birçok farklı

mikroskopik mekanizma ve polimerik malzeme için genel bir terim olduğunu ortaya koymuşlardır. Elektromanyetizma ve elastisite kanunlarına dayanılarak, viskoelastik model geliştirmişler ve sonlu elemanlar yöntemine uygulamışlardır. Sunmuş oldukları üç boyutlu katı eleman, sekiz düğüme sahip olup, yer değiştirme ve elektrik potansiyeli için trilinear enterpolasyon işlevlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sürekli ortam mekaniği modeli, sonlu deformasyonları, zaman bağımlılığını ve malzemenin neredeyse sıkıştırılmaz olduğu davranışını içerdiğini ifade etmişlerdir. Olası uzun zamana bağlı olarak gelişebilecek deformasyonları tanımlamak için deformasyon gradyanının bölünmesiyle oluşturulan sonlu bir viskoelastik modeli kullanmışlardır. Böylece, polimerik malzemelerin zaman bağımlılığını, serbest enerji fonksiyonu ile birleştirmişlerdir. Elektromekanik etkileşimleri ise, elektrostatik kuvvetler ve enerji fonksiyonu içinde dikkate alındığını ifade etmişlerdir [14].

Hossain ve arkadaşları, 3M<sup>TM</sup> tarafından üretilen VHB 4910 viskoelastik bantın, aktüatörlerin üretiminde elektro-aktif polimer olarak potansiyel kullanıma sahip önemli bir polimerik malzeme olduğunu ifade etmişlerdir. Akrilik polimer grubunun bir üyesi olan bu polimerin çok yumuşak bir viskoelastik malzeme olduğunu belirtmekle birlikte, ayrıca bu önemli viskoelastik malzemenin kapsamlı olarak mekanik karakterizasyonu, tek adımlı gevşeme testleri, çok kademeli gevşeme testleri ve çevrimsel yükleme-boşaltma testleri gibi farklı standart deneyler ile gerçekleştirmişlerdir. Malzemenin mekanik davranışlarının modellenmesinde, mikromekanik olarak ele alınan Bergström-Boyce viskoelastik modelin modifiye edilmiş bir versiyonunu, sonlu doğrusal gelişim kanunuyla birlikte kullanmışlardır. Çalışma kapsamında ele almış oldukları modelin geçerliliğini, deney sonuçlarını tahmin etme konusundaki mükemmel bir yakınsama ile göstermişlerdir [15].

Kaliske ve Rothert, yalnızca elastik malzeme modellerinin sınırlı bir geçerliliğe sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Genellikle, belirli miktarda enerji emme davranışının, neredeyse her malzeme için deneysel olarak gözlemlenebilir olduğunu belirtmişlerdir. Yitirgen malzemelerin büyük bir çoğunluğunu, zaman ve frekansa bağlı viskoelastik yapısal bir model ile tanımlamışlardır. Bu tür tipik davranışların, polimerik kauçuk malzemelerde de bulunduğunu belirtmişlerdir. Küçük ve büyük şekil değişimlerini, doğrusal bir viskoelastik yaklaşımla ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Bu durumun çok etkili bir sayısal formülasyonla mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Temeldeki yapısal sistemde, genelleştirilmiş Maxwell ögesinin yer aldığını belirterek sayısal modelin türevini vermişlerdir. Geliştirilmiş izotropik algoritmik tensörün, büyük şekil değişimleri durumunda bile mevcut konfigürasyon için geçerli olduğunu göstermişlerdir. Deneysel incelemelerin değerlendirilmesinin yanı sıra parametrelerin

belirlenmesini de dikkate almışlardır. Son olarak, karışık elemanlar kullanarak kauçuk yapıların zamana bağlı deformasyonlarının, sonlu elemanlar simülasyonlarını sunmuşlardır [16].

Nandi ve arkadaşları, lastik mühendislerinin daima sonlu elemanlar analiz aracını kullanarak yuvarlanma direncinin tahmininde bulduklarını belirtmişlerdir. Yuvarlanma direncinin esas olarak lastiklerde kullanılan kauçuk malzemenin viskoelastik enerji dağılımına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Sonlu şekil değişimleri için doğrusal viskoelastik yaklaşımı ile viskoelastik enerjinin yitiminin hesaplanmasının teknik bir zorluk olarak devam etmekte olduğunu belirtmişlerdir. Abaqus ile Paralel Reolojik Çerçeve modeli (PRF) son zamanlarda uygulanan doğrusal olmayan bir viskoelastik yaklaşımla viskoelastik enerji yitiminin, önceden mümkün olduğundan daha doğru bir şekilde hesaplandığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalarında, Abaqus'ta bulunan doğrusal ve doğrusal olmayan viskoelastik modellerin teorik bir arka planını sunmuşlardır. Ayrıca, malzeme test verilerinden başlayarak PRF modelinin parametrelerini kalibre etmek için bir metodoloji de açıklamışlardır. Malzeme kalibrasyon prosedürüne ek olarak, bu çalışmalarında, aynı zamanda kauçuk malzemedeki viskoelastik enerji yitimine bağlı olarak yuvarlanan bir lastikteki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için bir simülasyon metodolojisini de kısaca açıklamışlardır [17].

Wissler ve Mazza, elektroaktif polimer (EAP) aktüatörlerde temel malzeme olarak kullanılan bir dielektrik elastomerin karakterizasyonu için kapsamlı deneysel çalışmalar yapmışlardır. Akrilik elastomer 3M<sup>TM</sup> tarafından üretilen VHB 4910 bantın mekanik davranışını, kuvvet ve yer değiştirme kontrollü yükleme koşulları altındaki büyük şekil değişim deneylerini (tek eksenli ve eşit eksenli deformasyon) kullanarak karakterize etmişlerdir. Gerilme ve gevşeme testlerinin yanında, dairesel aktüatörler kullanarak da deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında 40'dan fazla aktüatör üretilmiş olup (düzlem öncesi gerilme seviyeleri farklı) 2000 ile 3500 V arasındaki gerilimlerle aktive etmişlerdir. Deneysel veriler, yapısal model parametrelerinin belirlenmesinde ve ayrıca EAP aktüatörlerindeki elektromekanik bağlantı için kullanılan modellerin ve simülasyonlarının prosedürlerindeki geçerliliği için yararlı olduğunu belirtmişlerdir. Dielektrik elastomer aktüatörün sonlu elemanlar analizi için bu çalışmada dairesel aktüatörlerdeki deneysel gözlemlerin değerlendirilmesinde yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Farklı visko-hiperelastik modellerin malzeme parametreleri, deneysel verilerin bir alt kümesinden ve kalan verilerle karşılaştırmaları yapılarak incelenen modellerin tahmin yetenekleri arasından belirlemişlerdir. Dairesel aktüatör davranışının sonlu elemanlarla belirlenmesinde oldukça uygun bir durum olduğunu göstermişlerdir. Böylece önermiş oldukları



malzeme modellerinin, aktüatör tasarımı ve optimizasyonu için faydalı olabileceğini belirterek ilgili modele ait formülasyonun sınırlamalarını da ayrıca sunmuşlardır [18].

Vandenbroucke ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmanın amacının, floro-elastomer malzemenin mekanik davranışının araştırılması olduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemenin çevrimsel çekme ve basma testleri sırasında doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışını, yükleme hızına bağlı tepki ve histerezis olaylarını incelemek için çeşitli gerilme ve sıkıştırma çevrimli yükleme ve gevşeme testleri aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Hiperelasto-Visko-Histerezis (HVH modeli) adlı orijinal, deneysel olgulara dayalı bir model de sunmuşlardır. Çalışmada modelleme için hazırlanan kodlar HERZHH ++ ile gerçekleştirilmiş olup, uygulanan bu model; doğrusal viskoelastik, hiperelastik ve saf bir histerezis davranışına karşılık gelen üç gerilme bileşeninin üst üste binmesine dayanmakta olduğunu ifade etmişlerdir. Viskoziteyi, viskoelastik davranışını yeterince göstermek için gerekli olan iki doğrusal Maxwell elemanı aracılığı ile tanımlamışlardır. Gerilme tensörünün deviatorik bileşeninin histerezis katkısını, mekanik davranışın hız bağımsız geri döndürülemezliği olarak modellemişlerdir. Bu tür bir model ile yapılan diğer çalışmaların aksine, hiperelastik katkıyı, yalnızca gerinim değişmezlerine bağlı olarak Hart-Smith gerinim enerji yoğunluğu fonksiyonuyla simüle etmişlerdir. Yapısal fonksiyonların parametrelerini, deneysel verilerden doğrusal olmayan optimizasyon yöntemleri kullanan bir tanımlama işlemi ile belirlemişlerdir. Kauçuk malzemenin büyük şekil değişimlerdeki gevşemesinin viskoelastik gerilme tepkisi ve çevrimsel basma testleri sonucu elde edilen deneysel verilerin karşılaştırılmasıyla ortaya koymuşlardır [19].

Amin ve arkadaşları, doldurulmuş doğal kauçuk (NR) ve yüksek sönümleyici kauçuğun (HDR) hız bağımlı davranışını, basma ve kayma rejimlerdeki durumu göz önüne alarak araştırmışlardır. Viskoziteye bağlı olarak hız bağımlı etkilerini tanımlamak için, deformasyon gradyen tensörünün elastik ve inelastik bileşenlere ayrılması temelinde kurulmuş sonlu gerilme viskoelastisitesinin bir yapısal modelini önermişlerdir. Toplam gerilmeyi, Zener modeli kapsamında bir denge gerilmesine ve viskoziteye bağlı oluşan yüksek gerilmeye ayırtmışlardır. Doğrudan deneysel gözlemlerden yararlanarak viskozite için ele alınan yapısal denklemi tanımlamak için basit gevşeme testi sonuçlarını değerlendirerek inelastik gerginlik oranı ve Mandel tipi gerilme tensörü arasındaki temel ilişkiyi saptayan bir analitik şema önermişlerdir. Önermiş oldukları analitik şemayı kullanarak deneysel sonuçların değerlendirilmesini, yüksek gerilmeyi ve mevcut deformasyonu değişken olarak ele alarak hız bağımlı olguların gelişimini tanımlamak için gerekli olduğunu göstermişlerdir. Deneysel

temelli çalışma tekniğine dayanılarak iç değişkenlerin viskozite durumu üzerindeki etkilerini göstermek için güç yasalarını kullanan bir gelişimsel denklem önermişlerdir. Önerilen denklemi, termodinamik bakımdan tutarlı bir şekilde sonlu şekil değişimli viskoelastisite modeline dâhil etmişlerdir. Geliştirilen modeli kullanarak, basit gerilme testleri, çok aşamalı gevşeme testleri ve farklı gerinim hızlarındaki monoton testleri için elde etmiş oldukları simülasyon sonuçlarını, hem basma hem de kayma rejimlerinde bulunan ilgili malzemeler üzerinde yapılan deneylerle uyumlu bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Son olarak, hız bağımlı döngüsel süreçler için önerilen gelişimsel denklemin kapsamını genişletmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Simülasyon sonuçlarını, detaylı bir şekilde deneylerden elde edilen verilerle de karşılaştırmışlardır [20].

Johlitz ve arkadaşları, bir poliüretan (PUR) yapısının doğrusal olmayan viskoelastik davranışını, sürekli tek eksenli gerilme testleri ve kademeli gevşeme testleri ile belirlemişlerdir. Modelleme sürecinde kullanmış oldukları iç değişkenler kavramını, iç değişkenler için doğrusal gelişim denklemleri ile birleştirilen sınırlı Neo-Hookean malzeme modeli ile viskoelastisitenin neden olduğu zaman bağımlılığını içermesi için uygulamışlardır. Parametreleri, deney numune geometrisi ve test koşulları tarafından verilen sınır değer problemini çözen doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar analizi ile birleştirilmiş bir süreç ile tanımlamışlardır. Sonuç olarak, tanımlanan deneylerin ve modellemenin birleşimi ile çalışma kapsamında incelenen poliüretan malzemenin mekanik davranışının tam bir tanımlamasını gerçekleştirmişlerdir [21].

Lion tarafından yapılan çalışmada, karbon siyahı dolgulu kauçuğun termomekanik davranışının tanımlanabilmesini sağlayan, doğrusal olmayan geometrisini ve termodinamik açıdan tutarlı bir yapısal teorisini önermiştir. Önceki yaptığı çalışmasında, bu malzemenin mekanik davranışının, esas olarak bazı inelastik etkilerle birlikte doğrusal olmayan esneklik, (özellikle de Mullins etkisi), doğrusal olmayan hız bağımlılığı ve zayıf denge histerezisinden etkilendiğini göstermiştir. Bu çalışmasında ise, Mullins etkisini dikkate almamıştır. İlk olarak viskoplastiğin basit bir yay ve sönümleyiciden oluşan sisteme dayanan tek eksenli bir yaklaşımını tartışmıştır. Bu modelin esas özelliği, toplam gerilmenin bir hız bağımsız denge gerilmesine ve doğrusal olmayan hıza bağlı bir yüksek gerilmeye ayrışabilmesi olduğunu ifade etmiştir. Denge gerilmesini, iki bölümden oluşan bir bileşime ayırmıştır: Birinci terim olan denge gerilmesinin elastik kısmı, toplam şekil değişiminin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur ve ikinci terim, yani histeretik kısım, hız bağımsız bir biçimde şekil değişim geçmişine bağlıdır. Denge gerilmesinin hem yüksek gerilmesi hem de histeretik kısmı, iç değişkenlere bağlı doğrusal olmayan esneklik ilişkileri tarafından belirlendiğini ifade etmiştir. Bu iç değişkenler elastik olmayan şekil

değişimleri olup, ilgili gelişim denklemlerinin termodinamiğin ikinci kanunu dikkate alınarak geliştirilmesini sağlamıştır. Buna göre, rastlantısal deformasyon süreçleri için negatif olmayan yitim ilkesinin sağlanmış olduğunu göstermiştir. Bir sonraki adımda, bu modelin yapısını üç boyutlu ve geometrik doğrusal olmayan duruma aktarmıştır. Belirli bir anlamda sonlu deformasyondaki elasto-plastisiteye benzer şekilde, deformasyon gradyanının elastik ve inelastik kısımlara çoklu ayrışmasını sağlamıştır. İlk ayrışmayı, yüksek bir gerilmeye ve ikincisinde ise denge gerilmesinin histeretik kısmına göre tanımlamıştır. Sonuç olarak, Green'in şekil değişim tensörünün elastik ve inelastik parçalara ayrışmasına neden olan iki ara yapılandırmayı gerçekleştirmiştir. Yüksek gerilme ve denge gerilmesinin histeretik kısmının yapısal denklemlerini, farklı ara yapılandırmalarına göre formüle ederek doğrusal olmayan elastik ilişkileri ile tanımlamıştır. Esnek olmayan hacimsel ve çarpık etkilerin ayrı bir tanımını yapabilmek için deformasyon gradyanının kinematik bozunumlarını hacimsel ve bozulma kısımları olarak ele almıştır. Geliştirilen teorinin sayısal simülasyonlarında, malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik davranışının çok iyi bir şekilde belirlediğini göstermiştir. İnelastik deformasyonların neden olduğu termomekanik ısınma etkilerini de bu teori ile açıklamıştır. Bu çalışmada önermiş olduğu yöntem ile tek eksenli reolojik modellerin termodinamiğin ikinci kanunu kapsamında üç boyutlu sonlu şekil değiştirme teorilerini genelleştirmek için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur [22].

Wissler ve Mazza, dielektrik elastomerlerin elektroaktif polimer (EAP) aktüatörleri için temel malzeme olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmalarında, genel şekli ve sistematiği olan dielektrik elastomer aktüatörlerin sonlu elemanlar modellenmesini ve simülasyonu için bir süreç ve özel bir yapısal model (akrilik elastomer VHB 4910 için) olarak sunmuşlardır. Yeoh şekil değiştirme enerjisi potansiyelini ve Prony serilerini, dielektrik elastomerin büyük gerilme zamanına bağlı mekanik tepkisini tanımlamak için kullanmışlardır. Malzeme parametrelerini tek eksenli deneylerle (gevşeme testleri ve gerilme testleri) tespit etmişlerdir. Böylece, tersine olan bir problemi, iteratif sonlu eleman hesaplamalarını kullanarak çözmüşlerdir. Ön şekil değiştirmeye tabi tutulmuş bir dairesel aktüatör kurularak önceden tanımlanmış bir voltajla aktive edilmiştir. Dairesel aktüatörün üç boyutlu bir sonlu elemanlar modelini oluşturmuş olup, elektromekanik aktivasyon işleminin modellenmesini gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon ve gerçek ölçümler önemli ölçüde uyumlu olup, bundan dolayı çalışmada önerilen yapısal model ve aktüatör simülasyon prosedürün birbirlerini desteklemiş olduğunu belirlemişlerdir [23].

Mars ve Fatemi, eksenel burulma test numunesi tasarımını ve imalatını gerçekleştirmişlerdir. Test numunesiyle ilgili gerilme-şekil değiştirme karakterizasyonu deneyi için gerekli olan

ilişkilendirmeleri sağlamışlardır. Numune, iki çelik montaj halkası arasında bağlanan kısa, içi boş bir lastik silindir olup, eş zamanlı olarak aksenal ve kesme kuvvetleri altında, bağımsız olarak kontrol edilen aksenal ve büküm ile oluşturulan yer değiştirmeleri yoluyla üretmişlerdir. Şekil değiştirme-yer değiştirme ile gerilme-yük ilişkileri ve şekil değiştirme enerji yoğunluğu hesaplamalarını sunmuşlardır. Bu ilişkilendirmeler, analitik ve deneysel teknikler ile sonlu elemanlar analizi kombinasyonu yoluyla oluşturulmuş olup, ayrıca doğrulamasını da gerçekleştirmişlerdir. Test numunesindeki şekil değişimi ve gerilme alanı düzensizliğinin kapsamı ve etkilerini de araştırmışlardır. Test numunesi tasarımı yeterince basit olup şekil - yer değiştirme ilişkisinin kapalı formdaki formülasyonunu başarıyla geliştirmişlerdir [24].

Qi ve Boyce, herhangi bir zorlamaya maruz kalmamış malzemeninkinden çok daha uyumlu bir tepki sergileyen (ön gerilme uygulanmış bir malzeme ile de kanıtlandığı üzere) elastomerik malzemeleri, şekil değişimine bağlı olarak yumuşamaya maruz kalmakta olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, gözlemlenen yumuşamadaki gerilme-şekil değiştirme davranışı için tamamen üç boyutlu bir yapısal model önermişlerdir. Model, mikroyapısında sert ve yumuşak alanları bulundurmakla beraber yumuşak alana ait artan şekil değişiminin efektif hacim fraksiyonuna sahip Mullins ve Tobin kavramını benimsemekte olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonraki güçlendirilmiş şekil değişimi kavramını, makroskobik deformasyonun yumuşak alan tarafından görülen deformasyonla eşleştirilmesinde kullanmışlardır. Malzemenin şekil değişim enerji yoğunluğu fonksiyonu daha sonra yumuşak alanın gerilme enerjisinden saptanmakta olup, bu nedenle yumuşak alanın hacim fraksiyonunun deformasyon ile gelişime uğramakta olduğunu belirtmişlerdir. Mullins ve Tobin'in deneysel verileri ile çevrimsel basit uzama için model sonuçlarının karşılaştırılmasıyla modelin etkinliğini göstermişlerdir. Elastomerin bünyesindeki yumuşak / sert alanların mikroyapısındaki bir gelişimin gerilmeye bağlı yumuşamasındaki temel özelliklerini de içerdiğini önermişlerdir. Tek eksenli, çift eksenli ve düzlem şekil değişimli çekme için şekil değişimlerinin, yapıdaki gelişim ve çevrimsel gerilme-şekil değişimi model simülasyonlarını da vererek yapısal modelin üç boyutlu özelliklerini göstermişlerdir [25].

Bergström ve arkadaşları, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemesinin, toplam birleştirme değişimlerinde yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Aşınma, yorulma ve kırılma gibi etkenlerin, UHMWPE malzemesinin ömrünü sınırladığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, UHMWPE malzemesinin hem mikro ölçekte hem de makro ölçekte hasar ve aşınma mekanizmalarının doğrudan anlaşılmasına yönelik birleştirme değişimlerine yönelik önemli bir çaba sarfetmişlerdir. Bununla birlikte, ortopedik bileşenlerdeki canlı

değişikliklerini simüle etmek için, yükün kaldırılmasındaki model davranışının doğru simülasyon görev döngüsünün yükleme aşamasıyla eşit önemde olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, bu çalışmada, tek eksenli olarak yükün kaldırılması sırasında UHMWPE'nin mekanik tepkisinin anlaşılması ve öngörülmesine odaklanmışlardır. Spesifik olarak, daha önce geliştirilmiş olan yapısal modelin, döngüsel yükleme esnasındaki yüksek oranda çapraz bağlanmış UHMWPE'nin üzerindeki yükün kaldırılması esnasındaki davranışının doğru tahminlerini de sağlamak için genişletmişlerdir. Geliştirilmiş olan hibrit modeli, tek eksenli çevrim yüklemesi, büyük şekil değişimi gerilmesi, hız etkileri ve çok eksenli deformasyon gibi deneysel olarak gözlemlenen bu türdeki özelliklerini doğru bir şekilde ifade etmişlerdir. Artırılmış hibrit yapısal modelin, gelecekte UHMWPE'nin yorulma, hasar ve aşınma çalışmalarında kritik bir yapı taşı olarak kullanılacağını belirtmişlerdir [26].

Yeoh bu çalışmasında, Rivlin'in Olgusal Kauçuk Elastisite Teorisi'ne göre bir kauçuğun elastik özellikleri,  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $I_3$  olarak ifade edilen değişmez gerinimlerindeki sonsuz kuvvet serileri olan bir şekil değiştirme enerjisinin fonksiyonu olarak tanımlanabilir olduğunu belirtmişlerdir. En basit biçimde Rivlin'in gerinme enerjisi fonksiyonu, sonsuz seriyi  $I_1$ 'deki ilk terimle keserek elde edilen neo-Hookean ile  $I_1$  ve  $I_2$ 'de ilk terimlerinden elde edilen Mooney-Rivlin olarak ifade edilmiştir. Son olarak,  $I_1$ 'de bir kübik olan bir gerinme enerjisi fonksiyonunu önermiştir. Kavramsal olarak önerilen bu fonksiyon, deformasyona bağlı olarak değişen bir kayma modüllü bir malzeme modeli olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmasında, kauçuğun büyük şekil değiştirme davranışını, şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu formları ile öngörülen şekilde karşılaştırmıştır. Ayrıca şişmiş kauçuğun elastik davranışını da tartışmıştır [27].

Lapczyk ve arkadaşları, doğrusal olmayan viskoelastisiteyi modellemek için Paralel Reolojik Çerçeveyi, Mullins etkisi ve elastomerlerde kalıcı bir durum için sonlu deformasyon oluşturan bir kapsamda ele alarak incelemiştir. Çerçeve, sonlu deformasyonlu viskoelastik ve elastoplastik ağların paralel olarak üst üste yerleştirilmesine dayanmakta olup, böylece toplam gerilme tepkisini katkılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Her ağ için model, sırasıyla ağın viskoelastik veya elastoplastik olup olmadığına bağlı olarak deformasyon gradyanının çoklu bileşenli bir şekilde olmak üzere elastik bir bileşene ve viskoz veya plastik bir bileşene bölünmesini varsaymaktadır. Gerilme yumuşaması, Ogden ve Roxburgh'un görünüşteki elastisite teorisinin değiştirilmiş bir versiyonunu kullanılarak modellenmesine dayandırmışlardır. Plastik ağdaki plastisite, Mises akma koşulunu kullanarak sonlu şekil değişimini ve ilişkilendirilmiş akış kuralına göre modellemiştir. Viskoelastik ağlardaki viskoz yanıt, gerilme değişmezlerinin ve iç değişkenlerin bir fonksiyonu olabilen bir akış

kuralından elde edilmiş olup, model çerçevesindeki iç değişkenler için farklı değişim kanunları ile uygulanmasına müsade etmişlerdir. Bu Paralel Reoloji Çerçevesi, ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS ortamında uygulamışlardır. Dolgulu kauçukların ve polimerlerin mekanik davranışlarını öngörmek için başarıyla kullanmışlardır. Ayrıca bu çerçeveyi kullanan sayısal simülasyon örneklerini de sunmuşlardır [28].

Bergström, elastomerlerin mekanik davranışının hız ve sıcaklık bağımlılığı ile karakterize edilmekte olduğunu, gerilme-şekil değiştirme tepkisinin doğrusal bir davranış göstermediğinin bilindiğini ifade etmiştir. Bu deneysel özelliklerin iyi tanımlanmış olmakla beraber 50 yıldan uzun süredir kapsamlı olarak incelenmiş olduğunu belirtmiştir. Makroskopik mekanik davranışı kontrol eden mikro mekanizmaların anlaşılmasının daha yeni bir durum olduğunu, herhangi bir şekilde oluşan deformasyonun geçmiş durumlarına ait doğru tahminlere izin veren gelişmiş modelleme araçlarının sadece son birkaç yıl içinde kullanıma girmiş olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, elastomerlerin sonlu elemanlar modellemesindeki kullanılan hali hazırdaki durumunu özetleyerek ve dolgulu elastomerler için de modern yapısal teorilerin öngörücü yeteneklerini örnekleyerek ortaya koymuştur [29].

Peng ve arkadaşları, sonlu elemanlar metodu ve teorik yaklaşımı kullanarak, biyomimetik nano-filmlerin soyulma özelliklerini analiz etmek için bir soyulma modelini önermişlerdir. Viskoelastik davranışın etkisinin yanında nano-filmin yapışma uzunluğu, kalınlığı, elastik modülü, pürüzlülüğü ve soyulma açısının soyma kuvveti üzerindeki etkilerini de göz önüne almışlardır. Soyulma kuvvetinin maksimuma ulaştığı etkili yapışma uzunluğunun, nano-filmlerin gerçek uzunluğundan çok daha küçük olduğu ortaya koymuşlardır. Daha küçük soyulma açılarında kayma kuvveti etkin olurken, normal kuvvetin büyük soyulma açılarında baskın olduğunu belirlemişlerdir. Toplam soyulma kuvveti artan soyma açısı ile azalmıştır. Soyulma kuvvetinin iki sınırlayıcı değeri viskoelastik modelde bulunabilir durumda olup, bu da daha küçük ve daha yüksek yükleme oranı olduğu durum sayısına karşılık geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca nano-film kalınlığı ve Young modülünün soyulma davranışlarına etkisini de tartışmışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçların, kertenkele gibi biyolojik sistemlere sahip canlılardaki mikro yapışma mekanizmalarının anlaşılması için yararlı olacağını belirtmişlerdir [30].

Takahashi ve arkadaşları, yapışkan bantların önemli bir özelliğinin, yapışkanlık kuvvetinin bantlar üzerindeki küçük ve kısa süreli bir basınç tarafından üretilen yapışma kuvvetiyle ilişkili olan yapışkanlık performansının bulunması olduğunu ifade etmişlerdir. Bir yapışkan bantın çekme yükü altında yapışma performansının düştüğünü, ancak bu etkinin özellikle ince

yapışkan bantlar için iyi bir şekilde karakterize edilmemiş olduğunu belirtmişlerdir. Uygulanan gerilme yükünün, çeşitli kalınlıklardaki yapışkan bantların yapışma performansı üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmek için bir test cihazı geliştirmişlerdir. Tasarımı yapılan aygıt, ayırma işlemi sırasında yapışmış bölgenin mikroskobik olarak gözlemlenmesine olanak tanımaktadır. 15  $\mu\text{m}$  ve 5  $\mu\text{m}$  kalınlıktaki yapışkan bantların ayırma kuvveti sünek davranış gösterirken, 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında yapıştırıcının kırılma davranışı sergilediğini belirlemişlerdir. Bu ayırma davranışları, yapışkanın genişlemesi ve yapıştırıcı kalınlığından etkilenen boşlukların oluşması ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Mikroskopik görüntüler, artan çekme yükleriyle yapışan alanın daha küçük hale geldiğini göstermiştir. Birleştirilmiş ayırma enerjisi, yapışkan bantlar için tanımlanarak hesaplanmakta olup, farklı yapışkan kalınlıkları ve uygulanan gerilme yükleri için yapışkan performansını eşzamanlı olarak değerlendirildiğini ifade etmişlerdir. Ayırma enerjisi çekme yükü arttıkça azaldığını, ancak uygulanan gerilmeye bakılmaksızın birim alan başına ayırma enerjisi büyük ölçüde sabit kalmakta olduğunu belirtmişlerdir. Ayırma hızının ayırma davranışına olan etkisini, artan ayrılma hızıyla gözlemlenen sünekten kırılma eğilimine doğru bir davranışa sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ek olarak ayırma hızının, birleştirilmiş ayırma enerjisine de yansıdığını ortaya koymuşlardır [31].

Liu ve arkadaşları, kompleks kuvvet yükü ve/veya yer değiştirme sınır koşulları ile dengeli ve dengesiz yapışkanlı birleştirmelerdeki yapışkan gerilmeleri belirlemek için etkili bir analitik çözüm stratejisi sunmuşlardır. Yapışkan gerilmeleri geometrik boyutlar ve malzeme özellikleri ile sayısal olarak elde edilen bütünleşme sabitleriyle birlikte ifade etmişlerdir. Geliştirdikleri bu modeli, dengeli ve dengesiz koşullarda bulunan çeşitli birleştirme türlerin analizi için başarıyla uygulamışlardır. Bütün bu durumlardaki doğrusal denklem kümelerini son gerilme ifadelerindeki toplam sabitlerini belirlemek için vermişlerdir. Analitik sonuçların, yapışkan gerilmeler için sonlu elemanlar sonuçlarıyla iyi bir şekilde uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Bu önerilen modelin, tabakalı kompozitler, elektronik paketleme ve esnek elektronik yapılar gibi benzer yapıştırılmış yapılardaki mekanik davranışları tahmin etmek için rahatça genişletilebilir duruma sahip olduğu ifade etmişlerdir [32].

Li ve arkadaşları, dielektrik elastomerlerin, seramik parçacıkları gibi yüksek geçirgenlikli dolgu maddeleri ile katkılı oldukları durumlarda, aktifleşebilmek için gereken voltajı düşüren arttırılmış dielektrik özelliklere erişmekte olduğunu ifade etmişlerdir. Bu dielektrik elastomer kompozitlerin elektromekanik deformasyon ve stabilitesini araştıran termodinamik bir model önermişlerdir. Elektromekanik birleştirme sürecinde, elektrolizma nedeniyle oluşan kararsızlığı değiştiren seramik dolgu maddelerinin doymuş polarizasyonuna dikkat edilerek analizlerini

gerçekleştirmişlerdir. Stabilité özelliklerini, belirlenmiş temel prensipleri kullanarak incelemişler ve yüksek performanslı şekil değiştirebilir dielektrik aktüatör hedefine ulaşmak için detaylı veriler elde etmişlerdir [33].

Rajagopal ve Saccomandi, sıkıştırılmaz bir Kelvin-Voigt viskoelastik katı maddesinin viskozitesinin basınca bağlı olduğu genellemesine ait dinamik tepkisini araştırmışlardır. Basınca bağlı malzeme modülüne sahip cisimlerin, granüler ortamların mekaniği ve toz sıkıştırma ile ilişkili jeomekanikteki sayısız teknolojik açıdan önemli problemlerle ilgili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu tür cisimlerdeki dalgaların yayılımına ilişkin çözümlerin yanı sıra sürünme ve geri kazanım olguları için analitik sonuçları elde etmişlerdir. Basınca bağlı malzeme modülüne sahip cisimlerin tepkisindeki belirgin farkı açıkça gösteren kesin çözümler elde etmişlerdir. Bu durumda, modülün basınç üzerindeki bağımlı olmayan karşıt değişkenlerinin mevcut olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu tür malzemeler için yapısal denklemlerin türünün değiştirebildiğini ve çözümlerinin tekillikler ve yerelleştirmeler yapılabildiğini ortaya koymuşlardır [34].

Townsend ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmanın amacının, yapısal cam uygulamaları için alternatif bir birleştirme yöntemi olan yüksek performanslı akrilik köpük yapıdaki basınca duyarlı yapışkan bantların ilgili mekanik özelliklerinin belirlenmesi olduğunu belirtmişlerdir. Yapısal cam için geleneksel birleştirme yöntemlerinin, tipik olarak yapısal silikonların kullanılarak yapıldığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak ilgili ASTM test standartları ve spesifikasyonları, sınırlı zaman bağımlılığı gösteren silikonlar ve benzer ürünler için daha uygun olabileceği ön görüşünde bulunmuşlardır. Çalışma kapsamında, yapısal cam uygulamaları için akrilik köpüklü bantların karakterize edilmesini, değerlendirilmesini ve zaman bağımlılığı nedeniyle viskoelastik karakterizasyona yer verilmesini amaçlamışlardır. Akrilik köpüklü bantların ve silikonların, viskoelastik tepkilerinde önemli farklar olabileceği için, bu çalışmada yapısal cam uygulamaları için akrilikler ve silikonlar arasındaki önemli farklılıkların açıklanmasını hedeflemişlerdir. Çalışmada akrilik köpük bant olan 3M™ VHB Bant G23F kullanılmıştır. Karşılaştırma için, üç silikon üzerinde paralel rampa-hasar testleri; iki adet tek ve bir adet iki kısımlı kompozisyon ile gerçekleştirmişlerdir. İlgili malzeme için belirlenen mekanik özelliklerin, bir dizi sıcaklık değerinde ve test hızındaki viskoelastik özellikleri içerdiğini belirtmişlerdir. Literatürde mevcut olan mekanik özelliklerin silikonlar için varsayılmış olup, sınırlı zaman bağımlılığını teyit ettiğini belirlemişlerdir. Akrilik viskoelastik bant ve silikonlar için rampa-hasar dayanım verilerini ve sürünme kopması verilerini elde etmişlerdir. Zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibini kullanarak dinamik bir



mekanik analizörden (DMA) elde edilen verilerle, çekme-kayma durumundaki depolama ve kayıp modülünün ana eğrilerini geliştirmişlerdir. Bu yapısal testlerden elde edilen termal kayma faktörleri, farklı sıcaklıklarda toplanan viskoelastik bantın sürünme kopuşu ve rampadaki hasar oluşan verilerine başarıyla uygulayarak ve hasarsızlık-bozulma direncinin ana eğrilerini elde ederek (bu makalede), kayma ve çekme altındaki sünme kopma dayanıklılığını (II.makalede devamı olarak) vermişlerdir [35].

Townsend ve arkadaşlarının bu çalışması, yapısal cam için alternatif bir tutturma yöntemi olan yüksek performanslı akrilik basınca duyarlı yapışkanlı bantların mekanik özelliklerinin ölçümü üzerine yukarıda verilen makalenin ikinci bir parçasıdır. Sürünme sonuçları, viskoelastik yapıdaki camlı bantların yapısal silikonlara karşı uyguladığı doğal dengelerden bazılarını ortaya koymuştur. VHB bant, silikonlardan daha fazla zaman ve sıcaklık bağımlılığına sahiptir. VHB bant, incelenen zaman aralıklarında çoğu yapısal silikondan daha düşük mukavemete sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, VHB bant için daha düşük tasarım gerilmeleri ve yapısal silikon yapıştırıcılara eşdeğer sürünme performansında olabilmesi için daha büyük bant genişlikleri tarafından ele alındığı belirtilmiştir. Öte yandan, VHB bantın kısa süreli olan dayanım gücü, rüzgâr yüklemesi ve koruyucu cam gibi uygulamalarda avantajlı olabilecek bir özellikte olduğundan dolayı yapısal silikonlara bu özellikleri açısından daha üstün olarak bulunduğunu belirtmişlerdir [36].

## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, araştırma kapsamında yapılan deneysel, analitik ve nümerik çalışmaların dayandığı kuramsal temeller detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Genel olarak tüm malzemeler (katı, sıvı, gaz hallerde dâhil olmak üzere) için yapılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine ait deneysel çalışmalardaki mekanik analizlerde, ilgili sistemin şekil değiştirmesi, farklı yüklemeler (fiziksel ve kimyasal her türlü etkileşimler) karşısındaki davranışlarının çeşitli standartlarda sabitleşen koşullar altında anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada, viskoelastik yapıdaki bir bantın farklı ön gerilme ve yükleme koşulları altındaki davranışlarına ait kuramsal temeller çok yönlü olarak incelenmiştir.

Deneysel olarak malzemenin mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi farklı bir süreçten oluşmaktadır. Mekanik özellikler  $10^{-10}$  ve  $10^1$  m düzeyinde değişen ölçeklerde farklı bilimsel disiplinler tarafından değerlendirilmekte olup birbirlerini kapsayan ve bağımlı dört ana boyutsal bölümden oluşmaktadır. Her bölümde meydana gelen durumu oluşturan sebeplerin araştırılması, bir alt bölümde incelenmek suretiyle gerçekleştirilmektedir. Örneğin, mühendislerin tasarladıkları yapısal sistemlerde kullanmış oldukları bileşenlerin boyutları  $10^{-1}$  ve  $10^1$  m ölçeğinde bulunmaktadır. Bu bileşenlerin bu ölçekteki davranışlarının sebeplerinin tespiti için gerçekleştirilen testler  $10^{-2}$  ve  $10^{-1}$  m ölçeğindedir. Yapılan bu ölçekteki testlerde karşılaşılan sebeplerinin araştırılması ise  $10^{-9}$  ve  $10^{-3}$  m ölçeğindeki yani mikro ve/veya nano düzeydeki çalışmalar ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu ölçekteki testlerde karşılan durumların sebeplerinin araştırılabilmesi için ise  $10^{-10}$  ve  $10^{-9}$  m ölçeğinde yani atom ve/veya atom altı düzeyde çalışılmasını gerektirmektedir [37]. Bu nedenledir ki, artık günümüzde modern yaklaşımla yapılan bütün araştırma süreçleri birden çok disiplinle ve bu disiplinlerin tamamında ortak olarak yer alan deneysel-analitik-nümerik çalışmalar ile ortaklaşa değerlendirilerek gerçekleştirilmektedir.

Araştırma kapsamında yapılan analitik ve nümerik çalışmalarda yer alan konuların dayandığı esaslar ise ayrı bir öneme sahiptir. Farklı ölçeklerde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen türlü sonuçların dayanmakta olduğu analitik formda genel prensipler bulunmaktadır. Bu prensiplerin tamamı, matematiksel süreçler sonucunda elde edilen fonksiyonlar ile tanımlanarak deneysel verilerle olan geçerliliklerini de içermektedir. Analitik çalışmalar, yukarıda bahsedilen genel esaslara dayanan ve modern bir yaklaşıma sahip olan Sürekli Ortam Mekaniği aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmalar ise, elde edilen deneysel ve analitik çalışmaların neticesinde ortaya çıkan genel prensiplere dayanarak, günümüzün modern teknolojisinin üretmiş olduğu gelişmiş bilgisayarlar tarafından hızlı ve

hatasız olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nümerik çalışmalarda, literatürde kullanılacak birçok yöntem (sınır elemanlar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi) bulunmaktadır. Araştırma kapsamında yapılan nümerik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan ve bir mühendislik hesaplama aracı olan sonlu elemanlar yöntemi, ticari yazılımlar aracılığıyla kullanılmış olup, ele alınan malzeme modellerinin detaylı olarak çok boyutlu değerlendirmeleri de yapılmıştır.

Viskoelastik malzemeler üzerinde oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışları farklı birçok analitik metotla çözümlenebilmektedir. Önerilen bu metotların her birinde ise farklı kısıtlamalar (sınır koşulları, yükleme türleri, yapının geometrik durumunun basitleştirilmesi gibi) söz konusu olmaktadır. Genel olarak önemli bazı kabullerle basitleştirmeler yapılarak çeşitli matematiksel modeller önerilmiştir. Ancak çözümün esası, zaman değişkenine bağımlı doğrusal elastik denklemlere benzetim yapılarak doğrusal viskoelastik denklemlerin türetilmesine veya dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır [3].

Standartlaştırılmış çeşitli deneylerden elde edilen veriler kullanılarak ortaya çıkan çeşitli parametreler aracılığıyla analitik fonksiyonlar türetilmektedir. Bu analitik fonksiyonlar, deney sürecinde oluşan olayları olabildiğince iyi bir şekilde ifade edebilirse, bu fonksiyonlara dayalı olarak kurulan nümerik modellerde o kadar çok gerçekçi ve genelleştirici sonuçlar vermektedir. Klasik anlayışla ortaya konulan bu modellerde bünyesinde oluşturulan fonksiyonlar ise, bazı sınırlandırılmaları ortaya çıkarması sebebiyle gerçekçi modellemelerden uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yapılan araştırma çalışmaları süresince, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için, modern bir yaklaşıma sahip olan Sürekli Ortam Mekaniği'nin esasları çerçevesinde çalışmalar detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

## **2.1. Sürekli Ortam Mekaniğinin Temelleri**

Bilimin ve teknolojinin her alanında gerçekleştirilen türlü yapısal sistemlere ait davranışların incelenmesini kapsayan araştırmalarda, mekanik çok önemli bir yer tutmaktadır. Mekanik bilimi, katı-sıvı-gaz haldeki maddenin çeşitli kuvvetler etkisi altındaki şekil değişimlerini incelemektedir. Bu incelemelerini ise, analitik fonksiyonlar aracılığı ile gerçekleştirmektedir.

İncelemelerde kullanılan analitik fonksiyonlarda, madde tamamen bütünsel bir yapıda olacak şekilde yani boşluksuz bir yapıda kabul edilerek ele alınmaktadır. Bu kabul ile sürekli ortama sahip bir madde kabul edilmektedir. Bu hipotezi kabul eden maddeyi mekanik açıdan inceleyen

bu anlayış ile Sürekli Ortam Mekaniği ortaya çıkmıştır [38]. Bir madde Sürekli Ortam Mekaniği ile incelenmesi esnasında tanımlaması yapılan diğer tüm parametrelerde (yoğunluk, gerilme, şekil değiştirme vb.) aynı şekilde sürekliliğe sahip olduğu kabul edilmektedir. Örneğin sürekli ortam mekaniğinde bir maddenin yoğunluğunun hesaplanması Denklem 2.1’de verilmiştir [38].

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \epsilon^3} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de yer alan parametrelerden;  $\rho$  yoğunluğu,  $\Delta m$  üç boyutlu kütle,  $\Delta V$  üç boyutlu hacmi,  $\epsilon^3$  ise sonlu üç boyutlu hacimde yer alan moleküller arası uzaklığı ifade etmektedir. Bu denklemde, limit  $\epsilon \rightarrow 0$  olacak şekilde işlem yapıldığında, moleküler düzeyde boşluk olmasına karşılık, matematiksel olarak idealleştirme yapılarak bir sürekli ortam oluşturulmuştur.

Bu yaklaşımla, Sürekli Ortam Mekaniği dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; Kinematik Denklemler (şekil-yer değiştirme), Kinetik Denklemler (doğrusal ve açısal momentum dengesi), Termodinamik Denklemler (Termodinamiğin I. ve II. Kanunu) ve Yapısal Denklemler (gerilme-şekil değiştirme) bölümlerinden oluşmuştur [38]. Bu çalışma kapsamında da kullanılan Yapısal Denklemler bölümü ve oluşum süreci detaylı bir şekilde incelenmiştir.

### 2.1.1. Yapısal Denklemlerin Genel Esasları

Sürekli Ortam Mekaniği’ni oluşturan ilk üç bölümdeki tüm denklemler kendilerine ait ve bağımsız özellikte değişkenler bulundurmaktadırlar. Bu değişkenler genel olarak, birincil alan değişkenleri ve ikincil alan değişkenleri olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Birincil alan değişkenleri içerisinde; yoğunluk, sıcaklık, yer değiştirme vektörü, hız vektörü gibi değişkenler yer almaktadır. İkincil alan değişkenleri içerisinde ise; özgül iç enerji, birim kütlenin entropi yoğunluğu, ısı akısı, Cauchy gerilme tensörü gibi değişkenler yer almaktadır. Sürekli Ortam Mekaniği’ni oluşturan son bölüm olan yapısal denklemler bölümünde ise yukarıda bahsedilen ve birbirlerinden bağımsız olarak yer alan birincil ortam değişkenleri ile ikincil ortam değişkenleri arasındaki ilişkilendirmeleri, gerilme-şekil değişimi oluşumunu içerecek şekilde ortaya koymaktadır [38]. Bu ilişkilendirmeler, maddenin katı-sıvı-gaz hallerini de içerecek şekilde genelleştirilmiş olmakla beraber, çalışma kapsamında katılardaki ve kısmen de sıvıları da içerecek viskoelastik özelliklerin belirlenmesi ile ilgili olan detaylandırmalara indirgenecek şekilde ele alınmıştır. Çünkü viskoelastik davranışlar bünyesinde, hem katıların elastik özelliklerini hem de sıvıların viskoz özelliklerini bulundurmaktadırlar.

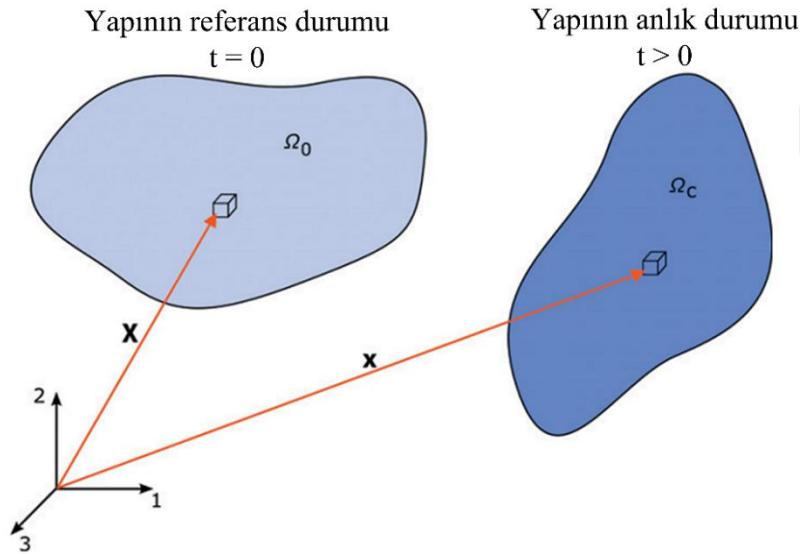
Sürekli Ortam Mekaniği'nde yer alan yapısal denklemler, gerçekleştirilen ilgili deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler çerçevesinde oluşmuş parametreler aracılığı ile ilişkilendirilerek kurulmaktadır. Kurulan bu denklemlerin dayanmış olduğu temel prensipler, sonraki bölümlerin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmak amacıyla aşağıda detaylı olarak verilmiştir [38].

- ◆ *Uyumluluk*: Tüm yapısal denklemler kütlelerin korunumu, momentum-enerji dengesi ve entropi eşitsizliği ile uyumlu olmalıdır.
- ◆ *Koordinat sistem değişmezliği*: Tüm yapısal denklemler, işlem yapılmak istenilen ve seçilen koordinat sisteminin türünden bağımsız olmalıdır.
- ◆ *Malzeme çerçeve farksızlığı*: Yapısal denklemler, malzeme farklı bir referans çerçevesinde incelenirse bile değişmemelidir.
- ◆ *Malzeme simetrisi*: Yapısal denklemler, malzemenin izotropik veya ortotropik olması durumunda malzeme simetrisini karakterize ederek göstermelidir.
- ◆ *Eş mevcudluk*: Tüm bağımlı değişkenler aynı bağımsız değişkenler listesinin işlevleri olmalıdır.
- ◆ *Belirlilik*: Herhangi bir zamanda malzeme üzerindeki herhangi bir noktanın yapısal değişkenlerinin değerleri, sürekli ortam içerisindeki tüm noktaların davranışları ile belirlenmelidir.
- ◆ *Bölgesel etki*: Malzeme içerisindeki herhangi bir noktadaki yapısal değişkenler, referans alınan bu noktadankinden uzakta yer alan noktalardaki bağımlı değişkenlerin değerlerinden önemli ölçüde etkilenmez.
- ◆ *Boyutluluk*: Yapısal fonksiyonlar, yapısal denklemlerin eşitlik olarak her iki tarafında da yer alan tüm terimler boyutsal anlamda tutarlı olmalıdır.
- ◆ *Sönümlenme hafızası*: Yapısal değişkenlerin mevcut değerleri, geçmiş zamanlarındaki değerlerinden önemli ölçüde etkilenmezler.
- ◆ *Nedensellik*: Sıcaklık ve sürekli bir hareket için tanımlanan değişkenler, ilgili sürekliliğin içerisinde oluşan her termomekanik davranışta kendini belli eden gözlemlenebilir etkiler olarak kabul edilirler.

### 2.1.2. Şekil Değişirme Kinematığı ve Oluşumunun İncelenmesi

Malzemelerin mekanik davranışlarının analitik olarak incelenmesinde klasik olarak kullanılan küçük şekil değişirme kabullü katı cisimler mekaniği, büyük şekil değişimi kapasitesine sahip olan polimer malzemelerin mekanik davranışlarını açıklamak için yeterli olmamaktadır. Polimer malzemelerdeki şekil değişimleri ve bu şekil değişimine neden olan kuvvetler neticesinde oluşan farklı türlerdeki gerilme ile şekil değişirme ilişkilerinin tanımlanabilmesi, büyük şekil değişirme kinematığını içeren sürekli ortam mekaniği teorisi ile oluşturulan yapısal denklemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Şekil değişimine maruz bir yapı üzerindeki şekil değişirme kinematığının şematik bir oluşumu Resim 2.1’de gösterilmiştir. Resim 2.1’de verilen yapının referans yani şekil değiştirmemiş durumu ( $\Omega_0$  fonksiyonu ile  $t=0$  s zamanında) ile şekil değişimi ve hareket oluştuktan sonraki durumu ( $\Omega_c$  fonksiyonu ile  $t>0$  s zamanında), referans bir koordinat sistemi içerisinde zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Yapının hareketi ve şekil değişimi genel olarak  $\Omega$  fonksiyonu ile tanımlanmıştır [2].



Şekil 2.1 Yapının referans ve anlık durumlarına ait hareket/şekil değişiminin zamanın bir fonksiyonu olarak şematik gösterimi [2]

Bu yapı üzerindeki şekil değişiminin bütünsel olarak incelenebilmesi için tüm yapının küçük sonlu hacimlere sahip elemanlara bölünmesi gerekmektedir. Yapı içerisinde belirlenecek herhangi bir referans elemanın konum değişimlerinin belirlenmesi yapıldığı takdirde tüm yapının şekil değişimi hakkında genel bir modelleme yapılabilir olacaktır. Bu nedenle Şekil 2.1’de gösterilen yapı üzerinde alınan sonlu hacimdeki bir elemanın, referans koordinat sistemine göre şekil değişimi olmadığı  $t=0$  s zamanındaki konumu  $\mathbf{X}$  ve şekil değişimi olduğu

$t > 0$  s zamanlarındaki konumu,  $\mathbf{x}$  ile vektörel değişkenler olarak tanımlanmıştır. Yapı üzerinde belirlenen bu elemanın hareketi ise  $\chi$  vektör fonksiyonu ile Denklem 2.2’de ifade edilmiştir [2].

$$\mathbf{x} = \chi(\mathbf{X}, t) \quad (2.2)$$

Yapı içerisinde alınan herhangi bir elemanın davranışının belirlenmesinden sonra, yapıyı oluşturan tüm elemanlar içinde aynı ilişkilendirme yapılması gerekmektedir. Bu ilişkilendirme bütün yapı dikkate alınarak gerçekleştirildiği durumda ise, şekil değiştirme gradyeni olarak tanımlanan yapının genel şekil değiştirmesi hakkında detaylı bir durum elde edilmiş olacaktır. Bu durum Denklem 2.3’de gösterilmiştir [2].

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \chi(\mathbf{X}, t)}{\partial \mathbf{X}} \quad (2.3)$$

Bu denklemde  $\mathbf{F}$ : şekil değiştirme gradyenini,  $\mathbf{X}$ : yapının referans durumunu,  $t$ : ise zamanı göstermektedir. Şekil değişiminin üç boyutlu olarak yani hacimsel olarak değişiminin gösterilmesi ise Denklem 2.4 ile ifade edilmiştir [2].

$$dv = \det(\mathbf{F})dV \quad (2.4)$$

Bu denklemde  $dv$  yapının referans durumundaki küçük hacimli bir elemanı,  $dV$  ise yapının anlık durumundaki seçilen küçük hacimli elemanın son durumunu ifade etmektedir.  $\det(\mathbf{F})$  ise, Jacobian determinanı olarak ifade edilmiştir. Bu durum Denklem 2.5 ile gösterilmiştir [2].

$$J = \det \mathbf{F} \quad (2.5)$$

Yapı üzerindeki uygulanan şekil değişim hızları veya şekil değişim oranları her zaman aynı olmak zorunda değildir. Bu nedenle şekil değiştirme oranlarının veya hızlarının zamana bağlı olmasından dolayı, genel olarak yapı üzerinde oluşan şekil değiştirme gradyeni üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu durum daha sonra da incelenecek olan çeşitli malzeme modelleme teorilerinin daha gerçekçi bir yapıda olmasını sağlayacaktır. Denklem 2.6’da şekil değişim gradyeninin zaman bağlı olan ilişkisi gösterilmiştir [2].

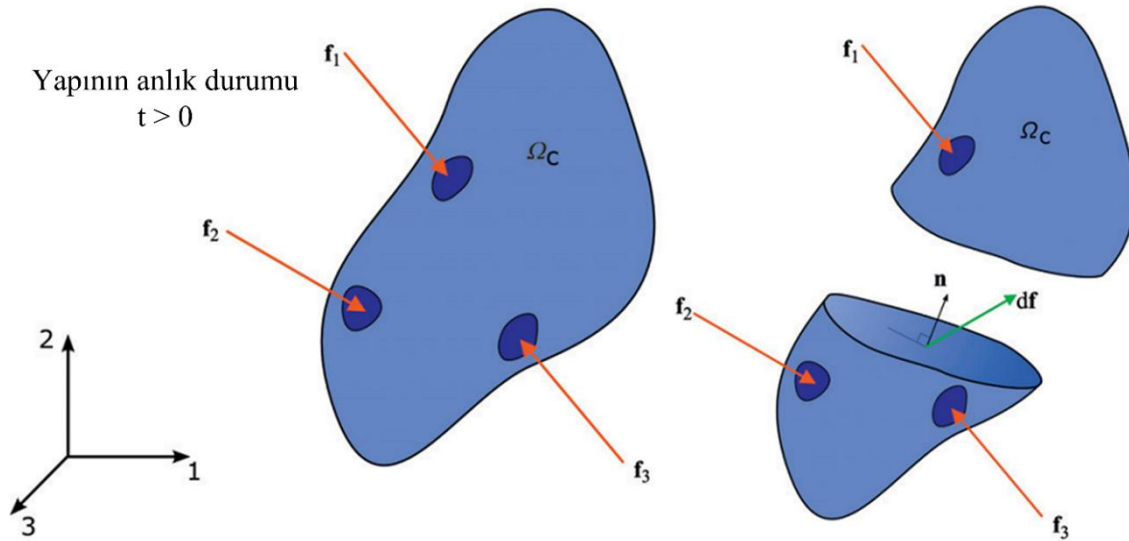
$$\dot{\mathbf{F}} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{X}} = \text{Grad } \mathbf{v} \quad (2.6)$$

Bu denklem ile yapı içerisinde bulunan her bir küçük hacimde bulunan elemanın şekil değişim gradyenlerinin, şekil değişim hızları arasındaki ilişkileri belirlenerek tüm yapı üzerindeki elemanlar için süperpoze edilerek yapının bütünsel olarak davranışı elde edilebilmektedir.

### 2.1.3. Gerilme Oluşumlarının İncelenmesi

Yapı üzerinde meydana gelen şekil değişimleri her zaman için fiziksel bir etkileşim sonucunda gerçekleşmektedir. Bu fiziksel etkileşim yapının içinde bulunduğu koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte, çalışmamız kapsamında bileşik kuvvet ve ön gerilme koşullarının mevcut olmasından dolayı fiziksel etkileşim kaynağının kuvvet olarak tanımlanması yapılmıştır. Bir önceki bölümde yer alan Şekil 2.1'deki yapı üzerinde oluşan şekil değişiminin, dış kuvvetler neticesinde meydana geldiği bir durum olarak dikkate alınırsa, kuvvet ve şekil değişimi arasındaki ilişkilendirmelerin ortaya konulması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, bu duruma ilaveten yapı üzerinde uygulanan kuvvetin etkisi ile bir gerilme hali de ortaya çıkaracaktır. Bu durumda, yapı üzerinde uygulanan kuvvetin oluşturduğu şekil değiştirme hali ve gerilme hali arasındaki ilişkilerin incelenmesi gerekmektedir. İfade edilen bu durum Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Şekil 2.2'de, yapı üzerine etki eden dış kuvvetler neticesinde oluşan  $t > 0$  s zamanındaki denge durumuna ait şekil değişimi ve yapı içerisinde tepki olarak oluşan  $df$  iç kuvvetinin gösterimi yapılmıştır [2].



Şekil 2.2 Şekil değişimine uğramış yapısal bileşenin üzerinde etki eden dış kuvvetler ve tepki olarak oluşan iç kuvvetlerin şematik gösterimi [2]

Yapı içerisinde oluşan tepki kuvveti, sanal olarak ikiye ayrılan yüzey üzerinde oluşmakta olup, Denklem 2.7'de ifade edilmiştir [2].

$$df = df(\mathbf{x}, \mathbf{n}) \quad (2.7)$$



Bu denklemde;  $\mathbf{n}$  yüzey normalini ve  $\mathbf{x}$  ise kuvvetin konumunu göstermektedir. Bu yüzeyde oluşan kuvvetler birim yüzey başına ( $ds$ ) düşen bir kuvvet olan sürtünme kuvveti ( $\mathbf{t}$ ) olarak da Denklem 2.8'de ifade edilmiştir [2].

$$d\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{n}) = \mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{n})ds \quad (2.8)$$

Yapı üzerindeki her bir eleman için sanal olarak ikiye ayrılan düzlemin yönünden bağımsız olarak oluşan gerilme dağılımı ise Denklem 2.9 ile ifade edilmiştir [2].

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{n}) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x})\mathbf{n} \quad (2.9)$$

Bu denklemde yer alan  $\mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{n})$  Cauchy yüzey sürtünmesi olarak tanımlanmaktadır. Cauchy gerilme tensörü ise Denklem 2.10'da verilmiştir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \sum_{i=1}^3 \sigma_i \hat{\mathbf{n}}_i \otimes \hat{\mathbf{n}}_i \quad (2.10)$$

#### 2.1.4. Yapısal Denklemlerin Oluşumu

Önceki bölümlerde, yapısal denklemler oluşturulurken gerekli temel esaslar ve temel kuvvet, gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri ve zamana bağlı oluşumları detaylı olarak belirtilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ise sürekli ortam mekaniği kapsamında ele alınan yapısal denklemlerin oluşumu incelenmiştir. Yapısal denklemler, malzemelerin çeşitli mekanik davranışlarının modellenmesine kullanılmaktadırlar. Bir malzeme modelinin yapısal denkleminin yazılması iki farklı biçimde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, geleneksel sürekli ortam mekaniğine ait tensör temelli biçimdir. İkincisi ise; nümerik uygulamalar için uygun bir vektörel biçimdir. Çalışma kapsamında her iki biçimde kullanılmış olup, ilk gösterim biçimi teorik açıklamalar için, ikinci gösterim biçimi ise nümerik uygulamalar için kullanılmıştır. Ancak nümerik uygulamalardaki yazılımsal ifadeler için bu ikinci gösterim biçimi daha elverişli olmasına rağmen sadece şekil değişimine bağlı gerilme halini ifade etmek yapısal denklem için bu şekliyle yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, yapısal denklemleri kurarken, ek olarak Jacobian rijitlik matrisini, şekil değişimi enerji yoğunluğunu ve dağılmış enerji yoğunluklarını da yapısal denklem bünyesinde ifade etmek gerekliliği bulunmaktadır [39].

Yapısal denklemlerin farklı oluşum sınıfları bulunmaktadır. Örneğin, doğrusal olmayan elastik bir yapıya sahip malzeme modeli için, uygulanan şekil değişimi neticesinde oluşan gerilmeye ait fonksiyon Denklem 2.11'de verilmiştir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{F}) \quad (2.11)$$

Bu denklemde; üç boyutlu yapısal uzaydaki Cauchy gerilmesi  $\boldsymbol{\sigma}$  ile gösterilmiş olup, eşitliğin diğer tarafında ise  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{F})$  şekil değişimi gradyeninin bir fonksiyonu (iki nokta arasındaki tensör) olduğu ifade edilmiştir. Şekil değişimi gradyeni ise Denklem 2.12'de verilmiştir [2].

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} \quad (2.12)$$

Bu denklemde;  $\mathbf{x}$ : üç boyutlu yapısal uzaydaki konum vektörünü,  $\mathbf{X}$ : Referans yapıdaki konum vektörünü göstermektedir.

Polimer malzemelerin hız bağımlı tepki davranışı göz önüne alınarak, polimer malzemeler için oluşan Cauchy gerilmesi için geçerli olan yapısal eşitlik, Denklem 2.13'de verilmiştir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{F}, \dot{\mathbf{F}}) \quad (2.13)$$

Bu denklemde;  $\mathbf{F}$ : şekil değişimi durumunu,  $\dot{\mathbf{F}}$ : şekil değişimi oranını göstermektedir.

Genel olarak, ilgili olan birincil ve ikincil alan değişkenleri arasındaki ilişkilendirmeler yukarıda ifade edildiği şekilde yapılmakta olup, malzeme üzerinde yapılan farklı türdeki yüklemelere tepki olarak malzemenin vereceği davranışların her biri için ayrı ayrı yapısal denklemlerinin bu şekilde kurulmasını gerektirmektedir. Bu çalışma kapsamında ise, ön gerilme hali ve bileşik kuvvet yüklemelerin gerilme ve şekil değişimi davranışları üzerindeki etkisini içeren yapısal denklemlerin bulunduğu farklı malzeme modelleri detaylı olarak incelenmiştir.

## 2.2. Reolojik Modellerin İncelenmesi

Malzemeler, farklı yükleme koşulları altında farklı davranışlar göstermektedirler. Malzemelerin fiziksel ve/veya kimyasal olarak her türlü etkiye karşılık göstermiş oldukları tüm tepkilerin temelinde ise, malzemenin yapısını oluşturan atomlar ve moleküller arası bağlar bulunmaktadır. Bu bağlar, malzemeyi dengede olacak şekilde bir arada tutarken, dış etkilere karşıda iç dengesini koruyacak şekilde tepki vermelerine neden olmaktadır. Malzemelerin, yükleme türü olarak kuvvet karşısında verdiği tepki ise şekil değişimi davranışı olarak ortaya çıkmakta olup, mekanik bir davranış olarak ele alınmaktadır. Malzeme üzerindeki şekil değişimlerinin oluşum süreci, malzemeyi oluşturan atomlar ve moleküller arasındaki bağların uygulanan kuvvet karşısında uzamasına veya kopmasına bağlı olarak oluşmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan kuvvetin büyüklüğü, bu bağları koparmaz sadece uzatır ise oluşan şekil

değişimi kalıcı olmamaktadır. Eğer uygulanan bu kuvvetin büyüklüğü, bu bağları koparacak kadar yüksek bir değerde olduğunda ise kalıcı bir şekil değişiminin oluşum süreci ortaya çıkmaktadır [37]. Her iki durumda malzemelerin mekanik davranışları için belirleyici kabul edilmektedir. Ancak yapılan farklı türlerdeki standartlaşmış deneylerde ise malzemenin mekanik olarak her iki davranışı birlikte ve farklı oranlarda içerecek şekilde gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle malzeme üzerine uygulanan kuvvetin oluşturduğu gerilme ve şekil değiştirme davranışlarını ifade edecek denklemler için farklı bir modellemeye gereksinim duyulmuştur. Bu türdeki modeller, *Reolojik model* olarak tanımlanmaktadır. Bu modelleme, hem kalıcı olmayan yani elastik davranışı hem de kalıcı şekil değişimine geçiş esnasında ortaya çıkan viskoz davranışı içerdiğinden dolayı, çalışma kapsamında da ele alınan VHB 4950 bantının viskoelastik davranışını daha gerçekçi bir şekilde ortaya koyduğu için tercih edilmiştir.

### 2.2.1. Reolojik Modeller ve Temel Bileşenleri

Viskoelastik malzemelerin yükleme karşısındaki mekanik davranışları, hem elastik hem de viskoz özellikleri eş zamanlı ve etkileşimli olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle Şekil 2.3'de verilen Reolojik modellemede, elastik ve viskoz özelliği ifade edecek temel iki bileşene gereksinim duyulmuştur. Elastik özelliği gösterecek olan bileşen; kütsüz, tam doğrusal elastik Hooke modeli ile ifade edilen ideal bir helisel yay ile tanımlanmıştır. Şekil 2.3 (a)'da bu yayın şematik bir gösterimi verilmiş olup, mekanik davranışı Denklem 2.14 ile ifade edilmiştir [4].

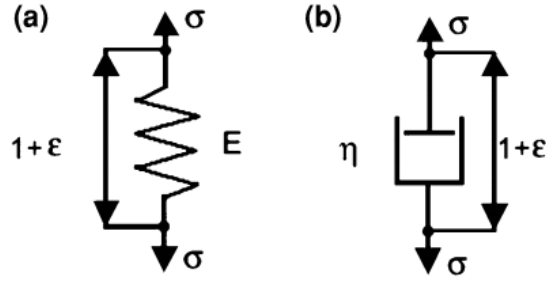
$$\sigma(t) = E \varepsilon(t) \quad (2.14)$$

Bu denklemde;  $\sigma(t)$  zamana bağlı gerilmeyi,  $\varepsilon(t)$  zamana bağlı şekil değişimini ve E elastisite modülünü göstermektedir.

Viskoz özelliği gösterecek olan bileşen; Newton denklemine göre uygulanan gerilme ile orantılı bir şekilde değişen ideal bir sönümleyici ile tanımlanmıştır. Şekil 2.3 (b)'de bu sönümleyicinin şematik bir gösterimi verilmiş olup, mekanik davranışı Denklem 2.15 ile ifade edilmiştir [4].

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (2.15)$$

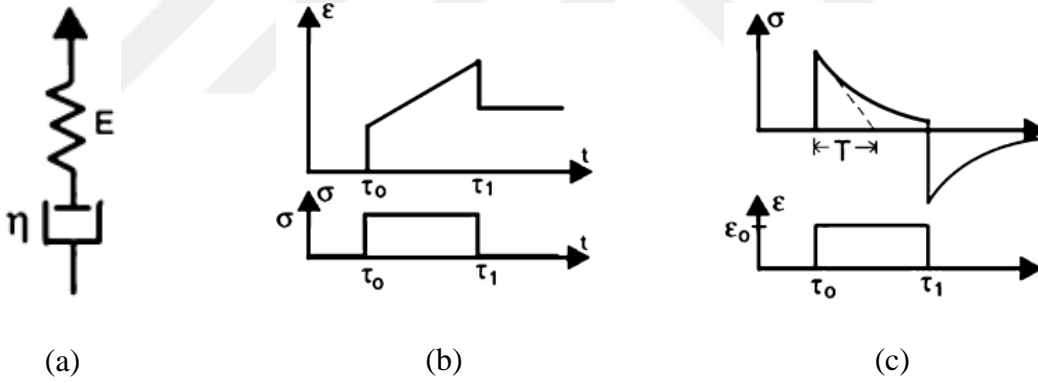
Bu denklemde;  $\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$  yani zamana bağlı şekil değiştirme oranını,  $\eta$  ise viskozite katsayısını göstermektedir.



Şekil 2.3 Reolojik modelin temel bileşenleri, (a) Yay (Hooke modeli) ve (b) Sönümleyici (Newton modeli) [4].

### 2.2.2. Maxwell Modeli

Reolojik model bileşenleri olan bir yay ve bir sönümleyicinin birbirlerine seri olarak bağlanması ile elde edilen modele Maxwell modeli denilmektedir. Bu modelin şematik gösterimi, sürünme test davranışı ve gevşeme test davranışına ait çalışma prensipleri Şekil 2.4'de detaylı olarak gösterilmiştir [4].



Şekil 2.4 Maxwell modeline ait; (a) Şematik görünümü, (b) Sürünme test davranışı, (c) Gevşeme test davranışı [4]

Reolojik bir model olan Maxwell modeline ait yapısal fonksiyonlar, Denklem 2.16, 2.17 ve 2.18 ile verilmiştir [4].

$$\epsilon(t) = \epsilon_E(t) + \epsilon_\eta(t) \quad (2.16)$$

Bu denklemde;  $\varepsilon_E(t)$ : yayın zamana bağlı şekil değişimini,  $\varepsilon_\eta(t)$ : sönümleyicinin zamana bağlı şekil değişimini,  $\varepsilon(t)$ : modelin toplam şekil değişimini göstermektedir.

$$\sigma_E(t) = \sigma_\eta(t) = \sigma(t) = E \varepsilon_E(t) = \eta \dot{\varepsilon}_\eta(t) \quad (2.17)$$

Bu denklemde;  $\sigma_E(t)$ : yaydaki zamana bağlı oluşan gerilmeyi,  $\sigma_\eta(t)$ : sönümleyicide zaman bağlı oluşan gerilmeyi,  $\sigma(t)$ : model üzerinde oluşan toplam gerilmeyi ifade etmektedir.

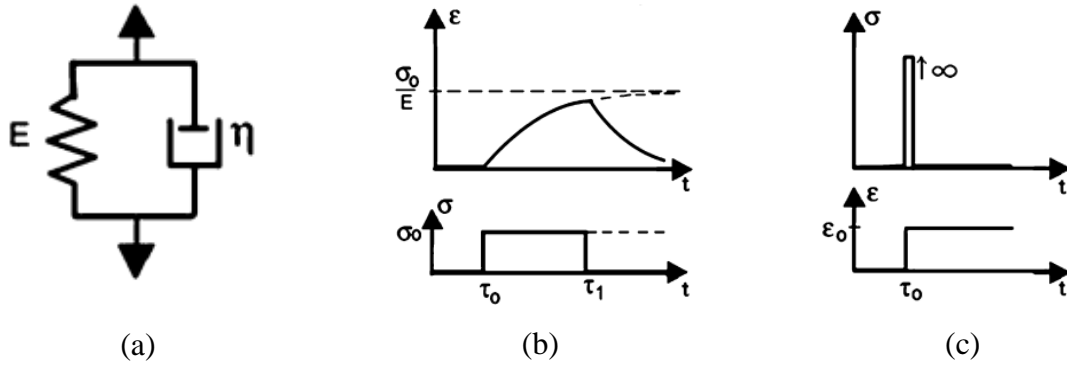
Denklem 2.16 ile verilen fonksiyonun t zamanına göre diferansiyeli alındığında, Denklem 2.18'de verilen gerilme veya şekil değiştirmeler, parametrik olarak tanımlanabilir Maxwell modeline ait yapısal diferansiyel denklemi elde edilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad \tau_0 > t \text{ için} \quad \varepsilon(t) = \sigma(t) = 0 \quad (2.18)$$

### 2.2.3. Kelvin Modeli

Reolojik model bileşenleri olan bir yay ve bir sönümleyicinin birbirlerine paralel olarak bağlanması ile elde edilen modele Kelvin modeli denilmektedir.

Bu modelin şematik gösterimi, sürünme test davranışı ve gevşeme test davranışına ait çalışma prensipleri Şekil 2.5'de detaylı olarak gösterilmiştir [4].



Şekil 2.5 Kelvin modeline ait; (a) Şematik görünümü, (b) Sürünme test davranışı, (c) Gevşeme test davranışı [4]

Reolojik bir model olan Kelvin modeline ait yapısal fonksiyonlar, Denklem 2.19, 2.20 ve 2.21 ile verilmiştir [4].

$$\sigma(t) = \sigma_E(t) + \sigma_\eta(t) \quad (2.19)$$

Bu denklemde;  $\sigma_E(t)$ : yayın zamana bağlı gerilmesini,  $\sigma_\eta(t) = \eta \dot{\epsilon}_\eta(t)$  olarak sönümleyicinin zamana bağlı gerilmesini,  $\sigma(t)$ : modelin toplam gerilmesini göstermektedir.

$$\epsilon_E(t) = \epsilon_\eta(t) = \epsilon(t) = \frac{\sigma_E(t)}{E} \quad (2.20)$$

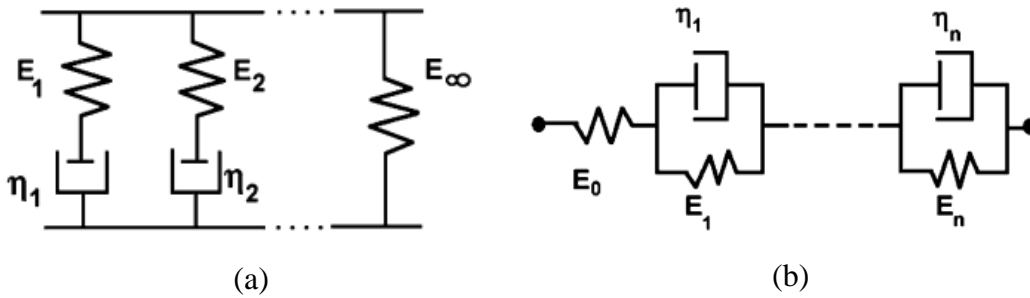
Bu denklemde;  $\epsilon_E(t)$ : yaydaki zamana bağlı oluşan şekil değişimini,  $\epsilon_\eta(t)$ : sönümleyicide zaman bağlı oluşan şekil değişimini,  $\epsilon(t)$ : model üzerinde oluşan toplam şekil değişimini ifade etmektedir.

Denklem 2.21’de verilen gerilme veya şekil değiştirmeler, parametrik olarak tanımlanabilir Kelvin modeline ait yapısal diferansiyel denklemi ifade edilmiştir.

$$\sigma(t) = E \epsilon(t) = \eta \dot{\epsilon}(t) \quad (2.21)$$

#### 2.2.4. Genelleştirilmiş Modeller

Maxwell ve Kelvin Reolojik malzeme modelleri tek başlarına gerçek malzemelerin davranışlarının modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle malzemelerin davranışlarının daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için, sistematik bir şekilde Maxwell ve Kelvin modelleri kendi yapıları içerisinde birbirleriyle zincirleme bir şekilde bağlanmasıyla oluşan genelleştirilmiş modeller oluşturulmuştur [4]. Oluşturulan bu modellerin şematik bir gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6 (a) Genelleştirilmiş Maxwell ve (b) Genelleştirilmiş Kelvin modellerine ait zincirlerin oluşumu [4]

Genelleştirilmiş Maxwell modelinde; Denklem 2.18 ile verilen tekil Maxwell elemanından r adet kullanılmasıyla, birbirlerine paralel bir yapı kurularak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu modele ait zamana bağlı toplam şekil değişimini ifade eden fonksiyon, Denklem 2.22 ile verilmiştir [4].

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon(t) = \left( \frac{1}{E_r} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\eta_r} \right) \sigma_r \quad (2.22)$$

Genelleştirilmiş Maxwell modelinde, zamana bağlı oluşan toplam gerilme ise Denklem 2.23 ile verilmiştir [4].

$$\sigma(t) = \left( E_\infty + \sum_{r=1}^n \frac{\frac{\partial/\partial t}{\frac{\partial/\partial t + 1}{E_r + \eta_r}}}{\frac{\partial/\partial t + 1}{E_r + \eta_r}} \right) \varepsilon(t) \quad (2.23)$$

Genelleştirilmiş Kelvin modelinde; Denklem 2.21 ile verilen tekil Kelvin elemanından r adet kullanılmasıyla, birbirlerine seri bir yapı kurularak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu modele ait zamana bağlı toplam gerilmeyi ifade eden fonksiyon, Denklem 2.24 ile verilmiştir [4].

$$\sigma_r(t) = \left( E_r + \eta_r \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon_r(t) \quad (2.24)$$

Genelleştirilmiş Kelvin modelinde, zamana bağlı oluşan toplam şekil değiştime ise Denklem 2.25 ile verilmiştir [4].

$$\varepsilon(t) = \left( \frac{1}{E_0} + \sum_{r=1}^n \frac{1}{E_r + \eta_r \frac{\partial}{\partial t}} \right) \sigma(t) \quad (2.25)$$

Genelleştirilmiş Maxwell ve Kelvin modelleri ile malzemelerin mekanik davranışları daha gerçekçi bir şekilde, hem bütünsel olarak deneylerden elde edilen gerilme veya şekil değişimleri verileri ile hem de her bir tekil eleman (Maxwell veya Kelvin elemanı) için ilgili gerilme veya şekil değişimleri elde edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Genelleştirilmiş Maxwell modeli belirli esaslar çerçevesinde belirlenerek oluşturulan (ağ sayısı, tekil bileşen türü vb.) Paralel Reolojik Ağ Modeli olarak kullanılmış olup, her bir tekil eleman bileşeni için ayrı model teorileri ile farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur.

### 2.3. Paralel Ağ Modelleri ve Bileşenlerinin İncelenmesi

Paralel ağ modelleri bünyesinde bulunan yay ve sönümleyicilerin birbirleri arasında tekil bir ağ ile bağlanması sonucunda, malzemelerin mekanik davranışları daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmektedir. Model bileşiminde yer alan yay ile elastik tepkiler, sönümleyici ile de viskoz tepkiler ifade edilmektedir. Her bir yay ve sönümleyici bileşenin ise bütünlük çalışma prensipleri farklı teoriler ile açıklanarak, gerçekçi malzeme modelleri oluşturulmaktadır. Çalışma kapsamında bu bölümde, viskoelastik davranışa sahip olan VHB 4950 bantının, analitik modelleme sürecinde kullanılan, yaygın elastik ve viskoz akış teorileri incelenmiştir.

### 2.3.1. Elastik Davranışın Model Teorileri

Basınca hassasiyetli akrilik polimer türündeki yapıştırıcı bir bant olan VHB 4950 malzemesinin, elastik davranışlarının modellenmesinde hiperelastik davranış yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu malzeme üzerinde yapılan standartlaşmış farklı tipteki testlerde ortaya büyük şekil değişimleri çıkmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında, maksimum yapışma performansı süresi olan 72 saat boyunca farklı ön gerilmeler altında birleştirmelerin yapılması gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde birleştirilen deney numuneleri üzerinde farklı türde oluşan bileşik yüklemelerin etki etmesi sonucunda gözlemlenen mekanik davranışın, doğrusal olmayan büyük şekil değişimleri içermekte olduğu belirlenmiştir. Belirtilen bu nedenlerden dolayı malzemenin mekanik davranışını gerçekçi olarak ifade etmesi bakımından daha uygun olması nedeniyle hiperelastik teoriler tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan hiperelastik modeller aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

#### 2.3.1.1. Yeoh Hiperelastik Modeli

Sürekli ortam mekaniğine göre yapısal denklemler kurulurken, Termodinamik Denklemler (Termodinamiğin I. ve II. Kanunu) bölümünden elde edilen bazı fonksiyonların kullanılması gerekmektedir. Çünkü malzeme, uygulanan yüklem karşısında şekil değiştirirken iç yapısında çeşitli enerji değişimleri gerçekleşmektedir. Bu kapsamda uygulanan yüklem türü kuvvet haricinde sıcaklıkta olabilir. Ama bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmesinden dolayı, malzemedeki enerji değişimi, kuvvet ve sabit bir sıcaklık karşısında oluşan enerji değişimi olarak ele alınmıştır. Daha gerçekçi bir modelleme yaklaşımına sahip olan Yeoh hiperelastik malzeme modelinin temeli ise, Helmholtz Serbest Enerji fonksiyonuna dayanmaktadır. Bu enerji değişimleri Helmholtz Serbest Enerji ile ifade edilmekte olup, birim referans hacim için Denklem 2.26 ile gösterilmiştir [2].

$$\psi = e_0 - \theta_0 \eta_0 \quad (2.26)$$

Bu denklemde;  $\psi$ : Birim referans hacim için Helmholtz serbest enerjisini,  $e_0$ : Birim referans hacim için iç enerjiyi,  $\theta_0$ : Referans yapıdaki sıcaklığı ve  $\eta_0$ : Birim referans hacimdeki entropiyi ifade etmektedir. Denklem 2.26 ile verilen Helmholtz Serbest Enerji fonksiyonu, Yeoh modeli için yeniden düzenlenmesi Denklem 2.27 ile gösterilmiştir [2].

$$\psi(C_{10}, C_{20}, C_{30}, \kappa) = C_{10}(I_1^* - 3) + C_{20}(I_1^* - 3)^2 + C_{30}(I_1^* - 3)^3 + \frac{\kappa}{2}(J - 1)^2 \quad (2.27)$$



Bu denklemde;  $C_{10}$ : Birinci Yeoh parametresini,  $C_{20}$ : İkinci Yeoh parametresini,  $C_{30}$ : Üçüncü Yeoh parametresini,  $\kappa$ : malzeme model parametrelerini,  $\kappa$ : Hacim (Bulk) modülünü,  $I_1^*$ : birinci değişmezi (invariantı),  $J = \det(\mathbf{F})$  ifade etmektedir.

Sıkıştırılabilir hiperelastik Yeoh modeli için, malzeme üzerinde oluşan Cauchy gerilmesi ise Denklem 2.28 ve Denklem 2.29 aracılığıyla geliştirilmiş olup, Denklem 2.30'da verilmiştir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial I_1^*} + \frac{\partial \Psi}{\partial I_2^*} I_1^* \right] \mathbf{b}^* - \frac{2}{J} \frac{\partial \Psi}{\partial I_2^*} (\mathbf{b}^*)^2 + \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial J} - \frac{2I_1^*}{3J} \frac{\partial \Psi}{\partial I_1^*} - \frac{4I_2^*}{3J} \frac{\partial \Psi}{\partial I_2^*} \right] \mathbf{I} \quad (2.28)$$

Bu denklemde;  $\mathbf{b}^* = J^{-2/3} \mathbf{F} \mathbf{F}^t$  soldan düzenlenmiş Cauchy-Green tensörünü ifade etmektedir.  $I_2^*$ : ikinci değişmeze herhangi bir bağımlılığın olmaması durumunda Denklem 2.28 yeniden düzenlenirse Denklem 2.29 elde edilir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial I_1^*} \right] \text{dev} [\mathbf{b}^*] + \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial J} \right] \mathbf{I} \quad (2.29)$$

Denklem 2.29, Denklem 2.27 ile ifade edilen duruma göre düzenlendiğinde Cauchy gerilmesi Denklem 2.30'da olduğu gibi elde edilir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} \{C_{10} + 2C_{20}(I_1^* - 3) + 3C_{30}(I_1^* - 3)^2\} \text{dev} [\mathbf{b}^*] + \kappa(J - 1) \mathbf{I} \quad (2.30)$$

### 2.3.1.2. Mooney-Rivlin Hiperelastik Modeli

Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli, birim referans hacimdeki Helmholtz Serbest Enerji denklemi,  $I_2^*$  ikinci değişmeze doğrusal bir bağımlılık gösterdiğini ifade etmektedir. Bu durum Denklem 2.31 ile ifade edilmiştir [2].

$$\Psi(C_{10}, C_{01}, \kappa) = C_{10}(I_1^* - 3) + C_{01}(I_2^* - 3) + \frac{\kappa}{2}(J - 1)^2 \quad (2.31)$$

Bu denklemde;  $C_{10}$ : Birinci Mooney-Rivlin parametresini,  $C_{01}$ : İkinci Mooney-Rivlin parametresini ifade etmektedir.

Mooney-Rivlin hiperelastik modeli için, malzeme üzerinde oluşan Cauchy gerilmesi ise Denklem 2.32'de verilmiştir [2].

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} (C_{10} + C_{01} I_1^*) \mathbf{b}^* - \frac{2C_{01}}{J} (\mathbf{b}^*)^2 + \left[ \kappa(J - 1) - \frac{2I_1^* C_{10}}{3J} - \frac{4I_2^* C_{01}}{3J} \right] \mathbf{I} \quad (2.32)$$

### 2.3.1.3. Ogden Modeli

Ogden modeli, birim referans hacimdeki Helmholtz Serbest Enerji denklemiyle ve uygulanan temel gerinimler cinsinden ifade edilen genel bir hiperelastik modeldir. Ogden modeli için Helmholtz Serbest Enerji denklemi, Denklem 2.33 ile ifade edilmiştir [2].

$$\Psi(\lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_3^*) = \sum_{k=1}^N \frac{2\mu_k}{\alpha_k^2} ((\lambda_1^*)^{\alpha_k} + (\lambda_2^*)^{\alpha_k} + (\lambda_3^*)^{\alpha_k} - 3) + \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (2.33)$$

Bu denklemde; k: değişken alt indisi,  $\lambda$ : temel gerinim oranlarını (x-y-z eksenlerine göre),  $\alpha$ : ilgili terimin üstel değerini,  $\mu$ : kayma modülünü ve D: hacim (bulk) modülü yerine geçen hacimsel terimi ifade etmektedir.

Ogden hiperelastik modeli için, malzeme üzerinde oluşan Cauchy gerilmesi ise Denklem 2.34'de verilmiştir [2].

$$\sigma_i = \frac{2}{J} \sum_{k=1}^N \frac{\mu_k}{\alpha_k} \left( (\lambda_1^*)^{\alpha_k} - \frac{1}{3} [(\lambda_1^*)^{\alpha_k} + (\lambda_2^*)^{\alpha_k} + (\lambda_3^*)^{\alpha_k}] \right) + \sum_{k=1}^N \frac{2k}{D_k} (J - 1)^{2k-1} \quad (2.34)$$

## 2.3.2. Akış Karakterinin Model Teorileri

Paralel ağ modellerinin tekil ağ bileşenleri içerisinde bulunan diğer bir elemanı olan sönümleyicinin, malzeme modeli üzerindeki tekil ağın bütünlük olarak viskoz etkileri ifade ettiği belirtilmiştir. Bu nedenle, malzeme üzerine uygulanan yükleme karşısında tepki olarak ortaya çıkan şekil değişimi sürecinde meydana gelen viskoz etkilerin ifade edildiği farklı teoriler bulunmaktadır. Çalışma kapsamında, araştırma süreci boyunca uygulanan şartlandırmalara en iyi uyum sağlayan ve yaygın olarak kullanılan akış model teorileri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

### 2.3.2.1. Bergstrom-Boyce Akış Modeli

Bergstrom - Boyce modeli (BB model), şekil değiştirme hali ve uygulanan yükleme karşısında oluşan gerilmenin bir fonksiyonu olarak viskoelastik akıştaki değişim oranını ifade etmekte olup, bu durum Denklem 2.35 ile gösterilmiştir [39].

$$\dot{\gamma}^p = [\lambda_L - 1 + \xi]^C \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_{base}} \right)^m \quad (2.35)$$

Bu denklemde;  $\dot{\gamma}^p$ : akış oranını,  $\lambda_L$ : moleküler zincir gerinimini,  $\xi$ : şekil değişimini düzeltme faktörünü,  $C$ : şekil değişiminin güç üstelini,  $\tau$ : uygulanan kayma gerilmesini,  $\tau_{base}$ : akış direnir gerilmesini,  $m$ : kayma akışının üstelini ifade etmektedir.

#### 2.3.2.2. Sinüs-Hiperbolik Akış Modeli

Bu model, malzeme üzerinde oluşan viskoz etkilerini sinüs-hiperbolik cinsinden ifade etmekte olup, Denklem 2.36 ile gösterilmiştir [39].

$$\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma}^0 \exp \left[ \frac{-\Delta G}{k_B \theta} \right] \times \sinh \left[ \frac{\Delta G \tau}{k_B \theta \hat{\tau}} \right] \quad (2.36)$$

Bu denklemde;  $\dot{\gamma}^0$ : girişim frekansını,  $\frac{\Delta G}{k_B}$ : aktive edilen hacmi,  $\Delta G$ : aktivasyon enerjisini,  $k_B$ : Boltzmann sabitini,  $\hat{\tau}$ : izotropik kayma direncini,  $\theta$ : mutlak sıcaklığı ifade etmektedir.

#### 2.3.2.3. Güç Kanunu Akış Modeli

Bu model, malzeme üzerinde oluşan viskoz akışı güç kanunu ile açıklamakta olup, Denklem 2.37 ile ifade edilmektedir [39].

$$\dot{\gamma}^p = \left( \frac{\tau}{\tau_{base}} \right)^m \quad (2.37)$$

Bu denklemde;  $\dot{\gamma}^p$ : akış oranını,  $\tau$ : uygulanan kayma gerilmesini,  $\tau_{base}$ : akış direnir gerilmesini,  $m$ : kayma akışının üstelini ifade etmektedir.

#### 2.3.2.4. Şekil Değişimli Güç Kanunu Akış Modeli

Bu model, elastomerik polimer malzemelerdeki hem küçük hem de büyük şekil değişimlerini yüksek doğrulukta tahmin edebilmekte olup, ilgili fonksiyon Denklem 2.38 ile verilmiştir [39].

$$\dot{\gamma}^p = \left( \frac{\tau}{\tau_{base}} \right)^{m^{eff}} \quad (2.38)$$

Bu denklemde verilen  $m^{eff}$  ise Denklem 2.39'da verilmiştir [39].

$$m^{eff} = [m_i - m_f] e^{-\varepsilon^p / \hat{\varepsilon}} + m_f \quad (2.39)$$

Bu denklemde;  $\epsilon^P$ : Mises şekil değişimini,  $\hat{\tau}$ : izotropik kayma direncini,  $m_i$ : küçük şekil değişimlerdeki şekil değişimi üstelini,  $m_f$ : büyük şekil değişimlerdeki şekil değişimi üstelini,  $\hat{\epsilon}$ : şekil değişimi geçişini ifade etmektedir.

#### **2.4. Malzeme Parametrelerinin Deney Verileri Aracılığıyla Oluşumu**

Çalışma kapsamında kurulmuş olan analitik modellerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmeleri, araştırmada yapılan deneyler referans alınarak belirlenen çeşitli parametreler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modellerin, deneylerden elde edilen sonuçlarla olabildiğince iyi bir şekilde yakınsaması ise elde parametrelerin optimizasyonları ve kalibre edilmeleri ile mümkün olmaktadır. Analitik modellemelerin temelinde ise, yapısal denklemler ile bu denklemlerde yer alan deneylerden elde edilen parametreler bulunmaktadır. Akrilik polimer bir yapıya sahip olan çalışma konusu VHB 4950 yapıştırıcı bant için en uygun yapısal denklemler ve teorik esasları çalışmanın önceki bölümlerinde incelenmiş olup, çalışmanın bu aşamasında ise ilgili parametrelerin kalibrasyon teknikleri ve değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir.

##### **2.4.1. Model Parametrelerinin Tanımlanması**

Deney verileri kullanılarak ilgili malzeme model parametrelerinin belirlenebilmesi için, öncelikle malzemenin gerçek davranışını en iyi ifade eden modelin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilk olarak malzemenin çalışma koşulları altındaki mekanik davranışlarının gözlemlenmesi önemli bir durum olup, belirli bir sürece göre aşamalı olarak değerlendirilmesi yapılmalıdır.

Malzemenin mekanik davranışlarına en uygun analitik modelin belirlenmesi aşaması gerçekleştirildikten sonra malzeme modelinin ihtiyaç duyduğu parametrelerin ilgili deneyler sonucunda elde edilen veriler aracılığıyla belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca modelin gereksinimlerine uygun farklı deneylerin gerçekleştirilmesi ihtiyacı da ortaya çıkmaktadır. Sürecin sonraki aşaması olan parametrelerin ilk değerleri belirlenirken yapılacak olan ilk işlem, Monte Carlo veya benzer bir malzemeye ait bazı ön bilgiler çerçevesinde elde edilecek yaklaşımlar gibi farklı yöntemler ile tespitinin yapılması gerekmektedir [40, 41]. Ardından elde edilen bu ilk parametrelerin analitik model fonksiyonunda yerine konularak elde edilen model sonuçlarının, deney verileri ile uyumlu olup olmadığının yani ne kadarlık bir hata ile yakınsadığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ortaya çıkan hata değerini ifade eden

bir fonksiyonla değerlendirilme yapılmalıdır. Örneğin, deneylerden elde edilen gerilme-şekil değişimi sonuçları ile analitik model sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme verileri arasındaki hata değeri Denklem 2.40 ve 2.41 ile ifade edilebilir [2].

$$\text{error}_1 = f(\sigma^{\text{analitik}} - \sigma^{\text{deney}}) \quad (2.40)$$

Bu denklemde;  $\sigma^{\text{analitik}}$ : tahmin edilen gerilme vektörünü,  $\sigma^{\text{deney}}$ : deneylerden elde edilen gerilme vektörünü ifade etmektedir.

$$\text{error}_2 = f(\varepsilon^{\text{analitik}} - \varepsilon^{\text{deney}}) \quad (2.41)$$

Bu denklemde;  $\varepsilon^{\text{analitik}}$ : tahmin edilen şekil değiştirme vektörünü,  $\varepsilon^{\text{deney}}$ : deneylerden elde edilen şekil değiştirme vektörünü ifade etmektedir.

#### 2.4.2. Model Parametrelerinin Optimizasyon Süreci

Model parametrelerinin optimizasyonu farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu çalışmada, Mcalibration yazılımı içerisinde bulunan fonksiyonlar aracılığı ile kalibrasyon ve optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Genel olarak ifade edilen bu süreçteki tüm işlemler Denklem 2.42 ile ifade edilmiştir. Yani, deney sonuçları ile analitik model verileri arasındaki farkın istenilen minimum düzeyde tutulabilmesi için Denklem 2.42 ile verilen doğrusal olmayan bir optimizasyon fonksiyonunun çözümü ile gerçekleştirilmektedir [2].

$$\min_{\xi} \sum_{i=1}^N f(M^i(\xi) - E^i) \quad (2.42)$$

Bu denklemde;  $\xi$ : optimize edilecek olan malzeme parametresinin vektörü, N: deneysel verilerin sayısı, f: hata ölçüm fonksiyonu,  $M^i(\xi)$ : i. sıradaki deney verisinden model parametresinin tahmini,  $E^i$ : i. sıradaki deney verisini göstermektedir.

Bu denklemlerde yer alan f fonksiyonu ile hata değerinin ölçümünü yaparak optimizasyon işlemlerinde kullanılan ve Mcalibration yazılımı içerisinde bulunan, Denklem 2.43 ile verilen normalleştirilmiş ortalama mutlak fark (NMAD: Normalized Mean Absolute Difference) fonksiyonu bulunmaktadır [2].

$$f(y^{\text{analitik}}, y^{\text{deneysel}}) = \frac{\langle |y^{\text{analitik}} - y^{\text{deneysel}}| \rangle}{\langle |y^{\text{deneysel}}| \rangle} \quad (2.43)$$

Bu denklemde; y parametresi deneylerden veya analitik modelden elde edilen gerilme veya şekil değiştirme vektörlerini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen model

kalibrasyonlarına ait hata değerleri, Nelder-Mead Simplex yöntemi [42] ile birlikte kullanılarak gerekli malzeme model parametrelerinin belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

## **2.5. Viskoelastik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi**

Çalışmanın bu aşamasında, sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bir bilgilendirme yapılmış olup, gerçekleştirilen deneyler esas alınarak oluşturulmuş çeşitli malzeme model parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemeler içerisindeki teorik olarak kullanımı açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan birçok ticari yazılım bulunmasına karşın, bu çalışmada eksantrik yüklemelere en uygun olan, ayrıca hem akademik hem de ticari olarak yaygın bir kullanıma sahip olan Abaqus® / Explicit yazılımı tercih edilmiştir. Aynı zamanda detaylı malzeme modellerinin ve parametrelerin oluşturumu için Mcalibration® yazılımı kullanılmıştır. Nümerik çalışmalarda, bu iki yazılım ortaklaşa olarak algoritmik bir şekilde kullanılmıştır.

### **2.5.1. Genel Modelleme Aşamaları**

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı malzemelerin çeşitli mekanik davranışlarının nümerik olarak modellenmesini sağlayan kullanışlı bir mühendislik aracıdır. Günümüzde sonlu elemanlar yönteminin programlama dilleriyle yazılım halinde, gelişmiş bilgisayarlar aracılığıyla kullanımı yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili çeşitli detaylı kuramsal esasları açıklayan birçok kaynak bulunmaktadır [2, 4, 43-47]. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında kullanılan esaslar neden-sonuç ilişkisi içerisinde bir algoritmik hiyerarşide incelenmiştir.

Genel olarak sonlu elemanlar yöntemi, doğrusal veya doğrusal olmayan analitik olarak oluşturulmuş yapısal denklemlerin çözümünü sağlamaktadır. Bu türdeki analitik denklemlerin çözümünün matematiksel olarak elle çözümü basit geometriye sahip problemler için yapılabilmektedir. Ancak karmaşık geometriler ve daha çok gerçekçi modellere ait problemlerin çözümü ise, sonlu elemanlar yöntemiyle verimli ve hızlı bir şekilde daha kolay çözümlenebilmektedir. Bu yöntemin ticari yazılımlar aracılığıyla kullanımı temel olarak 5 alt bileşene ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi, sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonu gerçekleştirilecek malzemenin geometrisinin oluşturulmasıdır. İkinci bileşen, bu geometri üzerinde, gerçek deney ortamında yapılan yüklemelerin uygulanmasıdır. Üçüncü bileşen, deney ortamındaki malzemenin sınır koşullarının ve çözüm ağı mekanizmasının oluşturulmasıdır.

Dördüncü bileşen, simülasyon ortamında bulunan yapısal modelin alt bölümleri arasındaki çeşitli temas mekanizmalarının tanımlanmasıdır. Son olarak beşinci bileşen ise, malzemenin deney sonuçlarına göre mekanik davranışlarına ait malzeme modelin oluşturulmasıdır.

Çeşitli malzeme modelleri, sonlu elemanlar yazılımı bünyesinde hazır olarak kullanıcılara sunulmuştur. Ancak en gerçekçi malzeme modeli, o malzemeyle ilgili yapılmış deneylerden elde edilen verilere dayanılarak elde edilebilmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar yazılımı içerisinde farklı yöntemlerle modellemeler yapılabilmektedir. Bu yöntemlerin en temel karakteristiği ise, malzemenin mekanik davranışlarını ifade eden malzeme modeli bünyesinde, analitik formda bulunan yapısal denklemleri ve bu denklemlerde modellemeyi sağlayan ilgili matematiksel parametreleri bulundurmasıdır.

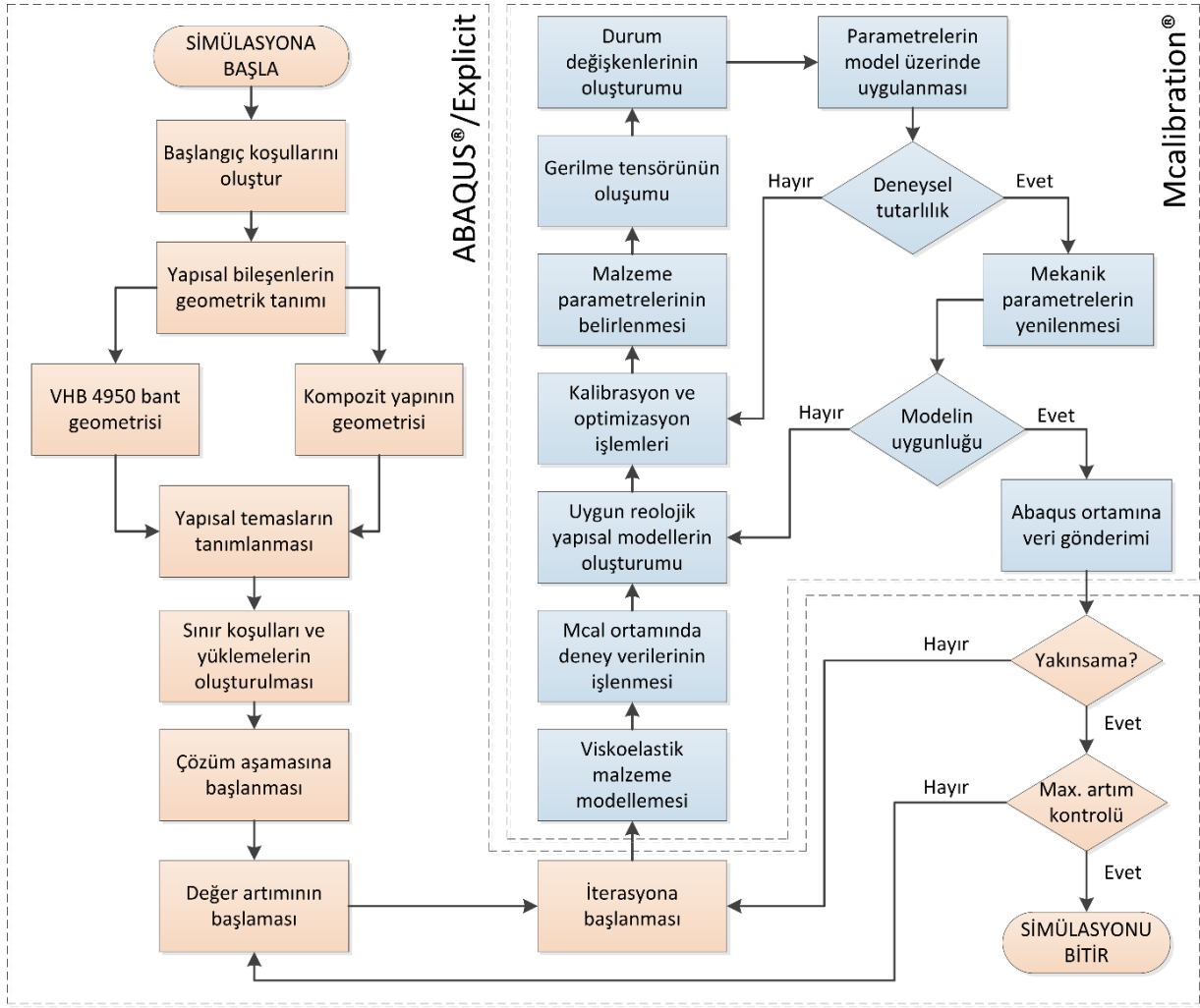
### **2.5.2. Viskoelastik Modelleme Süreci**

Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analize ait modelleme algoritmasının kuramsal süreci, Şekil 2.7’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Model algoritması temelde iki ana yazılım ortamında oluşturulduğu için, karşılıklı etkileşimler ve temel modelleme adımları arasındaki ilişkilerin durumları şekil üzerinde ayrıca belirtilmiştir.

Model algoritmasında malzeme modelinin oluşturumu ve model parametrelerinin belirlenmesi Mcalibration® yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın temel çalışma prensibi, standartlaştırılmış viskoelastik deneylerden elde edilen verilerin yazılım bünyesinde hazır olarak verilmiş çeşitli reolojik malzeme modelleri üzerinde olgusal kullanımına dayanmaktadır.

Çeşitli kalibrasyon ve optimizasyon işlemleri neticesinde elde edilen modelleme parametrelerinin Abaqus®/Explicit yazılımı ortamında sonlu elemanlar yöntemine göre doğrusal olmayan biçimde çözümlenmeleri gerçekleştirilebilmektedir. Esas alınan malzeme modeli ve parametreleri Abaqus®/Explicit yazılımında doğrudan kullanılabilirdiği gibi çeşitli kullanıcı alt yordam uygulamalarıyla da yapılabilmektedir.

Çalışma kapsamında, Mcalibration® yazılımında elde edilen verilerin doğrudan Abaqus®/Explicit yazılımında kullanımı, iki yazılım ortamında da işlenebilir bir formatta oluşturulan veri giriş dosyaları ile sağlanmıştır.



Şekil 2.7 Viskoelastik sonlu elemanlar analizine ait modelleme algoritması



### 3. MATERYAL VE METOT

Araştırmanın bu bölümünde, gerçekleştirilen deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında, yapısal bileşenlerin ve yapının bütününe ait araştırmalar standartlaşmış testler aracılığıyla yapılmış olup, süreç içerisinde gerçekleştirilen (donanım tasarımı, deney ortamı koşullarının oluşturulması, deney numunelerinin üretimi gibi) tüm aşamalar detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen verilerin analitik yapısal modeller aracılığıyla kullanımı, kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen verilerin belirlenmesi ve optimum malzeme modelinin içeriği açıklanmıştır. Son olarak nümerik çalışmalar kapsamında, yapısal alt bileşenlerin ayrı ayrı ve bütünsel olmak üzere iki farklı şekilde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerine ait süreçlerin açıklanması gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Deneysel Çalışmalar

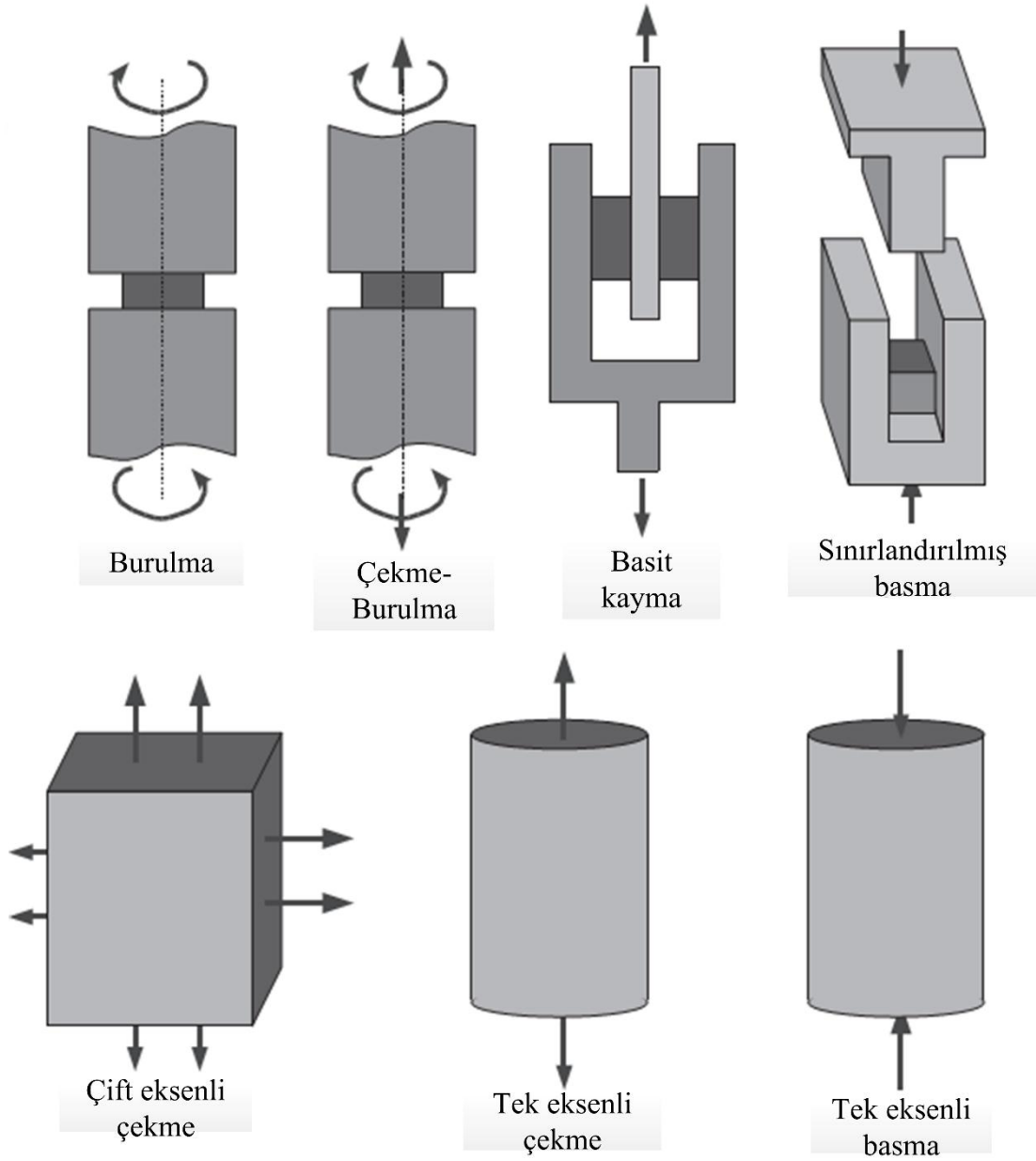
##### 3.1.1. Deney Numunesi Tasarımı

Polimer malzemeler içyapılarından dolayı diğer geleneksel malzemelerden daha farklı mekanik davranışlara sahip bulunmaktadır. Bu farklı mekanik davranışların belirlenmesi ve anlaşılabilmesi için ise farklı standartlaşmış deneyler geliştirilmiştir. Günümüzde polimer malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesi, aktif ve geniş bir alan durumunda olup, bu davranışların belirlenebilmesi için çok farklı (ASTM, ISO vb.) deney standartları bulunmaktadır. Bunlardan belirli yükleme koşulları altında sınırlandırılarak polimer malzemelerin tekil mekanik davranışların belirlenmesinde kullanılan yaygın deney standartları şu şekilde sıralanabilir [2]: tek eksenli basma deneyi [48], tek eksenli çekme deneyi [49-51], Izod darbe deneyi [52, 53], Charpy darbe deneyi [54, 55], dinamik mekanik analiz deneyi [56, 57], Rockwell sertlik deneyi [58], Shore deneyi [59], Barcol sertlik deneyi [60], Split-Hopkinson çubuğu basınç deneyi [61], küçük delme deneyi [62], V çentikli kiriş ile kayma deneyi [63] bulunmaktadır. Ek olarak elektriksel ve ısıl özelliklerin belirlenmesi için de çeşitli deneylere ait standartlarda bulunmaktadır [64-67].

Bu deneylerin haricinde, polimer malzemeler grubu içerisinde yer alan, akrilik polimer yapısında bulunan ve çalışmamız kapsamında incelenmesi yapılan 3M<sup>TM</sup> tarafından üretilen VHB 4950 yapıştırıcı bantının viskoelastik davranışlarının belirlenmesinde de kullanılan; tekli-adım gevşeme deneyi, çoklu-adım gevşeme deneyi, çevrimsel yükleme-boşaltma deneyi [15], farklı sıcaklıklardaki statik kayma dayanımı [68], 90° altındaki soyulma dayanımı deneyi [69], normal çekme deneyi [70], dinamik bindirmeli kayma deneyleri de [71] bulunmaktadır. Bu

deneylerin hepsinde temel amaç olarak belirli koşullar altında polimerlerin mekanik davranışlarının daha iyi incelenebilmesini sağlamak olup, ayrıca analitik modeller bünyesinde bulunan çeşitli malzeme parametrelerinin belirlenmesini de sağlamaktadır.

Polimer malzemelerin farklı yükleme koşulları altında ve daha gerçekçi bir şekilde gerilme-şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesi için literatürde geliştirilmiş deneylerde de kullanılan bazı yükleme örnekleri Şekil 3.1’de detaylı olarak verilmiştir [2]. Bu yükleme koşulları altında, ilgili polimer malzemenin uygulama yerlerinde oluşan kullanım koşulları altında karşılaşılabileceği yükleme şekillerini modellemek amacıyla geliştirilmiştir.



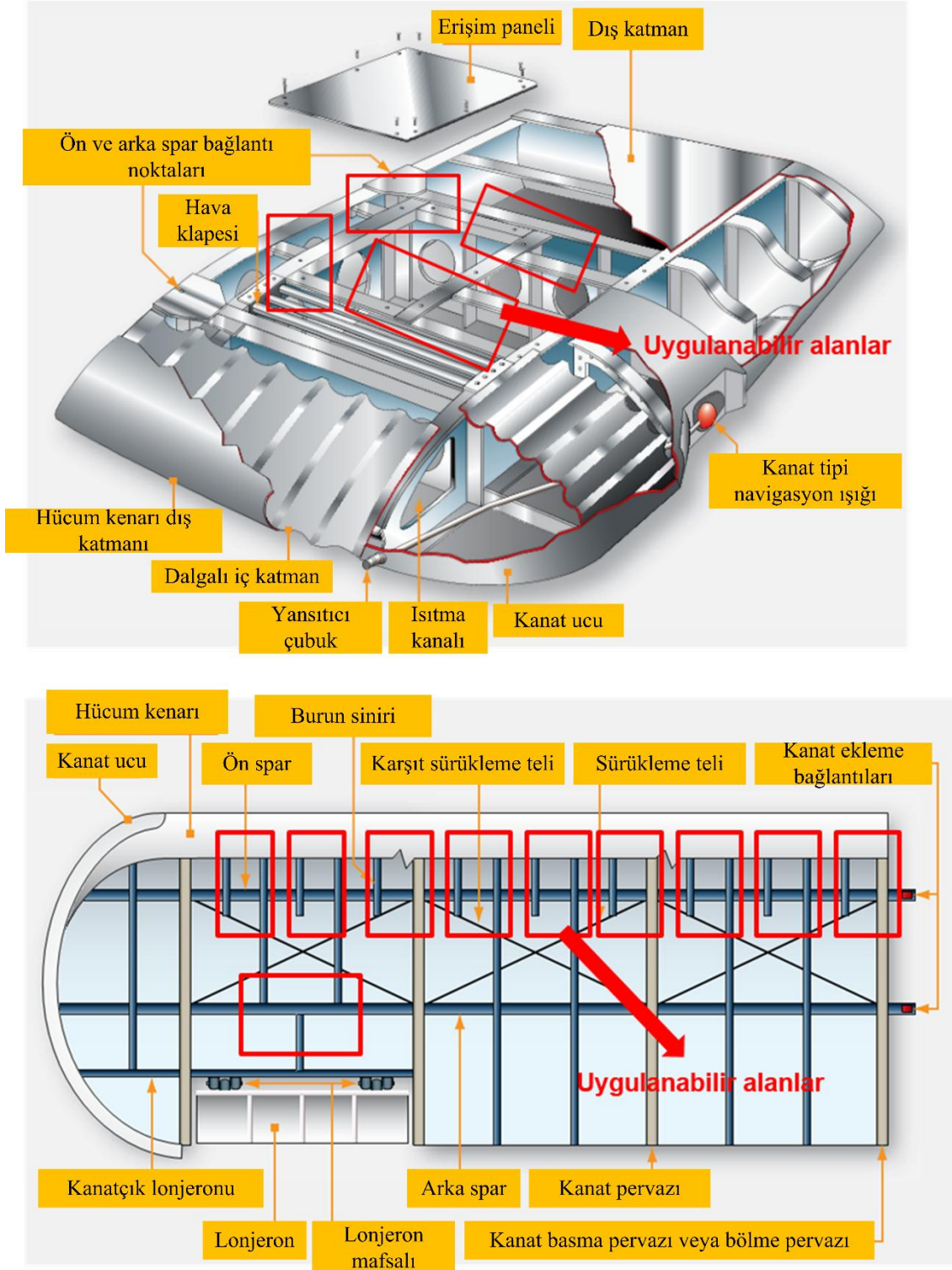
Şekil 3.1 Polimerlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesinde kullanılan yükleme modelleri [2]

Yapısal birleştirmelerde kullanılan akrilik polimer yapıya sahip yapıştırıcı bant kullanılarak yapılan birleştirmelerin çeşitli uygulama alanlarına ait gösterimleri ise Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Yapıştırıcı bant ile yapılan çeşitli uygulamalara ait örnekler [80]

Çalışma kapsamında incelemesi yapılan problemin geometrisine çok çeşitli uygulamalarda karşılaşılmaktadır. Örnek bir model olması açısından havacılık sektöründe karşılaşılan uygulamaları, Resim 3.2’de detaylı olarak gösterilmiştir.



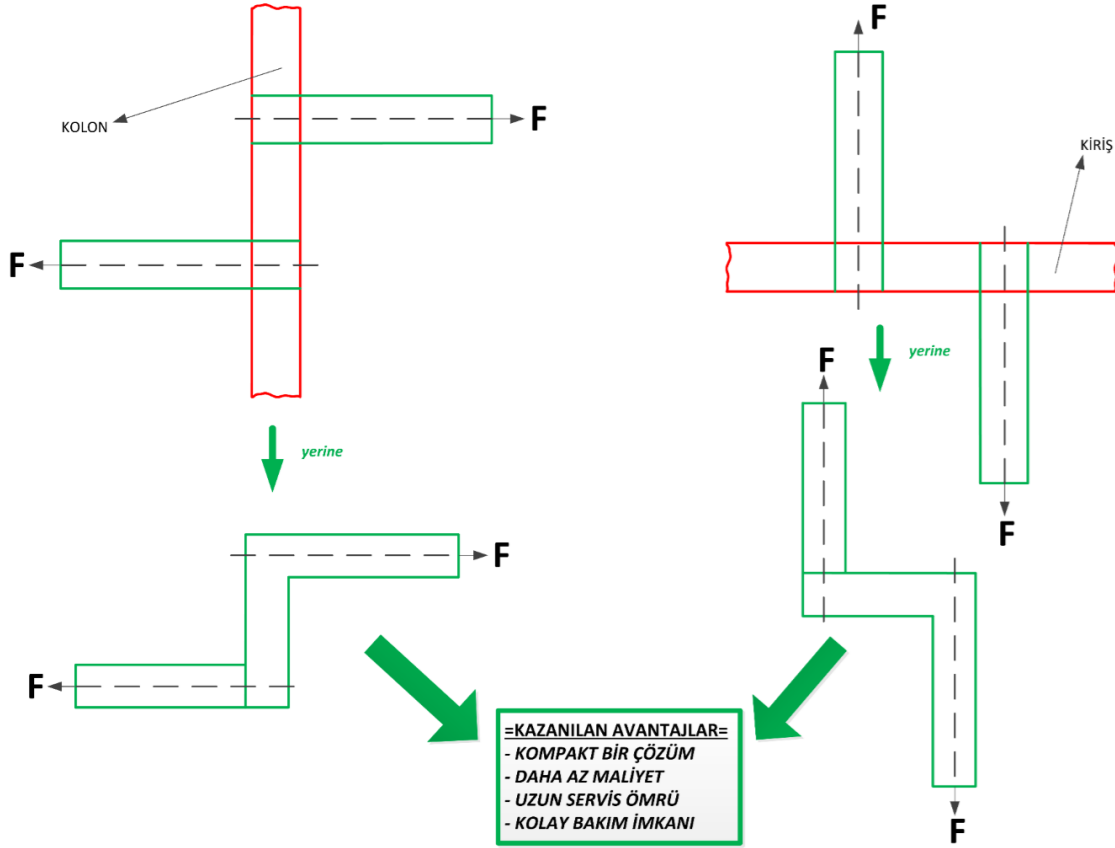
Resim 3.2 Çalşıma kapsamında incelenen problemin uygulama alanlarına ait örnek gösterimi

[81]

Bu problemin muhtemel bir çözümü olarak önerilen yapının şematik gösterimi ise, Şekil 3.2’de verilmiştir.

**ANA KOLON ÜZERİNE YAPILAN BAĞLANTILARDA KULLANIMI**

**ANA KİRİŞ ÜZERİNE YAPILAN BAĞLANTILARDA KULLANIMI**

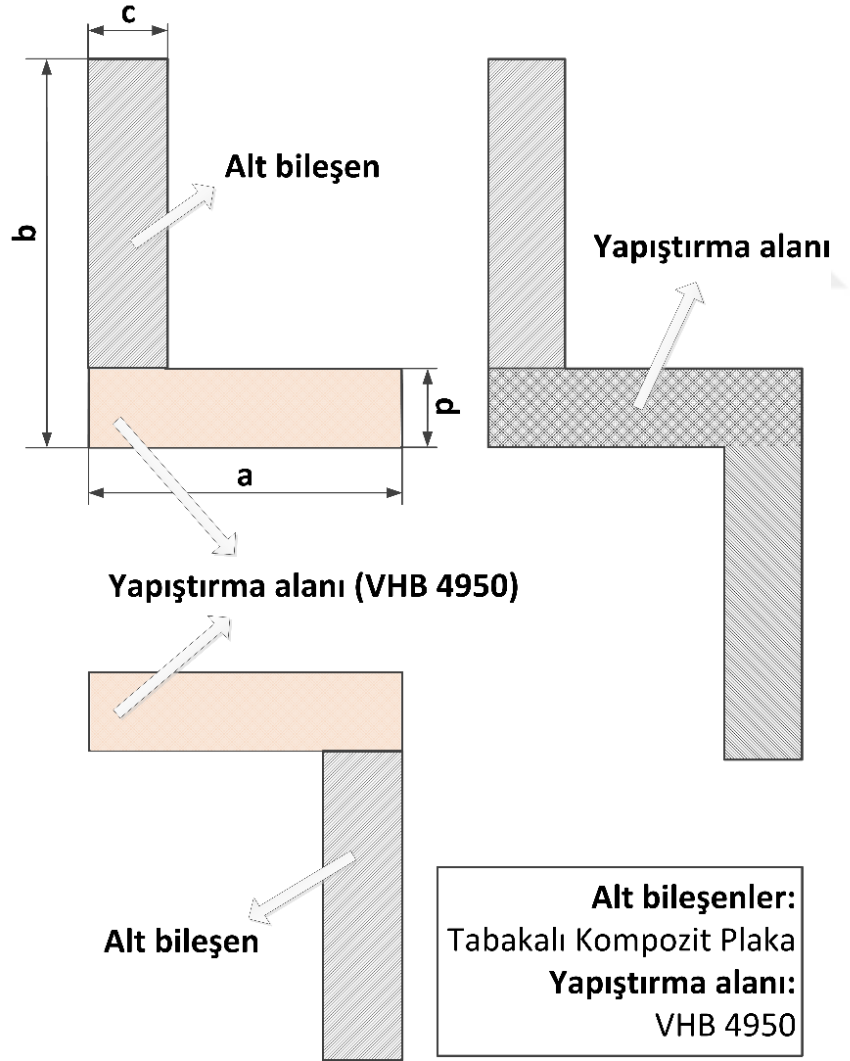


Şekil 3.2 Problemin çözümü için önerilen yapının şematik gösterimi

Problem çalışmasının otomotiv, inşaat, beyaz eşya, elektronik, reklamcılık gibi çok çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler yaygın bir şekilde endüstriyel uygulamalarda kullanılması nedeniyle, çalışma kapsamında bu malzeme türü içerisinde yer alan, E-cam takviyeli epoksi reçineli tabakalı kompozit plakalar kullanılmıştır. Bu sayede, problemin çözümünün geniş bir alanda kullanılabilir olması sağlanmıştır.

Resim 3.2’de, problemin havacılık alanındaki uygulamaları gösterilmiştir. Örnek olarak farklı türdeki uçak kanatlarına ait yapıların tasarımlarında yer alan bağlantılarında kullanılan mevcut uygulamalara alternatif olarak kullanımı önerilmektedir. Böylece, kanat yapılarında yer alan ana yük taşıyıcı kolon ve kirişler daha kompakt bir tasarıma sahip olması için model boyutunda araştırılması yapılmıştır. Şekil 3.2’de ise, önerilen bu tasarımla, uzun kolon ve kiriş yapıları yerine, daha kısa bağlantılarla daha hafif ve esnek bir yapı elde edilebilir. Böylece daha az bir maliyetle üretilebilirliği sağlanarak, yapının kolay bakımı ve uzun bir servis ömrüne sahip olması, tasarım ile kazanılan diğer avantajları arasında yer almaktadır.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere bileşik olarak yükleme koşuluna sahip ve genel geçerliliğe sahip bir deney türü çok kısıtlı olarak bulunmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, bileşik yüklemelere sahip bir deney yükleme koşuluna da çok az bir şekilde rastlanılmıştır. Bu nedenlerden dolayı, çalışma kapsamında geliştirilen deney numunesi tasarımı ile daha gerçekçi yükleme koşulları altındaki polimer malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesini hedef alan özellik, herhangi bir ilave deney aparatına ihtiyaç duyulmadan kendi ve özgün geometrisinden kaynaklanan eş zamanlı olarak eksantrik yüklemeleri oluşturabilmesi olarak ortaya konulmuştur. Eksantrik yüklemeleri oluşturma amacı ise, polimer malzemelerin çeşitli mekanik davranışlarının yukarıda ifade edilen deneylere ek olarak, daha kapsamlı ve gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için geliştirilen deney düzeneklerinin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Şekil 3.3’de, bu çalışmada geliştirilen deney numunesinin şematik olarak gösterimi verilmiştir.

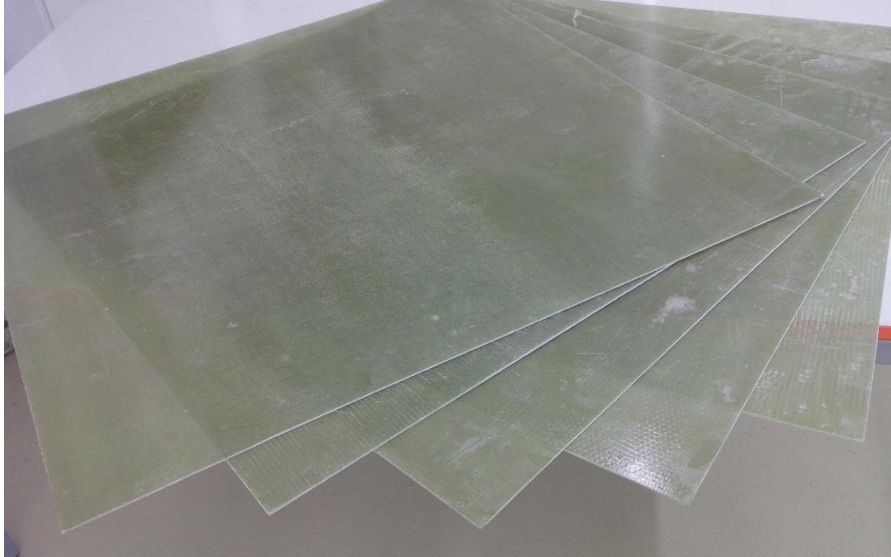


Şekil 3.3 Tasarlanmış eksantrik yükleme deney numunesinin şematik gösterimi

Şekil 3.3’de görüldüğü üzere, viskoelastik yapıya sahip olan VHB 4950 çift taraflı yapıştırıcı bantın üzerinde, kullanım koşulları altında oluşabilecek gerçekçi eksantrik yüklemeleri oluşturabilmek amacıyla iki alt bileşen, boyutsal geometrik parametreler ile belirlenmiştir. Aynı geometriye sahip olan bu alt bileşenler çalışma kapsamında tabakalı kompozit plakalardan elde edilmiş olup, şekilde verildiği gibi birbirlerine VHB 4950 bantı ile birleştirilmesi sağlanmıştır. Böylece bant üzerinde çekme deneyleri esnasında oluşturulacak olan eksantrik yüklemeler, ek olarak herhangi bir deney aparatına ihtiyaç duyulmaksızın ortaya çıkarılması sağlanmış olup, bu duruma karşı göstereceği mekanik davranışların incelenmesi detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.2. Deney Numunesi Üretimi ve İsimlendirme Sistemi

Yapısal yüklemelerde alt bileşen olarak kullanılan deney numuneleri, 16 tabakalı, tek yönlü E-cam fiber ile takviye edilmiş ve epoksi matris bileşenlerinden oluşan, el yatırması tekniği ile üretilen kompozit plakalardan oluşturulmuştur. Bu kompozit plakalar ise, Izoreel Firmasından temin edilmiştir. Resim 3.3’de verilen tabakalı E-cam/epoksi matrisli kompozit plakalar 3 mm kalınlığa sahip olarak üretilmiştir.



Resim 3.3 E-cam ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit plakalar

Resim 3.3’de gösterilen tabakalı kompozit plakalar, deney numunesi tasarımında yüklemeleri oluşturacak ters simetrik alt bileşenler olarak kullanılmıştır. Şekil 3.3’de gösterilen a, b, c ve d boyutsal parametrelerin orantısal ilişkileri aracılığıyla boyutlandırılmaları yapılmıştır. Bu sayede, VHB 4950 viskoelastik bant üzerinde sistematik bir şekilde bileşik yüklemelerin elde edilmesi sağlanmıştır. İlgili boyutların orantısal değişimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Tasarlanan deney numunesini oluşturan oransal geometrik parametreler

| Boyutsal Oran                              |     | Boyutsal Oran |     |      |      | Boyut Değerleri (mm) |
|--|-----|---------------|-----|------|------|----------------------|
|  |     | c/a           |     |      |      |                      |
|  |     | 0,4           | 0,5 | 0,6  | 0,7  |                      |
|  |     | 16            | 20  | 24   | 28   | c                    |
| d/c  | 0,4 | 6,4           | 8   | 9,6  | 11,2 | d                    |
|  | 0,5 | 8             | 10  | 12   | 14   |                      |
|  | 0,6 | 9,6           | 12  | 14,4 | 16,8 |                      |
|  | 0,7 | 11,2          | 14  | 16,8 | 19,6 |                      |
| b/a  | 0,8 | 32            |     |      |      | b                    |
|  | 1   | 40            |     |      |      |                      |
|  | 1,2 | 48            |     |      |      |                      |
| a=40 mm (her numune için sabit değerdedir) |     |               |     |      |      |                      |

Çizelge 3.1’de verilen oransal değerler, çalışma kapsamında yapılan araştırmalar neticesinde belirlenmiştir. Böylece, Çizelge 3.1 üzerinden numuneler sistematik bir şekilde oluşturulmuştur. Çizelge üzerinden oluşturulan her bir numune için sabit boyut a parametresi olarak ve 40 mm değerinde belirlenmiştir. Bu değere dayanılarak, ilgili c/a oranındaki değere yerine konularak c boyutu elde edilmektedir. Bulunan bu c boyutunun değeri, d/c oranındaki yerine konulduğunda d boyutu elde edilmektedir. Sabit olan a parametresinin değeri, b/a oranında yerine konulduğunda ise son olarak numunenin geometrisinin belirlenmesinde kullanılan b boyutu elde edilmektedir. Deney numunelerinin tümüne ait boyutsal değerleri ve isimlendirmeleri Çizelge 3.2’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

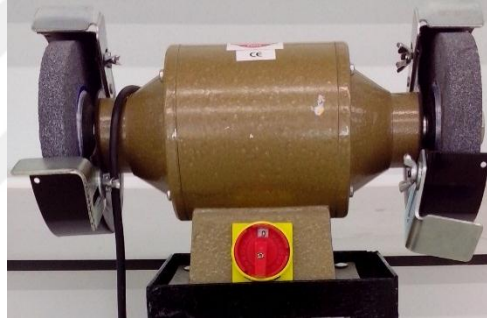
Çizelge 3.2 Tasarımı yapılan deney numunelerinin boyut değerleri ve isimlendirmeleri

| Seri Grubu | Numune Adı | c (mm) | d (mm) | b (mm) | a (mm) | Yapışma Alanı (mm <sup>2</sup> ) |
|------------|------------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|
| 16a Serisi | 16A1       | 16     | 6,4    | 32     | 40     | 256                              |
|            | 16A2       | 16     | 6,4    | 40     | 40     | 256                              |
|            | 16A3       | 16     | 6,4    | 48     | 40     | 256                              |
|            | 16A4       | 16     | 8      | 32     | 40     | 320                              |
|            | 16A5       | 16     | 8      | 40     | 40     | 320                              |
|            | 16A6       | 16     | 8      | 48     | 40     | 320                              |
|            | 16A7       | 16     | 9,6    | 32     | 40     | 384                              |
|            | 16A8       | 16     | 9,6    | 40     | 40     | 384                              |
|            | 16A9       | 16     | 9,6    | 48     | 40     | 384                              |
|            | 16A10      | 16     | 11,2   | 32     | 40     | 448                              |



|                   |                   | <i>Çizelge (3.2) DEVAMI</i> |      |     |    |     |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------|-----|----|-----|
|                   | <b>16A11</b>      | 16                          | 11,2 | 40  | 40 | 448 |
|                   | <b>16A12</b>      | 16                          | 11,2 | 48  | 40 | 448 |
|                   | <b>16A1</b>       | 20                          | 8    | 32  | 40 | 320 |
| <b>20a Serisi</b> | <b>20A2</b>       | 20                          | 8    | 40  | 40 | 320 |
|                   | <b>20A3</b>       | 20                          | 8    | 48  | 40 | 320 |
|                   | <b>20A4</b>       | 20                          | 10   | 32  | 40 | 400 |
|                   | <b>20A5</b>       | 20                          | 10   | 40  | 40 | 400 |
|                   | <b>20A6</b>       | 20                          | 10   | 48  | 40 | 400 |
|                   | <b>20A7</b>       | 20                          | 12   | 32  | 40 | 480 |
|                   | <b>20A8</b>       | 20                          | 12   | 40  | 40 | 480 |
|                   | <b>20A9</b>       | 20                          | 12   | 48  | 40 | 480 |
|                   | <b>20A10</b>      | 20                          | 14   | 32  | 40 | 560 |
|                   | <b>20A11</b>      | 20                          | 14   | 40  | 40 | 560 |
|                   | <b>20A12</b>      | 20                          | 14   | 48  | 40 | 560 |
|                   | <b>24a Serisi</b> | <b>24A1</b>                 | 24   | 9,6 | 32 | 40  |
| <b>24A2</b>       |                   | 24                          | 9,6  | 40  | 40 | 384 |
| <b>24A3</b>       |                   | 24                          | 9,6  | 48  | 40 | 384 |
| <b>24A4</b>       |                   | 24                          | 12   | 32  | 40 | 480 |
| <b>24A5</b>       |                   | 24                          | 12   | 40  | 40 | 480 |
| <b>24A6</b>       |                   | 24                          | 12   | 48  | 40 | 480 |
| <b>24A7</b>       |                   | 24                          | 14,4 | 32  | 40 | 576 |
| <b>24A8</b>       |                   | 24                          | 14,4 | 40  | 40 | 576 |
| <b>24A9</b>       |                   | 24                          | 14,4 | 48  | 40 | 576 |
| <b>24A10</b>      |                   | 24                          | 16,8 | 32  | 40 | 672 |
| <b>24A11</b>      |                   | 24                          | 16,8 | 40  | 40 | 672 |
| <b>24A12</b>      |                   | 24                          | 16,8 | 48  | 40 | 672 |
| <b>28a Serisi</b> | <b>28A1</b>       | 28                          | 11,2 | 32  | 40 | 448 |
|                   | <b>28A2</b>       | 28                          | 11,2 | 40  | 40 | 448 |
|                   | <b>28A3</b>       | 28                          | 11,2 | 48  | 40 | 448 |
|                   | <b>28A4</b>       | 28                          | 14   | 32  | 40 | 560 |
|                   | <b>28A5</b>       | 28                          | 14   | 40  | 40 | 560 |
|                   | <b>28A6</b>       | 28                          | 14   | 48  | 40 | 560 |
|                   | <b>28A7</b>       | 28                          | 16,8 | 32  | 40 | 672 |
|                   | <b>28A8</b>       | 28                          | 16,8 | 40  | 40 | 672 |
|                   | <b>28A9</b>       | 28                          | 16,8 | 48  | 40 | 672 |
|                   | <b>28A10</b>      | 28                          | 19,6 | 32  | 40 | 784 |
|                   | <b>28A11</b>      | 28                          | 19,6 | 40  | 40 | 784 |
|                   | <b>28A12</b>      | 28                          | 19,6 | 48  | 40 | 784 |

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere, sistematik tasarım parametreleri sayesinde toplamda 48 adet tasarlanmış numune ortaya çıkmış olup, her bir numuneye ayrı bir isimlendirme yapılmıştır. Çalışma kapsamında deney numunelerinin birleştirilmesi sürecinde uygulanan farklı ön gerilme değerlerinin numune ismi üzerinde belirtilmesinde ise sadece farklı ön ekler kullanılacak olup, Bölüm 3.1.4’deki yapısal deneyler içerisinde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Tasarımı yapılan deney numuneleri, su jeti ile yukarıda verilen boyutlarda olacak şekilde hassas kesimleri gerçekleştirilmiştir. Su jeti ile kesilmesinin temel amacı, kesim esnasında oluşan kuvvetin, kompozit plakaların tabakaları arasında herhangi bir ayrılmaya neden olmaması nedeniyle tercih edilmiştir. Bu sayede, tasarım geometrisi nedeniyle oluşan bileşik yüklemeler, kayıp olmadan viskoelastik bant üzerine aktarımı sağlanmıştır. Kesim sonrasında numuneler, birbirlerine kesim yolları aracılığıyla birbirlerine bağlı bulunmaktadır. Numuneler arasındaki bu kesim yolları, su jeti bünyesinde yapılan kesim işlemi tamamlandıktan sonra çapak halinde kalmaktadır. Deneylerin daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi için bu çapaklar Resim 3.4’de verilen bir taş motoru aracılığıyla giderilmesi sağlanmıştır.



Resim 3.4 Kesim sonrası oluşan çapakların giderilmesini sağlayan taş motoru

Çalışma kapsamında kullanılan viskoelastik yapıştırıcı bant ve ön yüzey hazırlama işleminde kullanılan kimyasal bileşen Resim 3.5’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.5 3M™ firması tarafından üretilen; (a) VHB 4950 akrilik çift taraflı viskoelastik yapıştırıcı bant, (b) Ön yüzey hazırlama işlemi için kullanılan Primer 94

Şekil 3.3’de yapıştırma alanı olarak gösterilen bölgelerde, 3M™ firması tarafından üretilen 1,1 mm ± % 10 kalınlıkta VHB 4950 viskoelastik yapıştırıcı bantı, tasarlanan uygun boyutlarda olacak şekilde hazırlanarak kullanılmıştır. Maksimum yapışma performansına ulaşabilmek için yapıştırma yapılmadan önce, işlem yapılacak olan yüzey üzerine 3M™ Primer 94 ile ön yüzey hazırlama işlemi de uygulanmıştır.

### 3.1.3. Yapısal Bileşenlerin Deneyleri

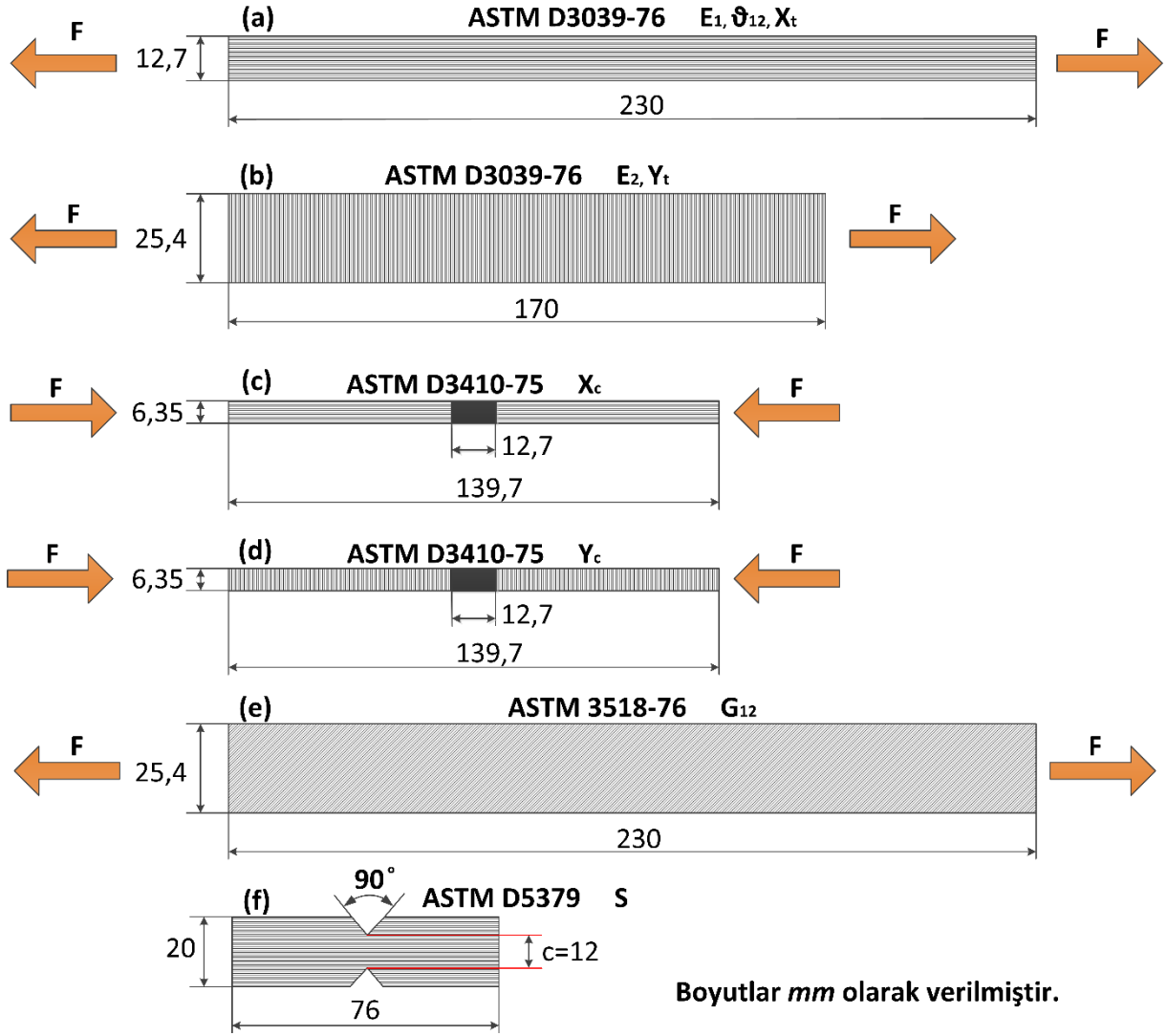
#### 3.1.3.1. Kompozit Malzeme Deneyleri

E-cam fiberler ile tek yönlü olarak takviye edilmiş epoksi matrisli tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili deneyler, ASTM standartları çerçevesinde oda sıcaklığı 23±1°C değer aralığında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerdeki ortamın bağıl nem değeri % 50 ±10 aralığında tutulmuştur [63, 72-74]. Tabakalı kompozit plakanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan her bir deney tipi için beşer adet deney numunesi hazırlanmış olup, ilgili mekanik özelliklerin ortalama değerlerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.4’de tabakalı kompozit plakaların mekanik özelliklerinin ilgili ASTM standartlarına göre gerçekleştirilen deneylerinde kullanılan numunelerinin boyutları ve tespiti yapılacak mekanik özelliklerinin fiber doğrultusunda (x ekseni - 1 yönü) ve fibere dik doğrultudaki (y ekseni - 2 yönü) bir gösterimde olmak üzere detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Şekil 3.4 (a)’da verilen ASTM D3039-76 standardına göre kompozit plakanın; Boyuna elastisite modülü ( $E_1$ ), Ana poisson oranı ( $\nu_{12}$ ), Boyuna çekme mukavemeti ( $X_1$ ) değerlerinin tespiti yapılmıştır [72]. Şekil 3.4 (b)’de verilen ASTM D3039-76 standardına göre kompozit plakanın; Enine elastisite modülü ( $E_2$ ), Enine çekme mukavemeti ( $Y_1$ ) değerlerinin tespiti yapılmıştır [72]. Şekil 3.4 (c)’de verilen ASTM D3410-75 standardına göre kompozit plakanın; Boyuna basma mukavemeti ( $X_c$ ) değerlerinin tespiti yapılmıştır [73]. Şekil 3.4 (d)’de verilen ASTM D3410-75 standardına göre kompozit plakanın; Enine basma mukavemeti ( $Y_c$ ) değerlerinin tespiti yapılmıştır [73].

Şekil 3.4 (e)’de verilen ASTM 3518-76 standardına göre deney gerçekleştirilmiş olup, 45° olan fiber doğrultulu numune üzerinde, şekil üzerinde gösterilen F kuvvetine göre şekil değişimi sebebiyle oluşan elastisite modülü belirlenerek düzlemsel kayma modülü ( $G_{12}$ ) değeri, Denklem (3.1) [75] ile hesaplanması gerçekleştirilmiştir [74].



Şekil 3.4 Tabakalı kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartlarına göre deney numunelerinin boyutlandırılmaları

$$G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_x} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)} \quad (3.1)$$

Şekil 3.4 (f)'de verilen ASTM D5379 standardına göre deney Iosipescu kayma aparatıyla gerçekleştirilmiş olup, ortaya çıkan düzlemsel maksimum kayma kuvveti aracılığıyla kayma mukavemetinin değeri, Denklem (3.2) [75] ile hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.2'de yer alan t parametresi, numune kalınlığını ifade etmektedir [63].

$$S = \frac{F_{\max}}{c.t} \quad (3.2)$$

Tabakalı kompozit plakaların, ilgili ASTM standartlarına göre yapılan mekanik deneyler neticesinde elde edilen ortalama sonuçlar, Çizelge 3.3'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca

elde edilen bu veriler, üç boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme sürecinde de kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Tabakalı kompozit plakaların ilgili ASTM standartlarına göre mekanik özellikleri ve değerleri

| Mekanik Özellikler                  | Değer | Birim |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Boyuna elastisite modülü ( $E_1$ )  | 42,5  | GPa   |
| Enine elastisite modülü ( $E_2$ )   | 11,8  | GPa   |
| Düzlemsel kayma modülü ( $G_{12}$ ) | 3,65  | GPa   |
| Ana poisson oranı ( $\nu_{12}$ )    | 0,23  | -     |
| Boyuna çekme mukavemeti ( $X_t$ )   | 770   | MPa   |
| Enine çekme mukavemeti ( $Y_t$ )    | 110   | MPa   |
| Boyuna basma mukavemeti ( $X_c$ )   | 300   | MPa   |
| Enine basma mukavemeti ( $Y_c$ )    | 78    | MPa   |
| Düzlemsel kayma mukavemeti (S)      | 90    | MPa   |
| Fiber hacim oranı ( $V_f$ )         | % 58  | -     |

Tabakalı kompozit plakaların fiber hacim oranının belirlenmesi, TS 1177 EN ISO 11722 standardında belirtilen kalsinasyon deneyi ile gerçekleştirilmiştir [76]. Deney sürecinde kullanılacak olan krozeler, hem sadece kendileri hem de uygun boyutlarda hazırlanan numunelerle birlikte kütleleri tartılmıştır. Ardından sıcaklığı 650°C'ye ayarlanan kül fırınına konularak yarım saat boyunca yanma yani kalsinasyon işlemine tabii tutulmuştur. İşlem sonrasında kalsine olmuş numuneler tekrar tartılarak, ilk durumdaki kütleleri ile aralarındaki fark tayin edilmiştir. Kompozit numuneye ait kalan yanmamış bileşen olan E-cam fiberin kütle oranı Denklem 3.3 ile hesaplanmıştır.

$$m_f = \left( \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

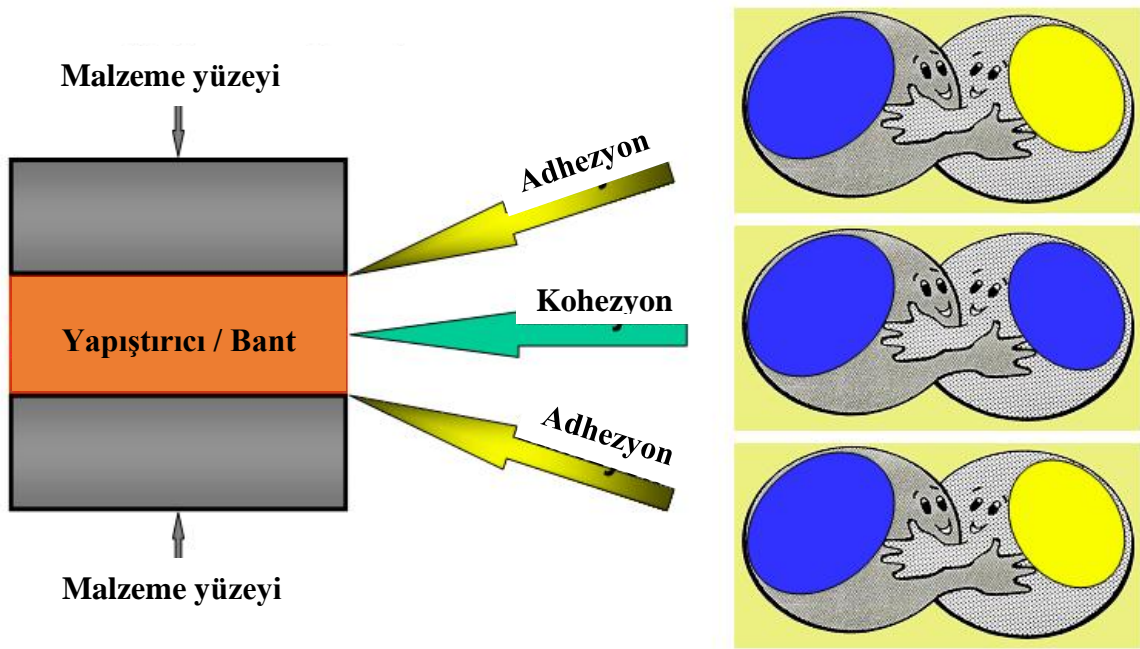
Bu denklemde yer alan;  $m_1$ : kuru boş krozenin ilk kütlesini,  $m_2$ : kuru kroze ve numunenin birlikteki ilk kütlesini,  $m_3$ : kuru kroze ve numunenin son kütlesini ifade etmektedir. Kompozit plakada kullanılan E-cam fiberin yoğunluğu 2,6 g/cm<sup>3</sup> ve epoksi matrisin yoğunluğu 1,2 g/cm<sup>3</sup> olarak üretici firma tarafından verilmiştir. İlgili bu değerler, Denklem 3.4'de yerlerine konularak tabakalı kompozit plakaya ait fiber hacim oranı hesaplanmıştır.

$$m_k = m_f + m_m \Rightarrow \rho_k = \rho_f \frac{v_f}{v_k} + \rho_m \frac{v_m}{v_k} \quad (3.4)$$

Bu denklemde yer alan;  $m_k$ : kompozit plaka numunesinin toplam kütlesini,  $m_f$ : E-cam fiberin kütlesini,  $m_m$ : epoksi matrisin kütlesini ifade etmektedir. Ayrıca bu işlemlerin sonucunda kompozit plakanın yoğunluğu  $2,012 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir.

### 3.1.3.2. Viskoelastik Deneyler

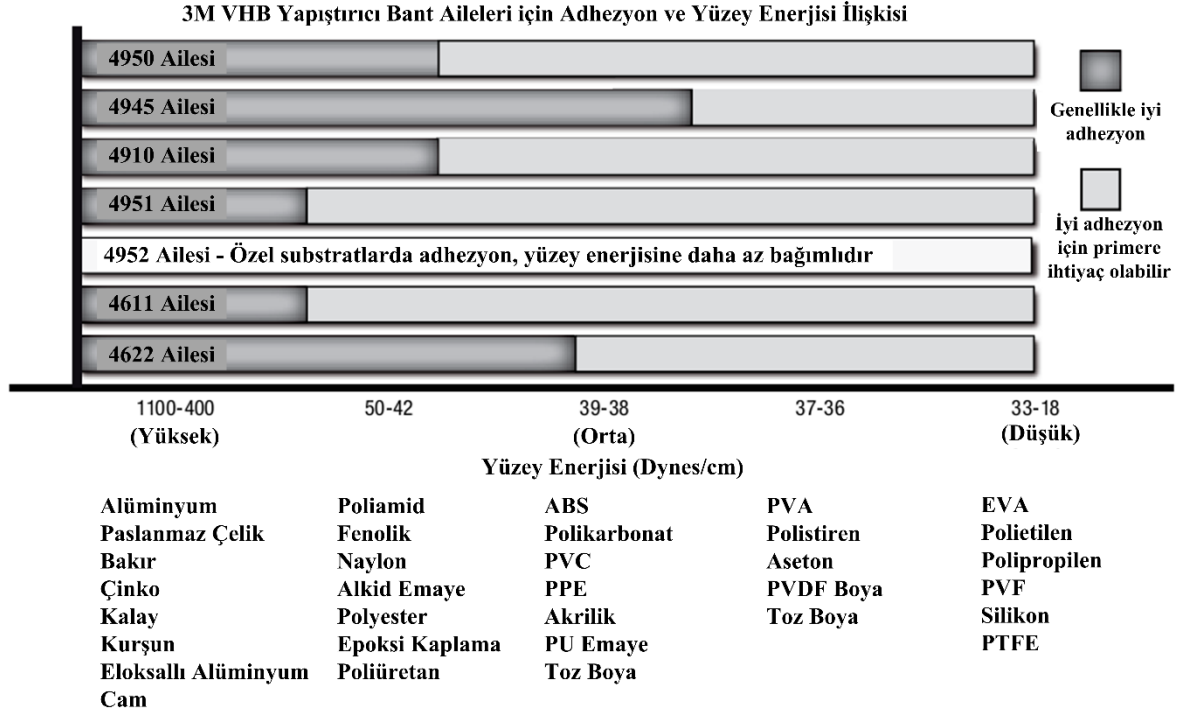
Çalışma kapsamında tasarlanan yapısal birleştirmeler, viskoelastik özelliğe sahip bir yapıştırıcı bant aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu birleştirmeler, farklı yapışma mekanizmaları aracılığıyla oluşmaktadır. Yapıştırıcı bant ile birleştirilen kompozit plaka arasında adhezyon kuvvetleri oluşmaktadır. Literatürde farklı teorilerle açıklanmaya çalışılan adhezyon kuvvetleri, iki farklı molekül arasındaki çekim kuvveti ile oluşmuştur. Ayrıca yapıştırıcı olan viskoelastik bantın kendi içerisinde ise kohezyon kuvvetleri (kimyasal bağ kuvvetleri ve fiziksel van der Waals kuvvetleri) aynı iki molekül arasında meydana gelmektedir. Yapışma esnasında oluşan kuvvetler Şekil 3.5 şematik olarak gösterilmiştir.



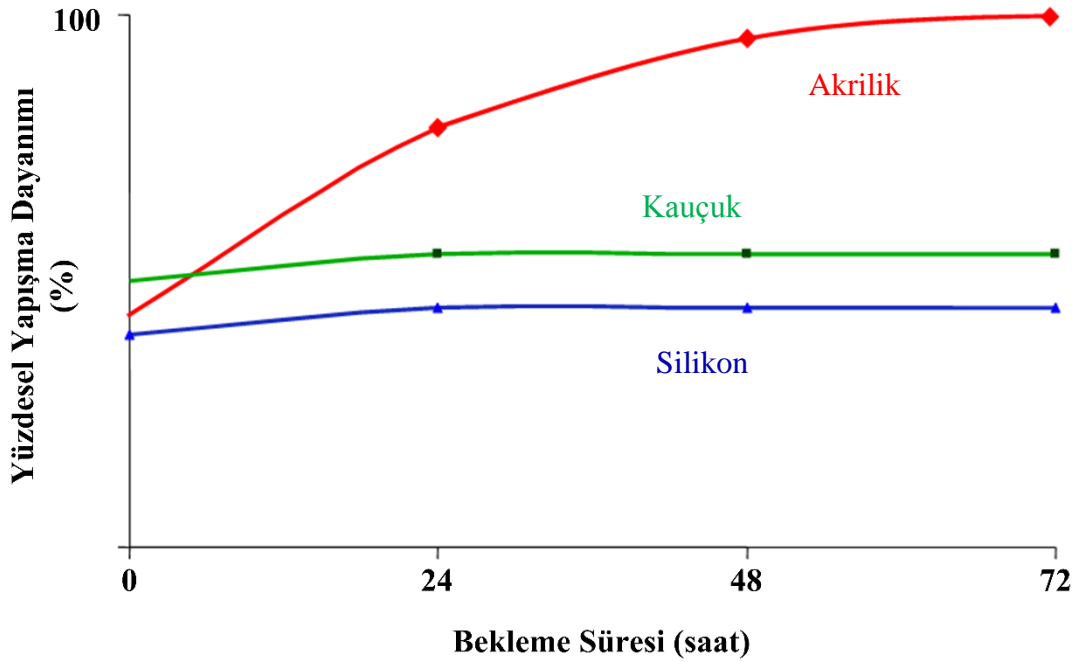
Şekil 3.5 Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında oluşan adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin şematik gösterimi [80]

Kompozit plakaların birleşme esnasında seçilen yapıştırıcı viskoelastik bant ile oluşturdukları adhezyon kuvvetlerini etkileyen en temel parametrenin, kompozit plakanın yüzey enerjisi olduğu, yapıştırıcı bantın üretici firması tarafından belirtilmiştir. Bunun nedeni, viskoelastik yapıştırıcı bantın basınca duyarlı bir karaktere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 3.6'da detaylı bir şekilde üretici firma kataloğundan alınarak gösterilmiştir. Bu nedenle

çalışma kapsamında yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak herhangi bir detaylandırmaya gidilmemiştir. Ayrıca Şekil 3.6'da görüleceği üzere yapıştırıcı bantın en uygun birleşeceği malzeme grubu olarak kompozit plakalar olduğu da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Yapısal birleştirmelerde kullanılan viskoelastik yapıdaki VHB 4950 çift taraflı bantının yüzey enerjisi ve adhezyon kuvveti değişimlerini gösterimi [77]



Şekil 3.7 Akriolik, kauçuk ve silikon esaslı viskoelastik bantların karşılaştırmalı yapışma dayanımları [80]

Akrilik polimer yapıya ve basınca duyarlı viskoelastik bir sahip olan VHB 4950 bantının çalışma kapsamında kullanılmasının bir diğer sebebi ise, diğer bant türlerine göre daha yüksek yapışma dayanımı göstermiş olmasıdır. Üretici firma tarafından verilen ürün kataloglarında da bu durum ifade edilmiş olup, Şekil 3.7’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Bu bölümde, yapısal bileşenlerin deneyleri kapsamında yer alan bir diğer bileşen olan viskoelastik banta ait çeşitli deneysel araştırmalar yapılmıştır. 3M™ firması tarafından üretilen VHB 4950 viskoelastik yapıdaki çift taraflı yapıştırıcı banta ait dinamik yapışma performansı özellikleri üretici firma tarafından verilmiş olup, Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 VHB 4950 bant için üretici firma tarafından verilen dinamik ve statik olarak yapışma performansları değerleri [77]

| Performans Türü                   | Değer | Birim | Deneysel Standardı |
|-----------------------------------|-------|-------|--------------------|
| 90° altında soyulma dayanımı      | 44    | N/cm  | ASTM D3330         |
| Normal çekme dayanımı             | 970   | kPa   | ASTM D897          |
| Dinamik bindirmeli kayma dayanımı | 550   | kPa   | ASTM D1002         |
| Statik kayma dayanımı, 22°C       | 45,5  | kPa   | ASTM D3654         |
| Statik kayma dayanımı, 66°C       | 15,17 | kPa   | ASTM D3654         |

Ayrıca üretici firma tarafından verilen ilgili fiziksel özellikler Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 VHB 4950 bant için üretici firma tarafından verilen fiziksel özellikleri [77]

| Fiziksel Özellikler       | Değer                | Birim                                | Deneysel Standardı |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Dielektrik sabiti-1       | 2,28                 | 1 kHz                                | ASTM D150          |
| Dielektrik sabiti-2       | 1,99                 | 1 MHz                                | ASTM D150          |
| Yitim faktörü-1           | 0,0227               | 1 kHz                                | ASTM D150          |
| Yitim faktörü-2           | 0,0370               | 1 MHz                                | ASTM D150          |
| Dielektrik çöküm dayanımı | 18                   | V/μm                                 | ASTM D140          |
| Isıl iletkenlik (k)       | 0,09                 | W/mK                                 | -                  |
| Hacimsel özdirenç         | $1,5 \times 10^{15}$ | Ω-cm                                 | ASTM D257          |
| Yüzeysel özdirenç         | $>10^{16}$           | Ω/sq                                 | ASTM D257          |
| Isıl genleşme katsayısı   | 180                  | $10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ | -                  |
| Kayma modülü (25°C, 1 Hz) | $6 \times 10^5$      | Pa                                   | -                  |
| Poisson oranı             | 0,49                 | -                                    | -                  |



Bu veriler ilgili ASTM standartlarına göre yapılan deneyler aracılığıyla elde edilmiş olup, sonlu eleman yöntemiyle yapılan modelleme sürecinde de kullanılmıştır.

VHB 4950 yapıştırıcı bantın viskoelastik davranışlarının gerçekçi uygulama koşullarına göre tümüyle belirlenebilmesi için çevrimsel yapılan tüm tek eksenli gerilme koşulu testler, sabit çevre sıcaklığında ve numune olan hazırlanan bantın şekil değiştirmemiş hali içinde 1:10 en-boy oranında olacak şekilde hazırlanarak gerçekleştirilmiştir [18].

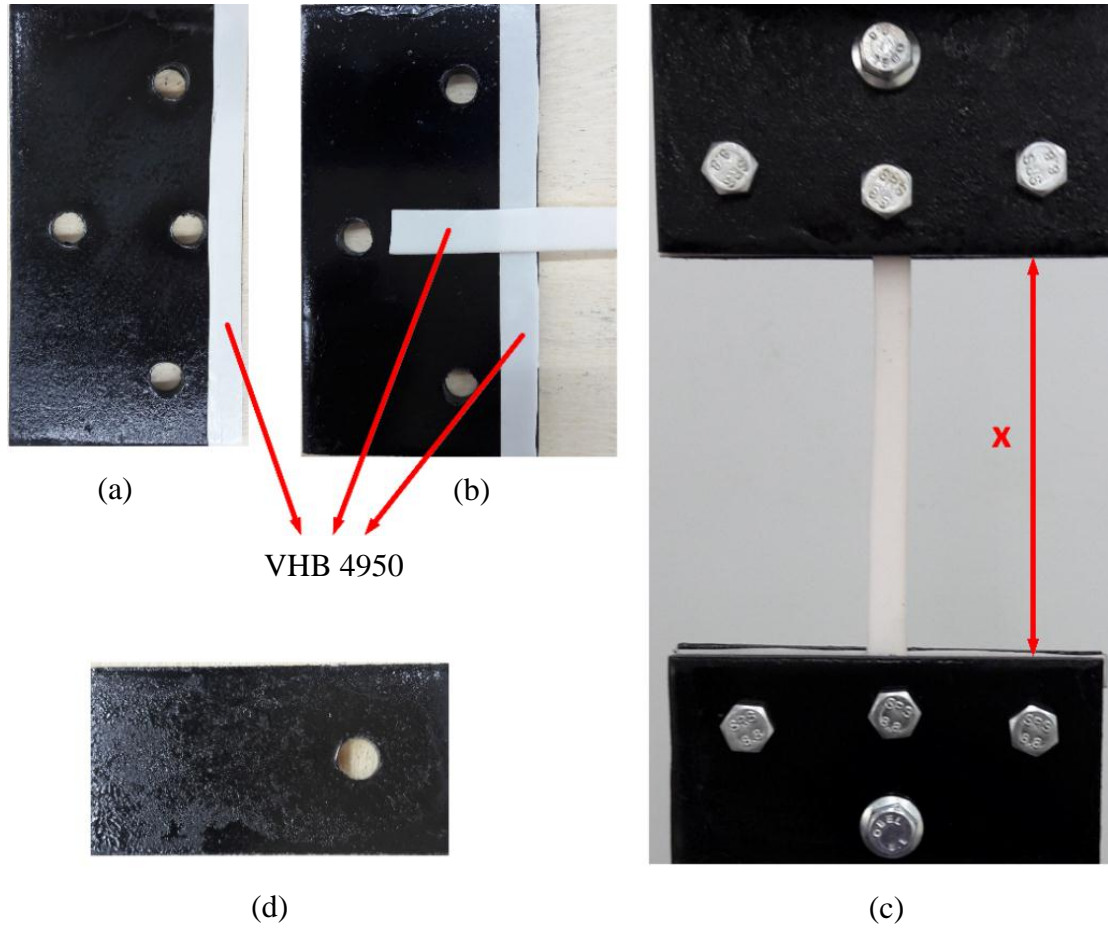
Bu durum için, çevrimsel yükleme - boşaltma testleri için 10 mm x 100 mm en-boy boyutlarında ve  $1,1 \text{ mm} \pm \% 10$  kalınlıkta olmak üzere viskoelastik yapıdaki akrilik polimer bant numune geometrisi kullanılmış olup, Resim 3.6 ile detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Resim 3.6 (a)'da test için üretilen metal plakayı ve test esnasında viskoelastik bantın kaymaması için ilgili alan üzerine ek olarak yapıştırılmış olan VHB 4950 viskoelastik bantın görünümü verilmiştir.

Resim 3.6 (b)'de, test edilecek olan viskoelastik bantın çekme eksenine göre konumlandırılarak yapıştırılmış olduğu durum gösterilmiştir.

Resim 3.6 (c)'de, viskoelastik bantın alt ve üst uçları kısımlarında metal plakalar aracılığıyla tutturularak birleştirilmiş ve teste hazır hale getirildiği durum gösterilmiştir. Şekil üzerinde belirtilmiş olan x mesafesi 100 mm olacak şekilde boyutlandırılması yapılmıştır.

Resim 3.6 (d)'de ise, eksenel olarak cihaz tarafından uygulanacak kuvvetin, bant doğrultusunda aktarımını sağlayan ve plakalar arasında konumlandırılan ara bileşen gösterilmiştir. Viskoelastik testlerin hepsi Zwick (Z010) deney cihazı ile el kontrol ayarlı yer değiştirme şartları altında ve gerçekleşen şekil değişimi miktarları da uzama sensörü ile birlikte ölçümleri yapılmıştır.



Resim 3.6 Çevrimsel yükleme-boşaltma testleri için numune ve düzenek sisteminin genel görünümü

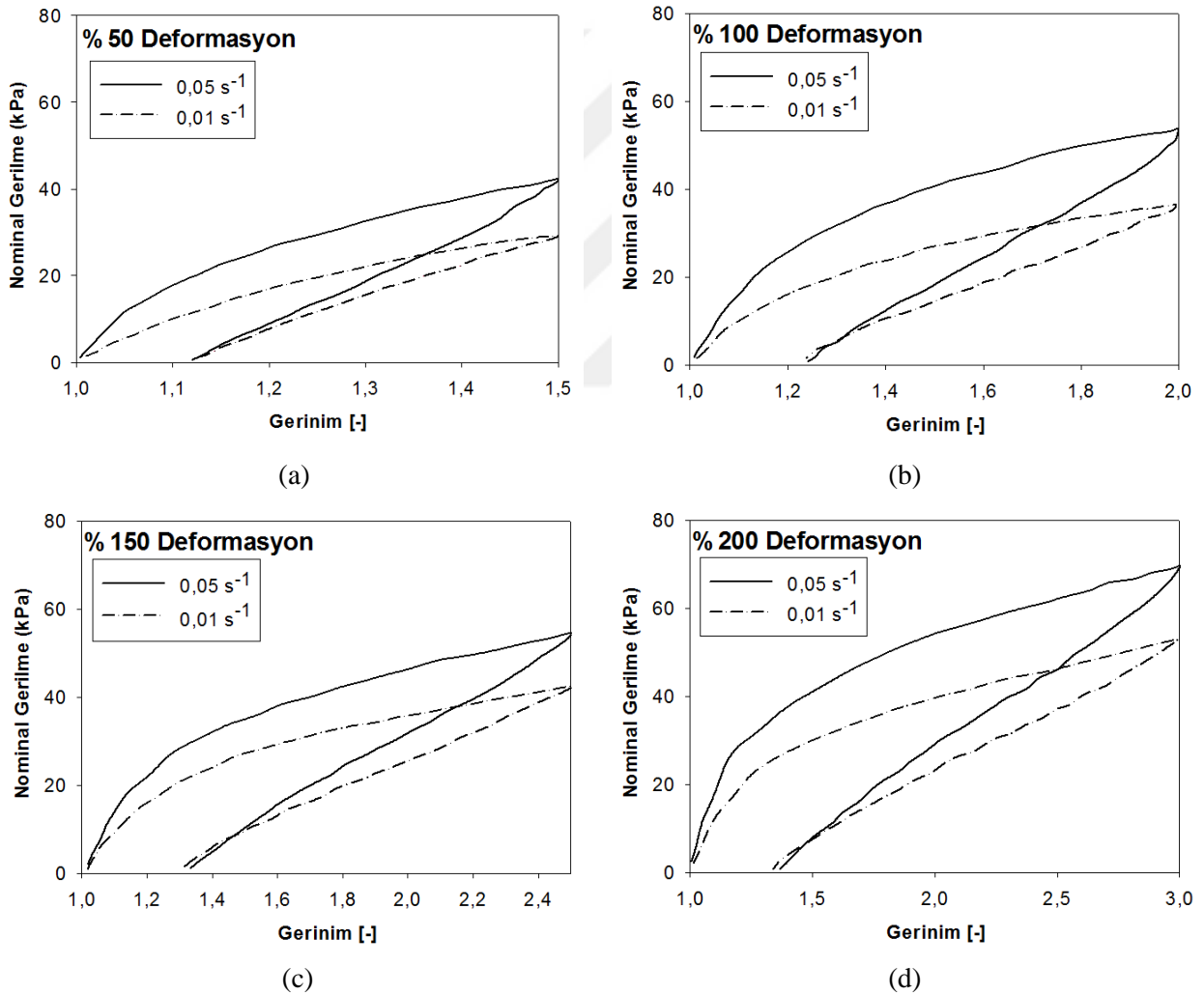
Polimerik viskoelastik malzemenin en önemli mekanik davranışlarından olan hıza duyarlı oransal bağımlılık özelliğinin belirlenebilmesi için, çevrimsel yükleme-boşaltma testleri büyük bir öneme sahiptir [19-27]. Araştırma kapsamında, bu durumdan dolayı çevrimsel yükleme-boşaltma testleri, farklı şekil değiştirme oranı değerleri (2 farklı) ve farklı gerinim seviyeleri (4 farklı) altında olmak üzere, hazırlanan her bir numune için en az beşer defa testler tekrar edilmiştir. Elde edilen verilerin ortalama değerlerine ait grafikleri Şekil 3.8’de detaylı olarak verilmiştir.

Çevrimsel yükleme-boşaltma testleri, Şekil 3.8 (a)’da verilmiş olan % 50 (gerinim seviyesi 1,5), Şekil 3.8 (b)’de verilen % 100 (gerinim seviyesi 2), Şekil 3.8 (c)’de verilen % 150 (gerinim seviyesi 2,5), Şekil 3.8 (d)’de verilen % 200 (gerinim seviyesi 3) değerlerinde olmak üzere dört farklı deformasyon altında uygulanmış olup, nominal gerilme - gerinim ilişkileri gösterilmiştir.

Her bir deformasyon,  $0,01 \text{ s}^{-1}$  ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme oranı değerleri altında olmak üzere iki farklı şekil değişimi oranında yapılmıştır. Şekil değişimi oranlarının belirlenmesinde,

viskoelastik malzeme üzerinde yapılan çeşitli denemeler ile malzemenin dağılma davranışını belirlemedeki en doğru sonuçların  $0,01 \text{ s}^{-1}$  ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değişimi değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, bu şekil değişimi oranı değerlerinde testlerin uygulanması gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda elde edilen veriler ise, nümerik çalışmalar bölümünde de belirtildiği üzere sonlu elemanlar yöntemi ile model oluşturulmasında kullanılan analitik malzeme modellemelerinin, hiperelastik ve viskoz davranışlarına ait malzeme parametrelerinin belirlenmesi aşamasında kullanılmıştır. Ayrıca bu parametrelerin belirlenmesi aşamasında, çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan kalibrasyon testleri ile daha gerçekçi model parametrelerinin elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.8 Farklı şekil değişim oranları ( $0,05 \text{ s}^{-1}$  ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ) ve farklı (a) % 50 deformasyon, (b) % 100 deformasyon, (c) % 150 deformasyon, (d) % 200 deformasyon koşulları altındaki çevrimsel yükleme - boşaltma testlerine ait nominal gerilme - gerinim seviyesi

### 3.1.4. Yapısal Deneyler

Araştırmanın bu bölümüne kadar olan kısmında yapısal bileşenlerin mekanik davranışları incelenmiştir. Bu bölümde ise, araştırmanın temel hedefi olan, yapısal bileşimin oluşum süreci (ön gerilme deney düzeneği tasarımı - üretimi ve yapısal birleştirmelerin gerçekleştirilmesi, ön gerilme uygulanmasının temel amacı vb.) ve yapının üzerindeki bileşik yüklemelerin oluşum mekanizmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

#### 3.1.4.1. Ön Gerilme Deney Düzeneğinin Tasarımı ve Üretimi

Yapısal bileşenlerin tasarımında kullanılan geometrik oranların değişimi ile sistematik bir şekilde farklı değerlerde bileşik yüklemeler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, elektronik basınç kontrollü hale getirilen hidrolik pres makinesinin genel görünümü Resim 3.7’de verilmiştir.



Resim 3.7 Yapısal birleştirmeler üzerinde ön gerilme uygulanmasını sağlayan hidrolik pres makinesi

Çalışma kapsamında bu bileşik yüklemelere ilaveten, farklı ön gerilme değerleri altındayken maksimum yapışma değerine ulaşma süresi olan 72 saat boyunca uygulanarak birleştirilmesi sağlanmıştır. Viskoelastik yapıda bulunan VHB 4950 bant üzerinde, istenilen değerlerde zamana karşı sabit bir şekilde belirlenen değerlerde ön gerilme uygulanabilmesi için, basınç kontrollü bir hidrolik pres makinesinden faydalanılmıştır. Manuel bir kontrole sahip olan hidrolik pres makinesi, Hidro Metal® Hidrolik Makine Otomasyon San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından tasarlanarak özel olarak üretilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan bu hidrolik pres makinesi, yapısal bileşenler üzerinde belirli bir süre içerisinde sabit bir basınç uygulaması gerçekleştirmektedir. Manuel olarak kullanım esnasında sabit bir basınç sağlanmış olmasına rağmen, bunun belirli bir süre içerisinde azalmadan veya artmadan sabit olarak kalmasını sağlayabilmek için sistem üzerinde çeşitli donanımsal geliştirmelere gidilmesi gerekmiştir.

Bu aşamada, temin edilen hidrolik pres makinesinin kullanıcı - bilgisayar etkileşimli olacak şekilde basınç kontrolü hale getirilmesi sağlanmıştır. Haberleşme için RS485 protokolü kullanılmıştır. Hidrolik pres makinesinin bilgisayar kontrollü hale getirilmesinde kullanılan donanımlar temelde mekanik devre elemanları ve çeşitli elektronik bileşenlerden oluşmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan bu donanımların özellikleri ve kullanım amaçları aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Elektronik tüm donanımlar, bir pano aracılığıyla birbirleriyle olan bağlantıları gerçekleştirilmiştir.

Basınç Vericisi (Transmitter): Hidrolik pres makinesindeki temel amaç, belirli bir basınç seviyesi sağlayarak istenilen süre içerisinde sabit kalmasını sağlamaktır. Bu nedenle sistem üzerindeki hidrolik basıncın tespit edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında, 0-250 bar aralığında bir basınç vericisi aracılığıyla basınç, elektrik enerjisine dönüştürülerek gerekli değerlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Resim 3.8'de hidrolik devre üzerinde bağlantısı gerçekleştirilen basınç vericisi gösterilmiştir.

Hidrolik sistemlerde en önemli değişken, yağın basıncıdır. Yağ basıncının ölçülmesini sağlayan sensörlere genel olarak basınç sensörleri denilmektedir. Hidrolik pres makinesi üzerinde kullanılan bu basınç sensörü ile ölçülen basıncın büyüklüğünü ve anlık değişimlerini bir elektriksel değere dönüştürerek dijital göstergeye (indikatöre) iletmektedir. Çalışmada kullanılan basınç vericisi, Gentek Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir.

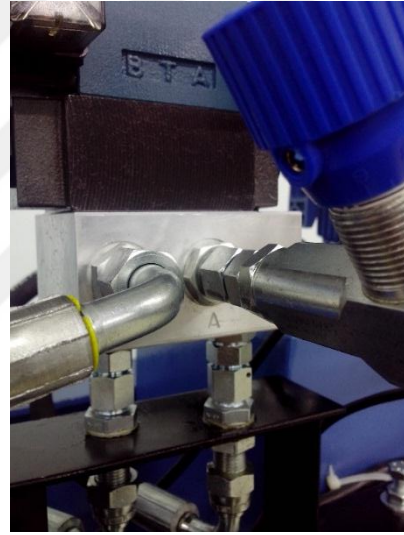


Resim 3.8 Hidrolik sistem üzerinde bağlanan basınç vericisi

Basınç vericisinin, hidrolik devre sistemi üzerinde bağlantısının yapılmasında ise ara mekanik bileşenlere ihtiyaç duyulmaktadır.



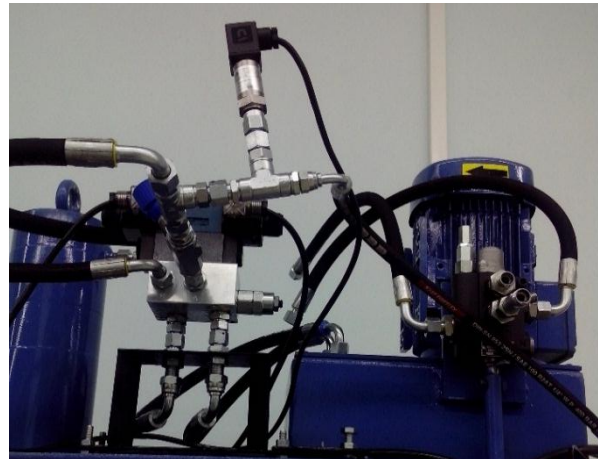
(a) Çekli hız ayar valfi



(b) Emniyetli Plaka NG6 Kilit valf NG6



(c) Çift bobinli NG6 yön kontrol valfi



(d) Hidrolik devre sisteminin montaj yapılmış hali

Resim 3.9 Hidrolik sistem üzerinde bağlanan mekanik ve elektronik devre elemanları

Sistem üzerinde kullanılan bu bileşenler ise şunlardır; emniyetli plaka NG6, kilit valf NG6, çift bobinli NG6 yön kontrol valfi, çekli hız ayar valfidir. Ayrıca sistem üzerinde gereken çeşitli hortumlama ve rakor bağlantıları da gerçekleştirilmiştir. Resim 3.9’da kullanılan bu bileşenler ve bağlantıları gösterilmiştir.

**Dijital Gösterge (İndikatör):** Çalışmada kullanılan indikatör, dijital kontrollü bir proses kontrol cihazı olarak kullanılmıştır. Yük hücrelerinden gelen düşük analog sinyalleri, analog-dijital çevirici (ADC) ile dijitalle çevirmektedir. Bu çevrim sürecinin ardından mikro kontrol üzerinde verilerin işlenmesi gerçekleştirildikten sonra kendi üzerindeki verileri anlık olarak kendi ekranına gönderen elektronik bir cihazdır. Bu verilerin bilgisayar üzerindeki yazılıma da gönderim haberleşmesi, bu cihaz üzerinden gerçekleştirilmektedir. Dijital indikatörün, sistem üzerindeki belirlenen basınç değerlerine göre kalibrasyon işlemleri de ayrıca gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel tip uygulamalarda yaygın kullanımı olan indikatörler, kuvvet ölçümü için dönüştürücü görevini yapmakta olup, Resim 3.10’da gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan dijital gösterge, Gentek Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti.’den temin edilmiştir.



Resim 3.10 Sistemdeki basınç vericisinde elde edilen değeri gösteren dijital indikatör

**Usb-RS485 Adaptörü:** Uzun mesafeler üzerinde veri gönderimini sağlayan bir iletişim elemanıdır. RS485 protokolü ile dijital göstergeden elde edilen anlık verileri ileterek, bilgisayar ile haberleşmesi sağlanmış olup, Resim 3.11’de çalışmada kullanılan Usb-RS485 adaptörü gösterilmiştir.

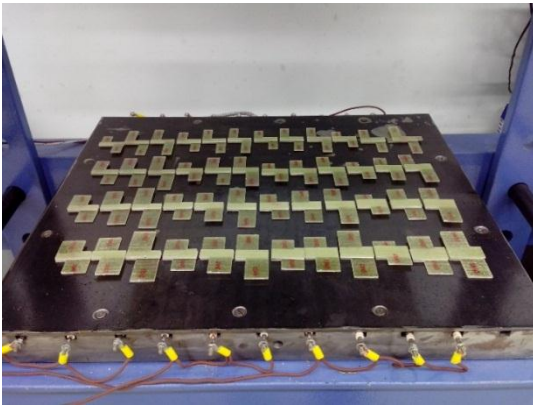


Resim 3.11 Hidrolik sisteme ait kontrol verilerinin iletişimini sağlayan Usb-RS485 adaptörü

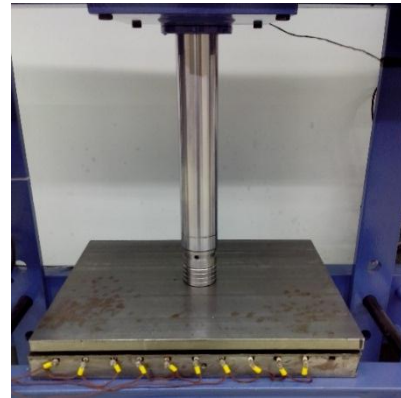
Usb-Rs485 adaptörü aracılığıyla bilgisayarla olan haberleşme sağlandıktan sonra ilgili kontrol verilerinin düzenli bir şekilde kullanıcıya sunulması gerekmektedir. Kullanıcı ile hidrolik pres makinesi arasındaki veri iletişimi Gentek Logger yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş olup, çalışma kapsamında istenilen ön gerilme değerleri elde edilmiştir.

#### 3.1.4.2. Ön Gerilmeli Yapısal Birleştirmelerin Gerçekleştirilmesi

Çalışmanın bir önceki bölümünde, tasarımı verilen yapıya ait bileşenlerin mekanik davranışları deneysel olarak belirlenmişti. Bu bölümde ise, çalışmanın temel amaçlarından olan ön gerilmenin yapısal birleştirmeler üzerindeki uygulanması süreci açıklanmıştır. Tabakalı kompozit plakalardan kesilerek hazırlanan numunelerin, VHB 4950 viskoelastik yapıştırıcı bant ile belirlenmiş olan yapışma alanı üzerindeki birleştirilmesi yapılmıştır. Resim 3.12’de, bilgisayar kontrollü bir hidrolik pres makinesi ile üzerlerine farklı değerlerde olmak üzere, maksimum yapışmaya ulaşması için geçerli süre olan 72 saat boyunca ön gerilmeler aralıksız uygulanarak birleştirilmesi gösterilmiştir [77]. Yapılar üzerinde uygulanan ön gerilme değerleri ve numune üzerlerindeki isimlendirilmeleri ise şu şekilde yapılmıştır: 10 N/mm<sup>2</sup> (Grup 1: G1), 20 N/mm<sup>2</sup> (Grup 2: G2), 40 N/mm<sup>2</sup> (Grup 3: G3) ve 80 N/mm<sup>2</sup> (Grup 4: G4). Her bir ön gerilme grubu yukarıda parantez içlerinde verildiği gibi, Bölüm 3.1.2’de detaylı bir şekilde açıklanan numune isimlendirmelerinin ön tarafına gelerek tüm numunelerin isimlendirilmesi yeniden yapılmıştır. Örneğin, Çizelge 3.1’de verilmiş olan 16a1 numunesi üzerine 10 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altında birleştirilmiş ise numunenin yeni ismi G1-16a1 olarak, 20 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altında birleştirilmiş ise numunenin yeni ismi G2-16a1 olarak güncellenmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.12 Bilgisayar kontrollü hidrolik preste, (a) Ön gerilme uygulanacak birleştirilmiş yapısal numunelerin genel görünüşü, (b) Yapısal numuneler üzerinde ön gerilmenin uygulanması



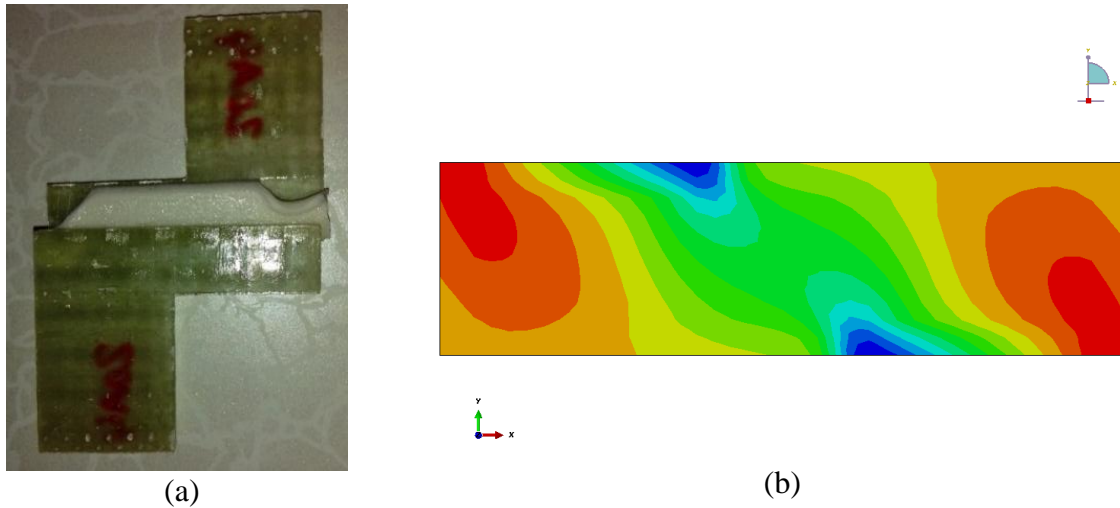
### 3.1.4.3. Yapı Üzerinde Eksantrik Yüklemelerin Oluşumu

Belirlenmiş olan farklı ön gerilme değerleri altında birleştirilmiş yapısal numunelere sabit 1 mm/min hızında çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri esnasında, birleştirilmiş yapıların sistematik tasarımlarından dolayı ortaya çıkan eğilme ve burulma momentlerinin de viskoelastik yapışma yüzeyi üzerine etki etmesi sağlanmıştır. Böylece çekme testi ile yapıştırma elemanı olan VHB 4950 bantının farklı ön gerilmeler ve bileşik yüklemeler altındaki maksimum zorlanması sonucunda oluşan Kuvvet (N) – Yer değiştirme (mm) davranışları araştırılmıştır.

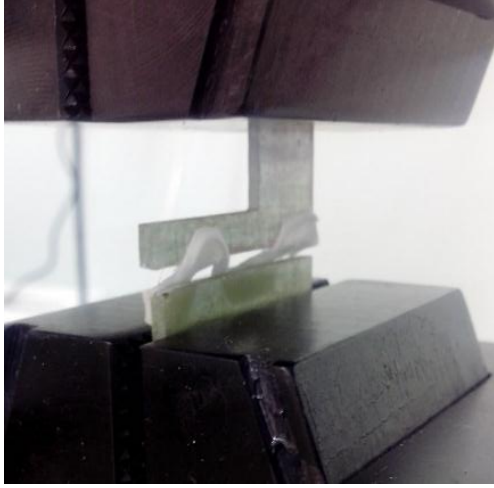
Resim 3.13’de, çekme testi altındaki bir deney numunesinin, (a) test sonucundaki ve (b) sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analizi sonucundaki durumları örnek olarak gösterilmiştir.

Resim 3.13’de görüldüğü üzere çekme testi sonucunda, yapışma alanında kullanılan viskoelastik bant, uygulanan bileşik yükler neticesinde oluşan ilk hasar olarak uç kısımlarından ayrılmaya uğramış ve son hasar olarak da bütün yüzeyden ayrıldığı şeklinde tespit edilmiştir. Aynı şekilde, sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik analizinde de bu durumun doğrulandığı gözlemlenmiştir.

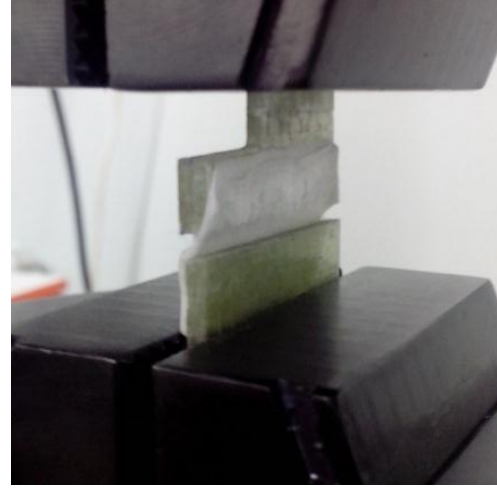
Resim 3.14’de ise, farklı numunelere ait çekme testi esnasında oluşan bileşik yüklemelere tepki olarak ortaya çıkan viskoelastik şekil değişimleri gösterilmiştir.



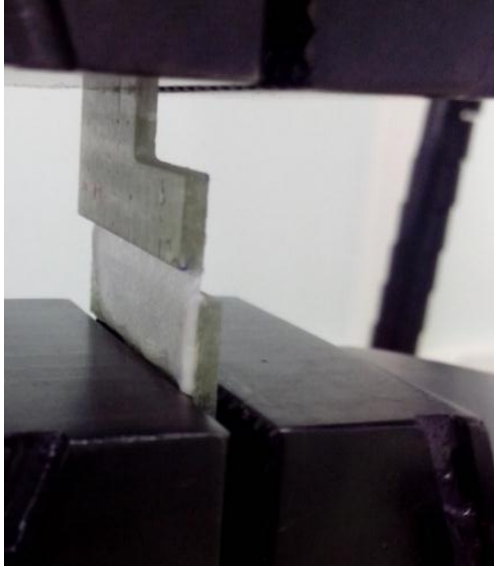
Resim 3.13 Çekme testi altındaki deney numunesinin, (a) Test sonucundaki durumu ve (b) Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucu (G1-20a4 numunesi).



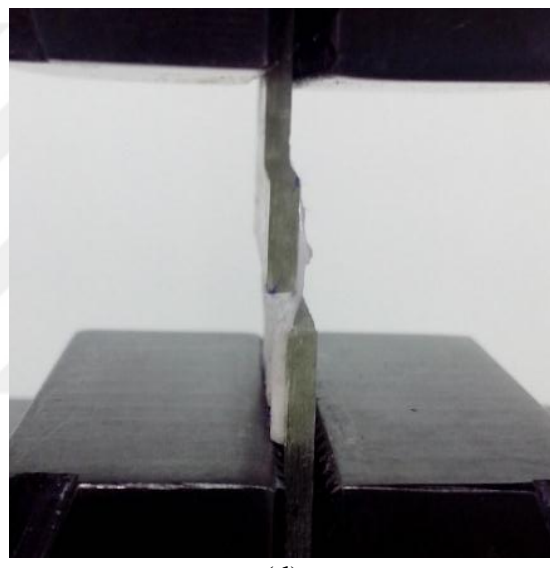
(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 3.14 Farklı yapısal bileşimlere ait çekme testi esnasında oluşan eksantrik yüklemelere tepki olarak bant üzerinde ortaya çıkan viskoelastik şekil değişimleri

## 3.2. Analitik Çalışmalar

### 3.2.1. Malzeme Model Parametrelerinin ve Kalibrasyon Hata Değerlerinin Elde Edilmesi

Üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için bir önceki bölümde detaylı bir şekilde açıklanan çevrimsel yükleme - boşaltma testlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Deney verileri, Mcalibration® yazılımı içerisinde bulunan çeşitli malzeme modelleri ile sonlu elemanlar modelinde kullanılacak olan optimum malzeme parametrelerinin

belirlenmesinde kullanılmıştır. Mcalibration® yazılımında deney verileri ile en uygun yakınsamaya sahip malzeme modelinin hangisi olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

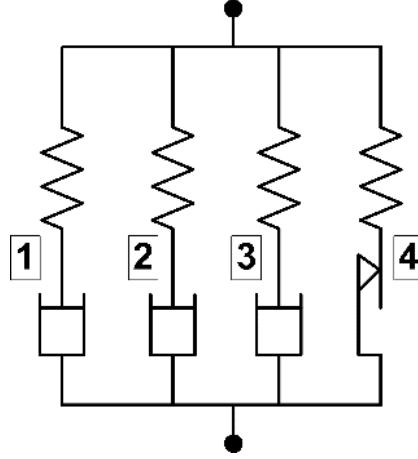
Çizelge 3.6'da verilen malzeme modellerinin tümüyle ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 2'de verilmiştir. Araştırma sürecinde, en uygun malzeme modelleme parametrelerinin % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değişimi oranı şartları altında elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma boyunca gerçekleştirilen ve Mcalibration® yazılımından elde edilen, farklı deformasyon - şekil değiştirme hızları altındaki malzeme modellerine ait gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılmaları, Ekler bölümü altındaki Ek-1'de detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 3.6'da, Abaqus™ yazılımında kullanılan % 10 hata değeri altındaki farklı malzeme modellerine ait model kalibrasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.6 VHB 4950 bantı için farklı malzeme modellerinden elde edilen % 10 hata değeri altındaki kalibrasyon sonuçları (% 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değişimi)

| Malzeme Modeli   | Model Kalibrasyon Hata Değeri (%) |
|--|-----------------------------------|
| Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin                     | 8,9844                            |
| Hiperelastik -Mullins-Ogden                            | 8,4436                            |
| Hiperelastik -Mullins-Yeoh                             | 7,0855                            |
| PRF Model: 3 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı        | 4,4530                            |
| PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Sinüs Hiperbolik Akışı       | 4,3408                            |
| PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Güç Kanunu Akışı             | 3,0458                            |
| PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Şekil Değişimli Güç K. Akışı | 2,7462                            |
| PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı        | 2,4284                            |

Şekil 3.4'de detaylı olarak gösterilen ve modelin oransal zaman bağımlı mekanik davranışına ait tepkisel karakteristik özelliğinin modellenmesindeki en doğru sonuçları (Çizelge 3.6'da verilen malzeme modellerinin tümü içinde geçerli olmak üzere) % 50 deformasyon (gerinim seviyesi 1,5) ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değişim oranı koşulları altında elde edilen nominal gerilme değerlerinin verdiği tespit edilmiştir.

Nümerik olarak malzeme modellemesinde kullanılan Paralel Reolojik Ağ Modeli Sistemi'nin (Parallel Rheological Framework - PRF) modelinin şematik bir gösterimi ise Şekil 3.9'da verilmiştir.



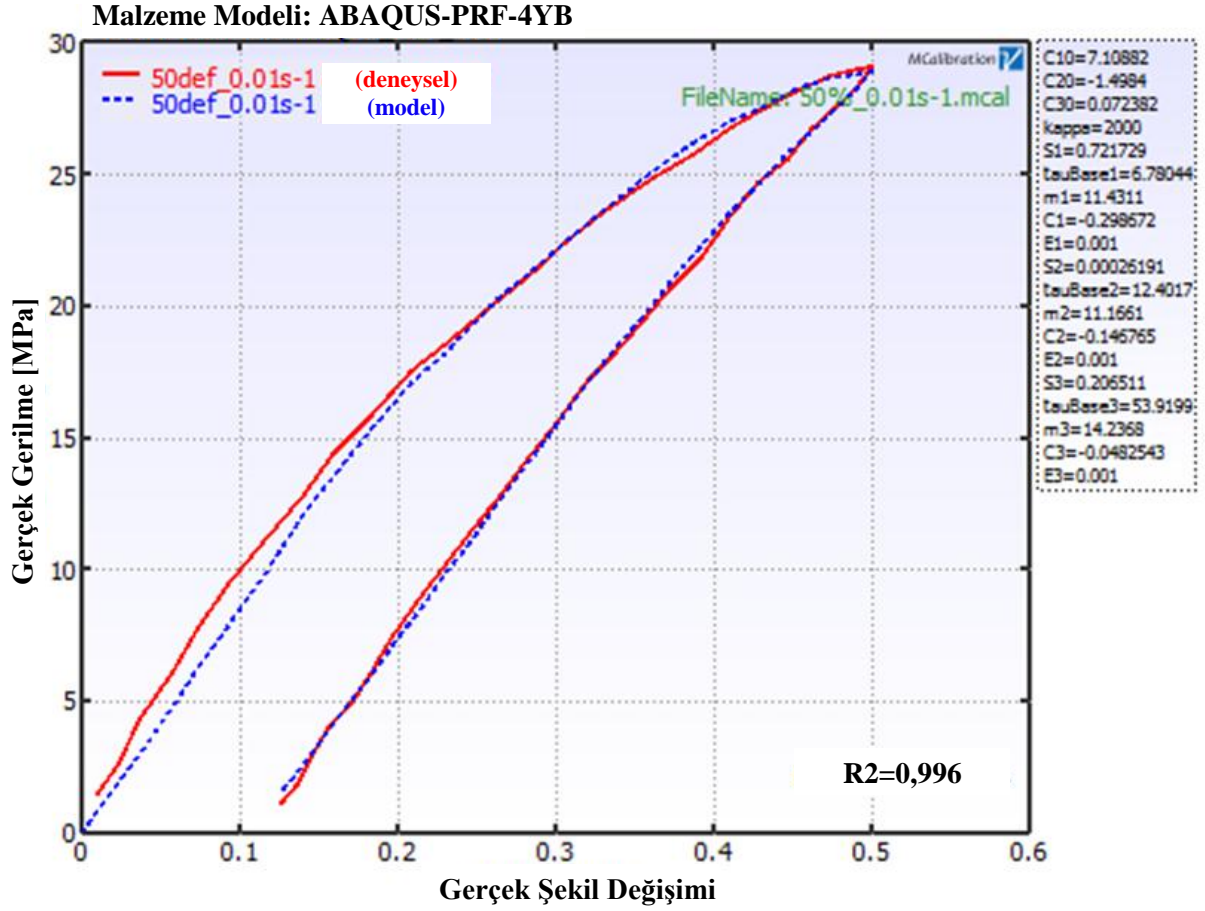
Şekil 3.9 Paralel Reolojik Ağ Modeli Sistemi'nin şematik gösterimi

Çizge 3.6'da görüldüğü üzere en düşük model kalibrasyon hatasının, 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ modelinde oluştuğu belirlenmiştir. Çizelge 3.7'de ise, farklı deformasyon ve gerinim seviyeleri altında kullanılan bu modele ait kalibrasyon hata değerlerini gösteren veriler detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.7 Farklı deformasyon ve farklı gerinim seviyelerinde bulunan VHB 4950 için model kalibrasyon hata değerleri

| Deformasyon (%) | Gerinim Seviyesi ( $\lambda$ ) | Şekil Değişim Oranı ( $s^{-1}$ ) | Model Kalibrasyon Hata Değeri (%) |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 50              | 1,5                            | 0,01                             | 2,4284                            |
|                 |                                | 0,05                             | 3,7999                            |
| 100             | 2                              | 0,01                             | 15,0709                           |
|                 |                                | 0,05                             | 10,4222                           |
| 150             | 2,5                            | 0,01                             | 24,1359                           |
|                 |                                | 0,05                             | 21,0404                           |
| 200             | 3                              | 0,01                             | 32,6812                           |
|                 |                                | 0,05                             | 32,4769                           |

Araştırmamız kapsamında, Mcalibration® yazılımı ile en az model kalibrasyon hatasına sahip model olan 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ Modeli ile elde edilen optimum çevrimsel yükleme - boşaltma testine ait verilerin yakınsaması, Resim 3.15'de gösterilmiştir.



Resim 3.15 Deneysel ve tahmin edilen model parametreleri için Mcalibration® yazılımında karşılaştırma sonuçları

Mcalibration® yazılımı içerisinde yer alan Paralel Reolojik Ağ (PRF) ile oluşturulan Abaqus modelleri, sonlu eleman analizlerinde kullanılacak olan malzeme modellemesinde daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır [3, 78]. PRF modeller; doğrusal olmayan viskoelastik davranışın modellenmesi, sonlu hiperelastik şekil değişimi ve viskoelastik ağların paralel olarak ilişkilendirip, ardından süperpoze edilmesi esasına dayanmaktadır [79].

Mcalibration® yazılımı içerisinde yer alan, 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ Modeli, yüksek seviyede doğrusal olmayan elastomerik malzemelere ait parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan bir modeldir. Çalışma kapsamında incelenen VHB 4950 için elde edilen deney verileri ile en uyumlu sonucu da bu model göstermiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen optimum malzeme parametreleri Çizelge 3.8’de detaylı olarak verilmiştir.

### 3.2.2. Optimum Malzeme Modelinin Belirlenmesi ve Teorik Açıklaması

PRF model içerisinde yer alan Yeoh modeli (ağ bileşeni - 4) hiperelastik bir malzeme modelidir. Yeoh modeli, farklı yükleme modlarında kullanışlı bir model olup [39], Cauchy gerilmesinin hesaplanması Denklem 3.5 ile aşağıda verilmiştir.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} \{C_{10} + 2C_{20}(I_1^* - 3) + 3C_{30}(I_1^* - 3)^2\} \text{dev}[\mathbf{b}^*] + \kappa(J - 1)\mathbf{I} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'deki ağ bileşeni - 4 için verilen bu hiperelastik tepki eşitliğinde yer alan parametreler:  $C_{10}$ : Birinci Yeoh parametresi,  $C_{20}$ : İkinci Yeoh parametresi,  $C_{30}$ : Üçüncü Yeoh parametresi,  $\kappa$  (kappa): Yeoh modelinin hacim (bulk) modülü,  $\boldsymbol{\sigma}$ : Cauchy gerilmesi,  $J = \det(\mathbf{F})$  ve  $\mathbf{b}^* = J^{-\frac{2}{3}} \mathbf{F} \mathbf{F}^T$ : soldan çarpıtmalı Cauchy-Green tensörünü (left distortional Cauchy-Green tensör) ifade etmektedir.

PRF içerisinde yer alan bir diğer model olan Bergstrom – Boyce (BB) modeli (ağ bileşeni - 1, 2, 3), moleküler düzeydeki yapının birbirlerine paralel olarak bağlı iki ağ bileşeninden oluşmaktadır. İlk ağ bileşeni denge davranışını ve diğer ağ bileşeni ise denge durumundan türetilen zaman-bağımlı durumunu göstermektedir. BB modeli bu kapsamda, uygulanan gerilme ve deformasyon durumunun bir fonksiyonu olarak viskoelastik akışın değişim oranını ifade etmektedir [29]. BB modeli analitik olarak, Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$\dot{\gamma}^p = [\lambda_L - 1 + \xi]^C \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_{base}} \right)^m \quad (3.6)$$

Bu denklemde;  $\dot{\gamma}^p$ : akış oranı,  $\lambda_L$ : moleküler zincir gerinimi,  $\xi$ : şekil değişimi düzeltme faktörü,  $C$ : şekil değişiminin üstel gücü,  $\tau$ : uygulanan kayma gerilmesi,  $\tau_{base}$ : gerilmedeki akış direnci,  $m$ : akış kaymasının üstel değerini ifade etmekte olup, Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Çevrimsel yükleme - boşaltma testleri ile elde edilen 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom - Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ Model parametreleri (% 50 deformasyon – 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değişimi oranı koşulları altında)

| Ağ Bileşeni - 4 |          | Ağ Bileşeni - 1       |           | Ağ Bileşeni - 2       |            | Ağ Bileşeni - 3       |            |
|-----------------|----------|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|
| Hiperelastik    |          | S <sub>1</sub>        | 0,721729  | S <sub>2</sub>        | 0,00026191 | S <sub>3</sub>        | 0,206511   |
| C <sub>10</sub> | 7,10882  | $\tau_{base1}$        | 6,78044   | $\tau_{base2}$        | 12,4017    | $\tau_{base3}$        | 53,9199    |
| C <sub>20</sub> | -1,4984  | <b>m</b> <sub>1</sub> | 11,4311   | <b>m</b> <sub>2</sub> | 11,1661    | <b>m</b> <sub>3</sub> | 14,2368    |
| C <sub>30</sub> | 0,072382 | <b>C</b> <sub>1</sub> | -0,298672 | <b>C</b> <sub>2</sub> | -0,146765  | <b>C</b> <sub>3</sub> | -0,0482543 |
| $\kappa$        | 2000     | <b>E</b> <sub>1</sub> | 0,001     | <b>E</b> <sub>2</sub> | 0,001      | <b>E</b> <sub>3</sub> | 0,001      |

Çizelge 3.8’de yer alan  $n$  parametresi, ağ bileşenlerine ait alt indis değerlerini göstermektedir ( $n=1, n=2, n=3$ ).  $S_n$ : her bir ağın birbirlerine göre şekil değiştirmeye karşı göstermiş oldukları ölçek faktörü,  $E_n$ : şekil değişimi ofset faktörü olarak tanımlanmaktadır.

Ayrıca, çalışma boyunca gerçekleştirilen ve Mcalibration® yazılımından elde edilen, farklı deformasyon - şekil değiştirme hızları altındaki tüm malzeme modellerine ait gerilme-şekil değiştirme davranışlarının ifade eden parametrelerin karşılaştırılmaları, Ekler bölümü altındaki Ek-2’de detaylı olarak verilmiştir.

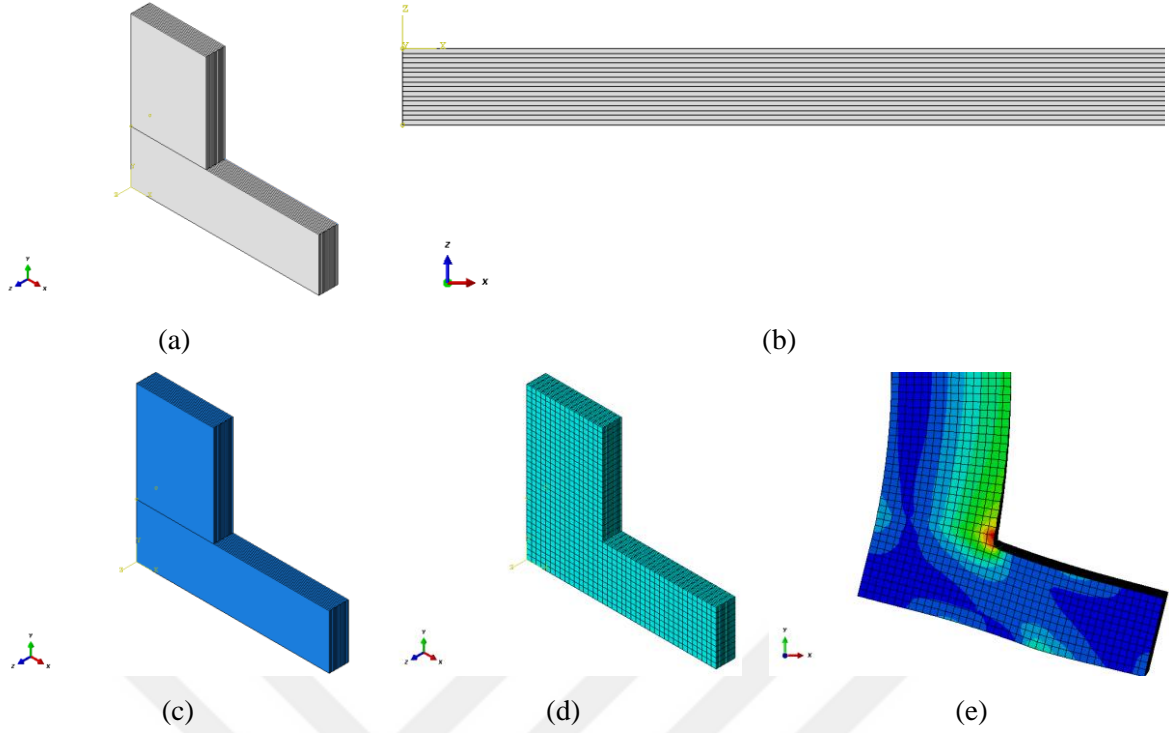
### **3.3. Nümerik Çalışmalar**

Araştırmanın önceki bölümlerinde incelemesi yapılan yapısal tasarımın, hem bileşenlerinin hem de yapının bütünü için mekanik davranışlarına ait deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Bu bölümde ise, önceki bölümlerde elde edilen ilgili verilerin sonlu elemanlar yöntemi içerisindeki kullanımları açıklanmıştır.

#### **3.3.1. Yapısal Bileşenlerin Modellenmesi**

Viskoelastik bant üzerinde eksantrik yüklemeleri sağlayan tabakalı kompozit plakalar ise, Çizelge 3.3’de verilen parametrelere göre modellenmesi yapılmıştır. Yapıya ait nümerik malzeme modelinin mesh işlemi için literatürde en sık kullanılan [12-20], C3D8R (an 8-node linear brick, reduced integration) element türü kullanılmıştır.

Resim 3.16’da tabakalı kompozit plakalardan elde edilen ve eksantrik yükleme oluşturan yapısal alt bileşenlerin, ticari bir yazılım olan Abaqus®/Explicit yazılımında oluşturma süreci gösterilmiştir. Resim 3.16 (a)’da yapısal alt bileşenin geometrik modellenmesi yapılmıştır. Resim 3.16 (b)’de tabakalı kompozit yapısı oluşturulmuştur. Resim 3.16 (c)’de sınır koşullarını içeren çözüm adımı kurulmuştur. Resim 3.16 (d)’de çözüm ağı hazırlanmıştır. Resim 3.16 (e)’de alt bileşen üzerinde analiz sonucu oluşan gerilme-şekil değişimi gösterilmiştir.

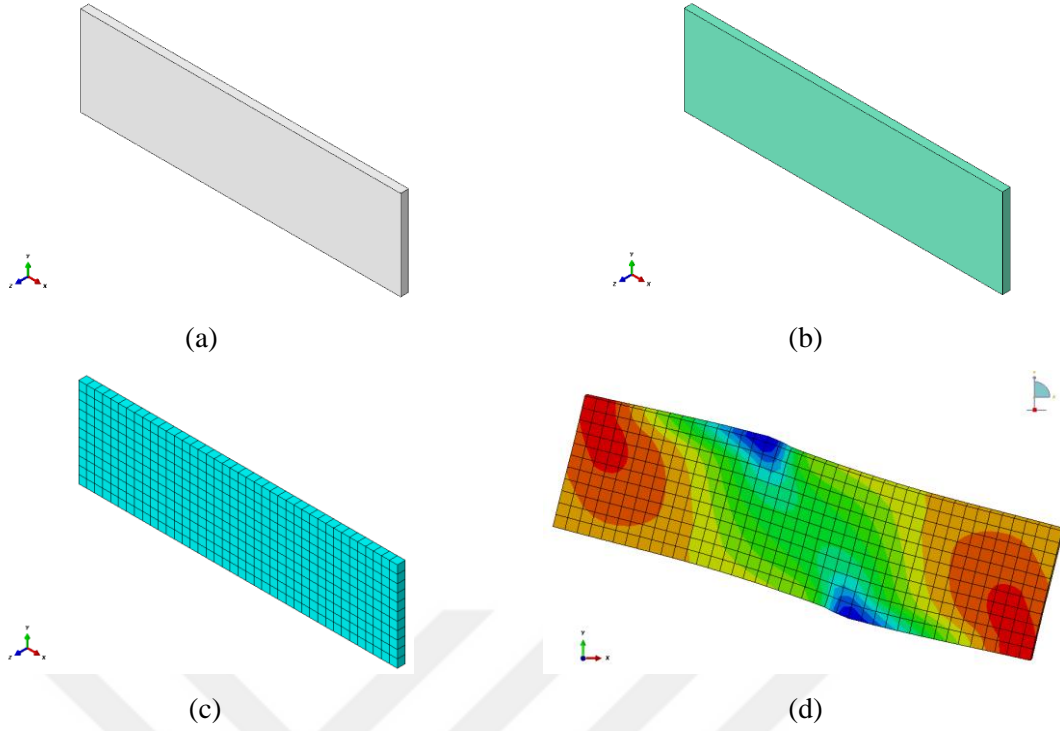


Resim 3.16 Abaqus®/Explicit ile yüklemeyi oluşturan yapısal alt bileşenlerin oluşum aşamaları: (a) Geometrik modelleme, (b) Tabakaların oluşturulması, (c) Çözüm adımını oluşturulması, (d) Çözüm ağının hazırlanması, (e) Gerilme-şekil değişimi analizi sonucu

Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.8’de detaylı bir şekilde verilen ve viskoelastik davranışa sahip olan VHB 4950 çift taraflı yapıştırıcı bantın model parametreleri, yine Abaqus®/Explicit ile sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır. Resim 3.17’de ön gerilme ve bileşik yükleme altında oluşturulan VHB 4950 bantının, ticari bir yazılım olan Abaqus®/Explicit yazılımında oluşturma süreci gösterilmiştir. Ayrıca modelleme sürecinde, Mcalibration® yazılımında oluşturulan parametreler, sonlu elemanlar analizi ortamına aktarımı Abaqus veri girdisi dosyaları aracılığı ile sağlanmıştır.

Resim 3.17 (a)’da VHB 4950 bantının geometrik modellemesi yapılmıştır. Resim 3.17 (b)’de ilgili malzeme parametrelerinin ve sınır koşullarını içeren (ön gerilme vb.) çözüm adımı oluşturulmuştur. Belirlenen malzeme modeli kapsamında, gerekli model parametrelerini içeren veri girişi dosyası aracılığıyla malzemeye ait mekanik davranışların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Resim 3.17 (c)’de çözüm ağının hazırlanması, Resim 3.17 (d)’de viskoelastik bant üzerinde oluşan gerilme-şekil değişimi analizi sonucu gösterilmiştir.





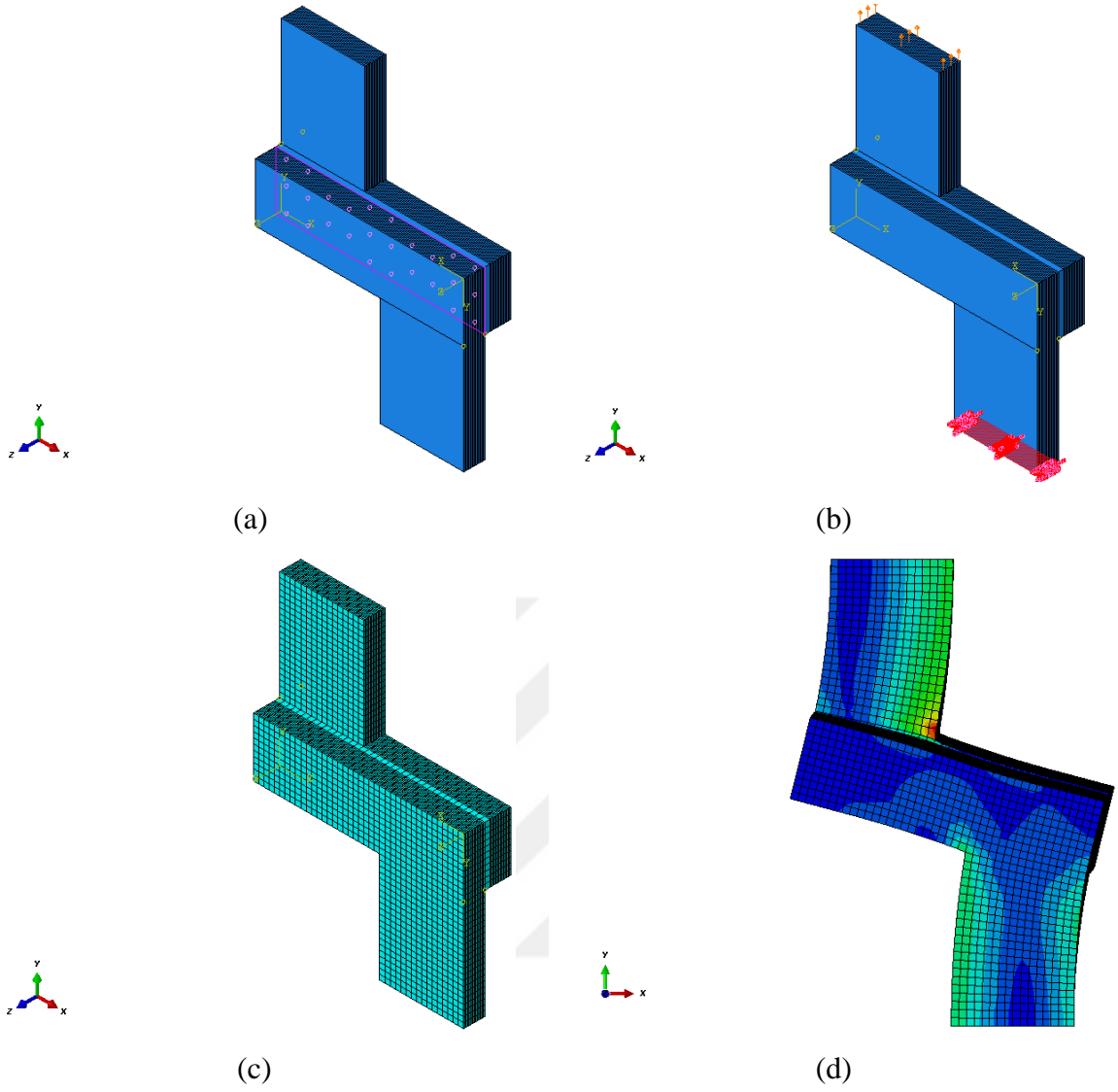
Resim 3.17 Abaqus®/Explicit ile VHB 4950 bantının oluşum aşamaları: (a) VHB 4950 bantının geometrik modellemesi, (b) İlgili malzeme parametrelerinin ve sınır koşullarını çözümlerini oluşturulması, (c) Çözüm ağının hazırlanması, (d) Viskoelastik bant üzerinde oluşan gerilme Şekil değişimi analizi sonucu

### 3.3.2. Yapının Bütünsel Olarak Modellenmesi

Bu bölümde, çalışma kapsamında tasarlanan yapının bütünsel olarak modellenmesi gerçekteştirilmiştir. Resim 3.18’de tabakalı kompozit plakalardan elde edilen ve eksantrik yükleme oluşturan yapısal alt bileşenlerin ve VHB 4950 bantının, ticari bir yazılım olan Abaqus®/Explicit yazılımında oluşturma süreci gösterilmiştir.

Resim 3.18 (a)’da alt bileşenler ve VHB 4950 bantı arasındaki temas ilişkileri tanımlanmıştır. Temas ilişkilerinin tanımlanmasında, yapısal tasarımın çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik davranışlarına etki eden ön gerilme etkisi de sürece dâhil edilmiştir. Resim 3.18 (b)’de ilgili yapının yükleme ve sınır koşulları oluşturularak, aşamalı bir Şekilde çözümlerini kurulmuştur. Resim 3.18 (c)’de yapının bütünü üzerinde çözümlerini ağı oluşturulmuştur. Resim 3.18 (d)’de yapının bütününde oluşan gerilme-Şekil değişimi analizi sonucu gösterilmiştir.

Yapının bütünsel olarak analizinden elde edilen Kuvvet (N) - Yer değişirme (mm) verileri detaylı bir Şekilde, çalışmanın bir sonraki bölümünde ele alınmıştır.



Resim 3.18 Abaqus®/Explicit ile yapısal tasarımın bütün olarak modellenmesi:(a) Yapısal alt bileşenler ve VHB 4950 bantı arasındaki temas ilişkilerinin oluşumu, (b) Yükleme ve sınır koşullarının oluşumu, (c) Çözüm ağının yapılması, (d) Yapı üzerinde oluşan gerilme-şekil değişimi analizi sonucu

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 4.1. Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve Maksimum Yük Taşıyan Numunelerin Tespiti

Bu çalışmada, akrilik polimer malzemeden üretilen VHB 4950 viskoelastik yapıştırıcı bantının, eksantrik veya bileşik yüklemeler altındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmaların sonucunda elde edilen veriler içerisinde, maksimum yük taşıyan yapısal numunelerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, aynı c boyutuna sahip yapısal tasarıma göre sınıflandırılmış olup, yapılan değerlendirmeler detaylı bir şekilde sunulmuştur.

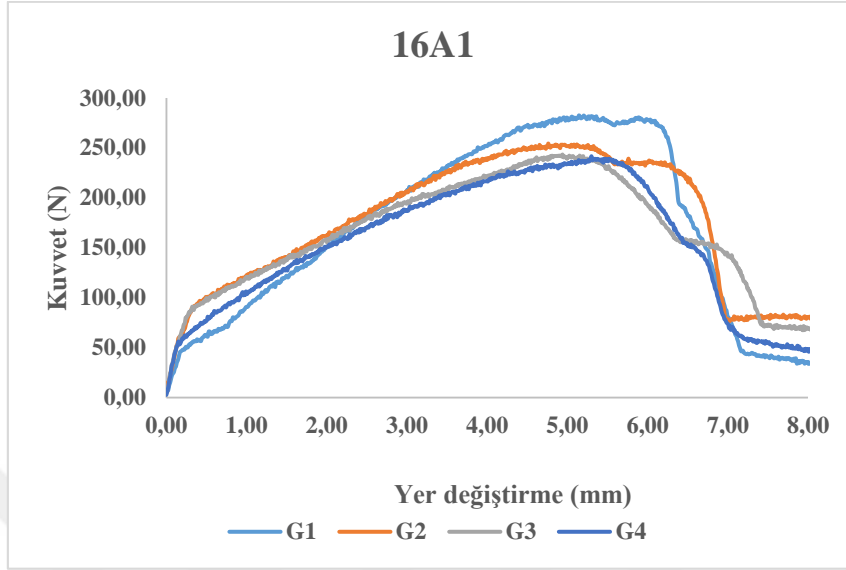
#### 4.1.1. 16a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi

Bir önceki bölümde verilen Çizelge 3.1 esas alınarak oluşturulmuş olan ve Çizelge 3.2’de detaylı olarak elde edilmiş boyutsal parametrelere dayanılarak, farklı ön gerilmeler altında üretilen yapısal numunelerden 16a serisine ait çekme testlerine ait Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) sonuçları Şekil 4.1 ile Şekil 4.12 arasında detaylı olarak verilmiştir.

Bu seri içerisinde toplamda 12 adet yapısal numune bulunmaktadır. Her bir numune kendi içinde aynı geometrik parametrede olarak, farklı ön gerilmelerin oluşturduğu etkiler araştırılmıştır.

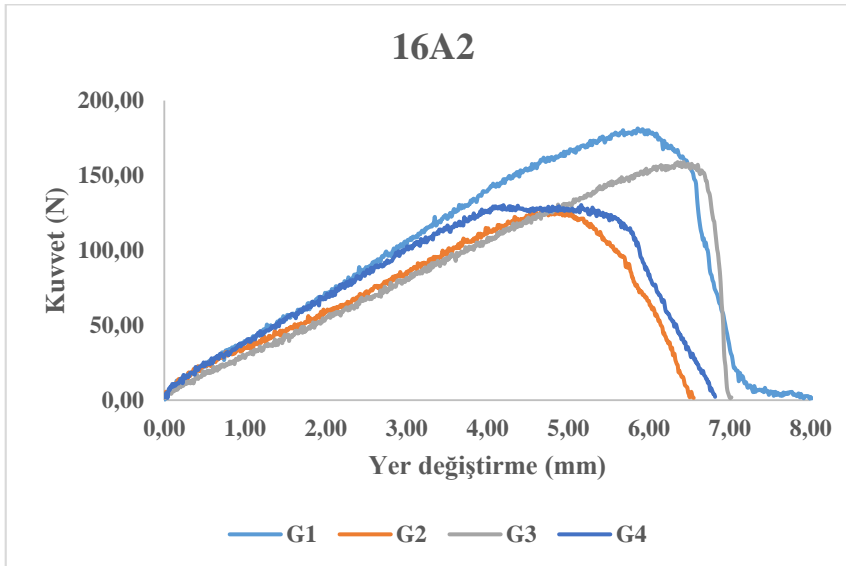
Bu numuneler üzerinde uygulanan  $10 \text{ N/mm}^2$  (Grup 1: G1),  $20 \text{ N/mm}^2$  (Grup 2: G2),  $40 \text{ N/mm}^2$  (Grup 3: G3) ve  $80 \text{ N/mm}^2$  (Grup 4: G4) olmak üzere toplamda 4 farklı değerde ön gerilmeler uygulanmıştır. Bu serideki numuneler içerisinde, maksimum yük taşıyan yapısal numunelerin uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1’de, üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A1 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **275 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



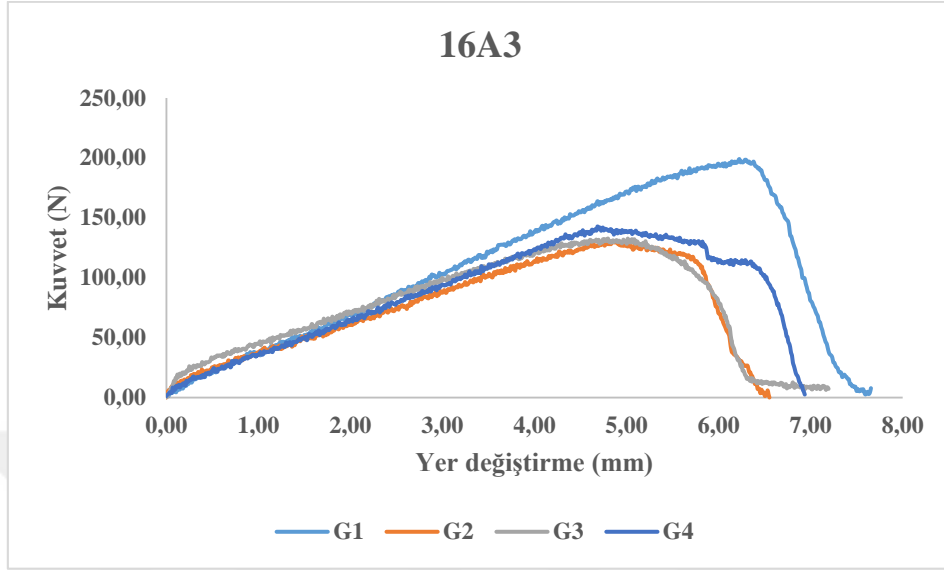
Şekil 4.1 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.2’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A2 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **175 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



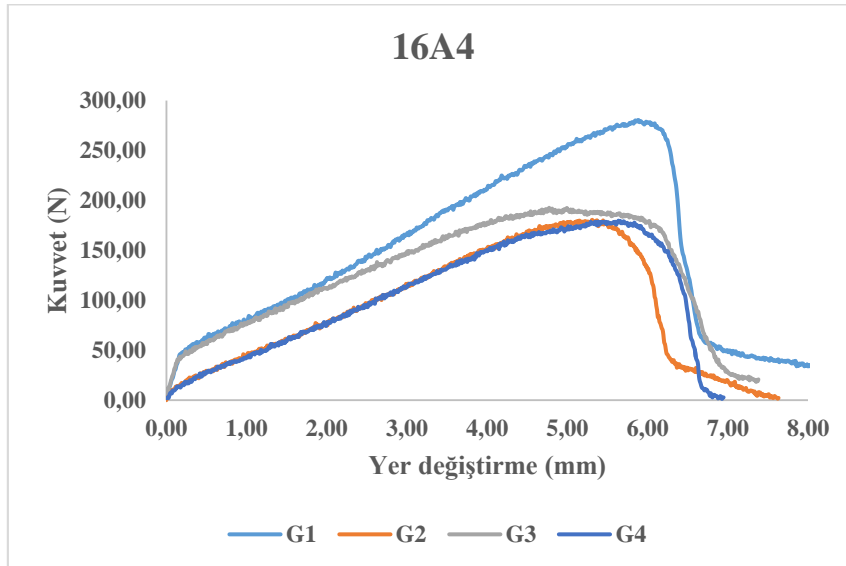
Şekil 4.2 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.3’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A3 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **195 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



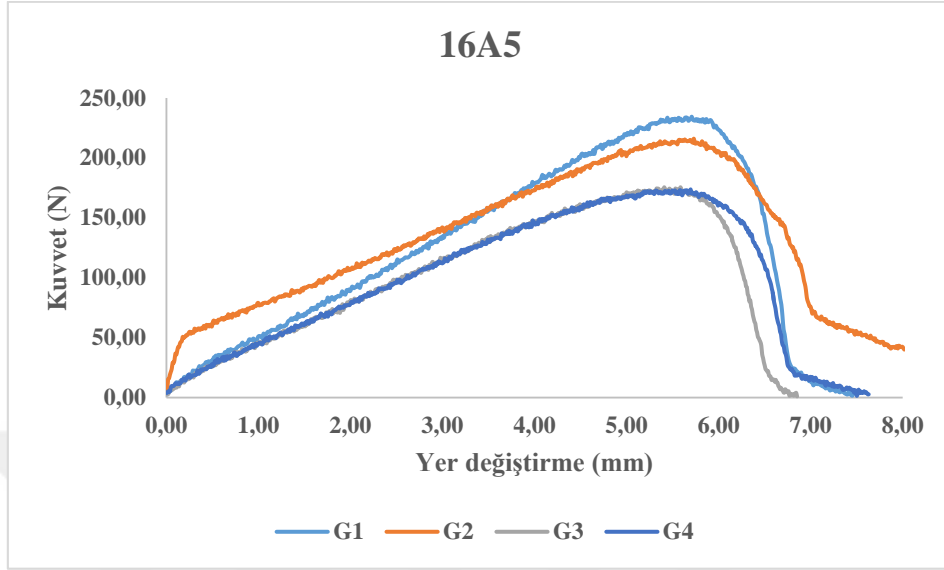
Şekil 4.3 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.4’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A4 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **275 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



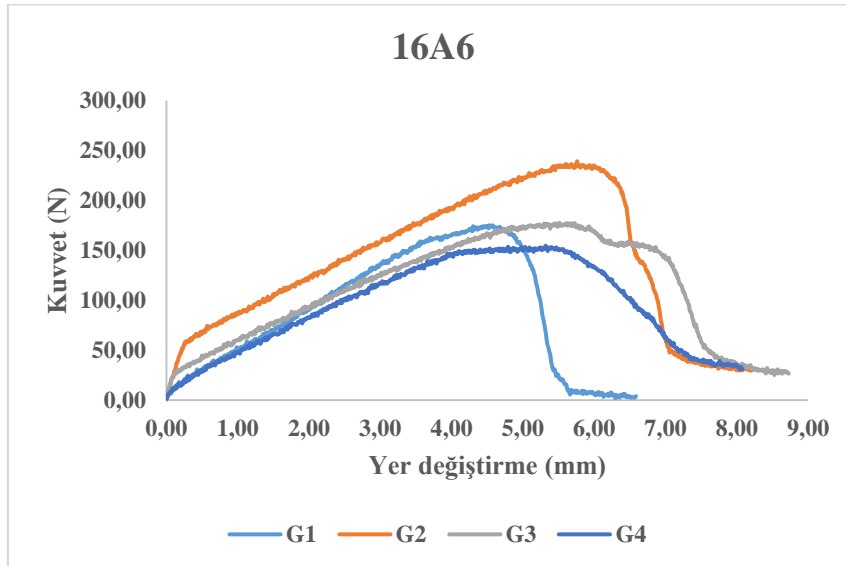
Şekil 4.4 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.5’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A5 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **230 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



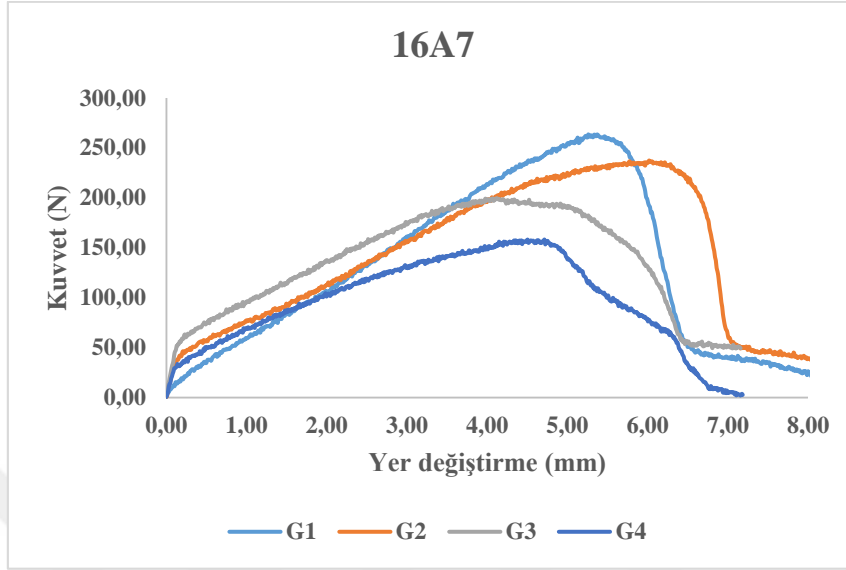
Şekil 4.5 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.6’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A6 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **230 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



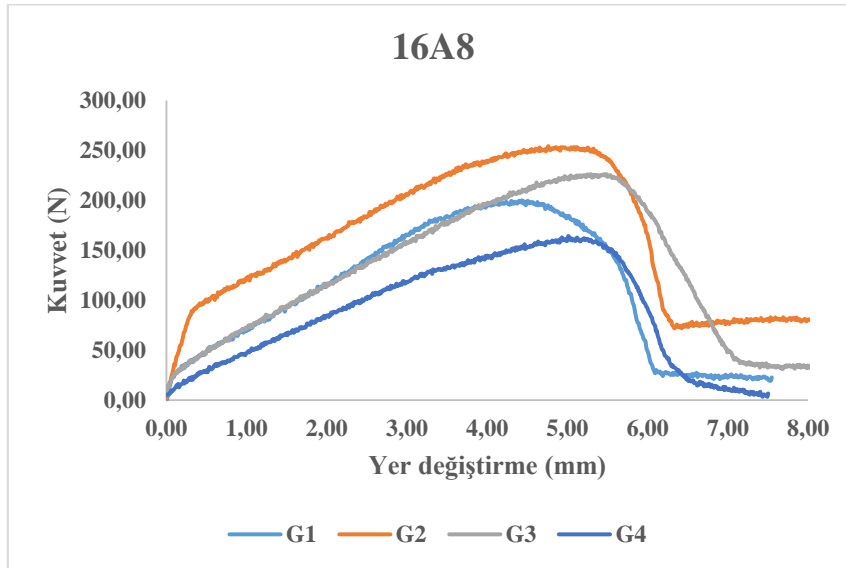
Şekil 4.6 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.7’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A7 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **260 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



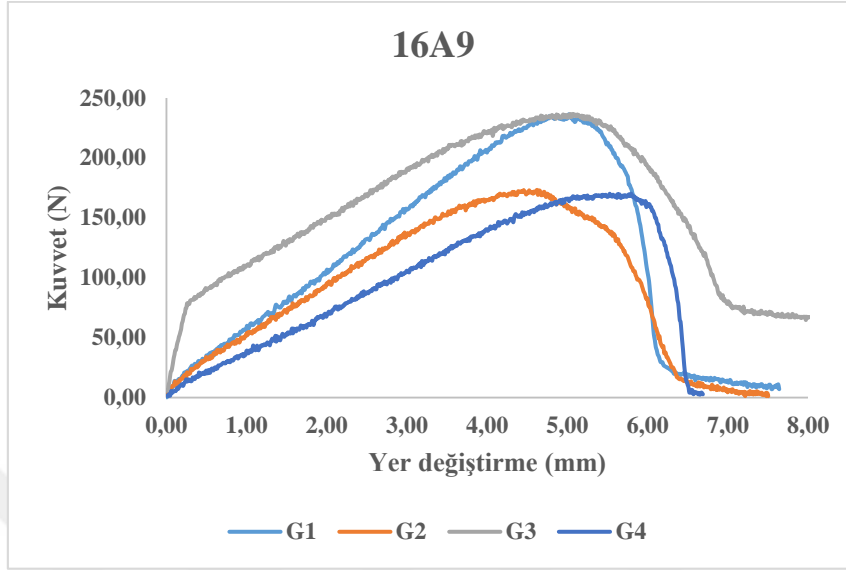
Şekil 4.7 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.8’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A8 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **250 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



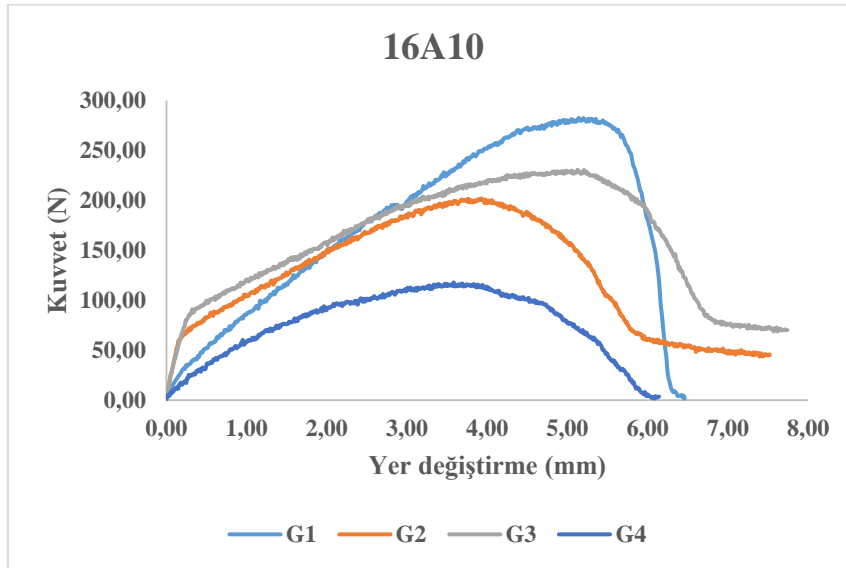
Şekil 4.8 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.9’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A9 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G3** n gerilmesi altında yaklaşık **230 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.9 Farklı n gerilmelerin uygulandığı 16A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

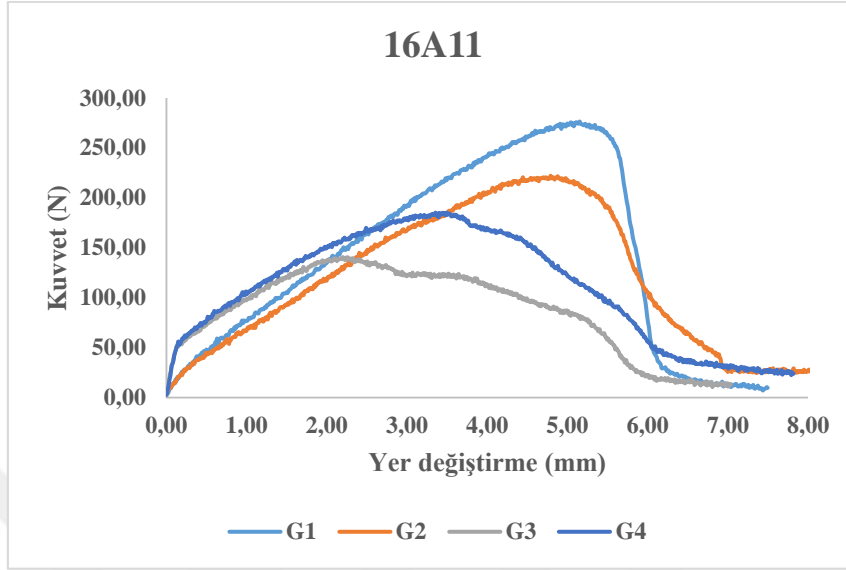
Şekil 4.10’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A10 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** n gerilmesi altında yaklaşık **280 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10 Farklı n gerilmelerin uygulandığı 16A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

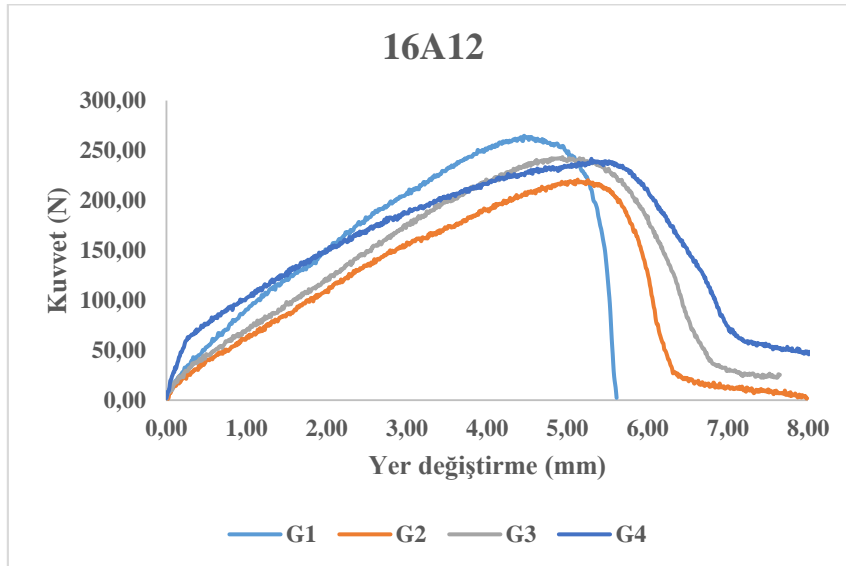


Şekil 4.11’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A11 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **270 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.11 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.12’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 16A12 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **260 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 16A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

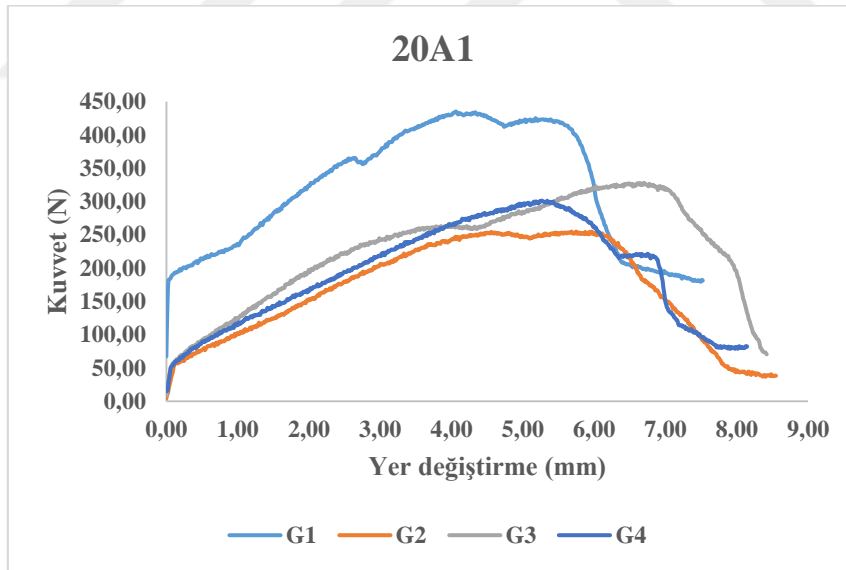
#### 4.1.2. 20a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi

Önceki bölümde verilen Çizelge 3.1 esas alınarak oluşturulmuş olan ve Çizelge 3.2’de detaylı olarak elde edilmiş boyutsal parametrelere dayanılarak, farklı ön gerilmeler altında üretilen yapısal numunelerden 20a serisine ait çekme testlerine ait Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) sonuçları Şekil 4.13 ile Şekil 4.24 arasında detaylı olarak verilmiştir.

Bu seri içerisinde toplamda 12 adet yapısal numune bulunmaktadır. Her bir numune kendi içinde aynı geometrik parametrede olarak, farklı ön gerilmelerin oluşturduğu etkiler araştırılmıştır.

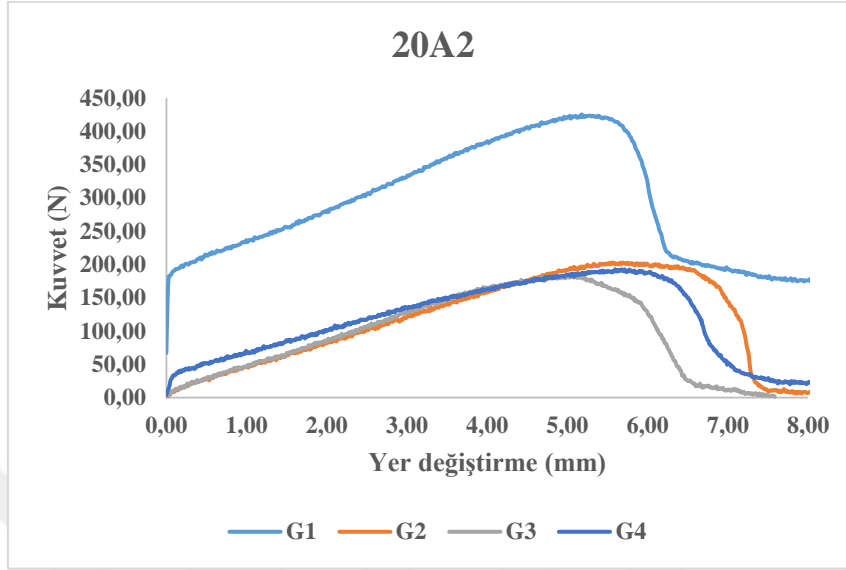
Bu numuneler üzerinde uygulanan  $10 \text{ N/mm}^2$  (Grup 1: G1),  $20 \text{ N/mm}^2$  (Grup 2: G2),  $40 \text{ N/mm}^2$  (Grup 3: G3) ve  $80 \text{ N/mm}^2$  (Grup 4: G4) olmak üzere toplamda 4 farklı değerde ön gerilmeler uygulanmıştır. Bu serideki numuneler içerisinde, maksimum yük taşıyan yapısal numunelerin uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.13’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A1 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **430 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



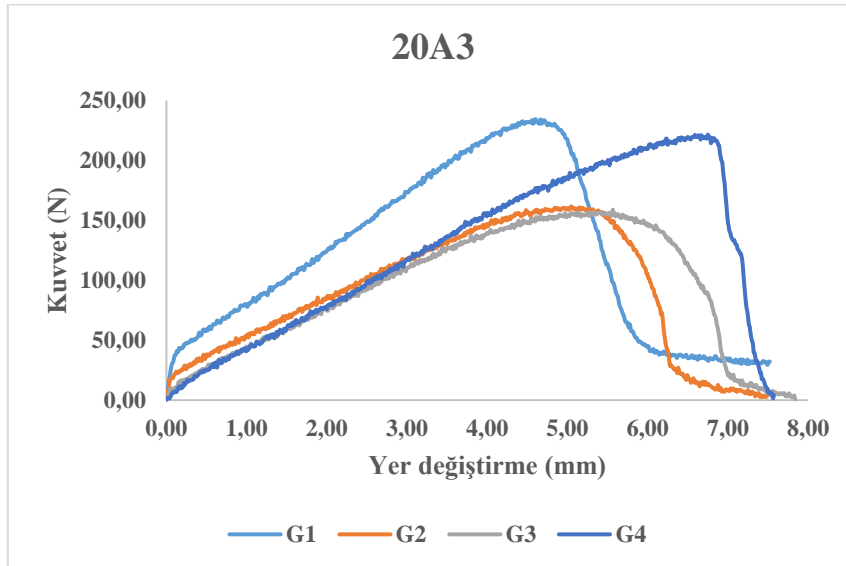
Şekil 4.13 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A1 numunesinin Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.14’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A2 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **420 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



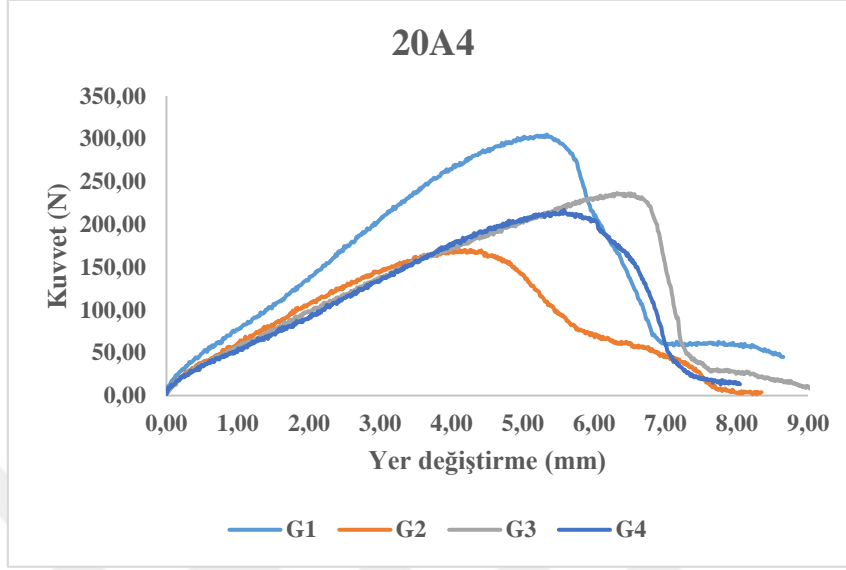
Şekil 4.14 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.15’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A3 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **230 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



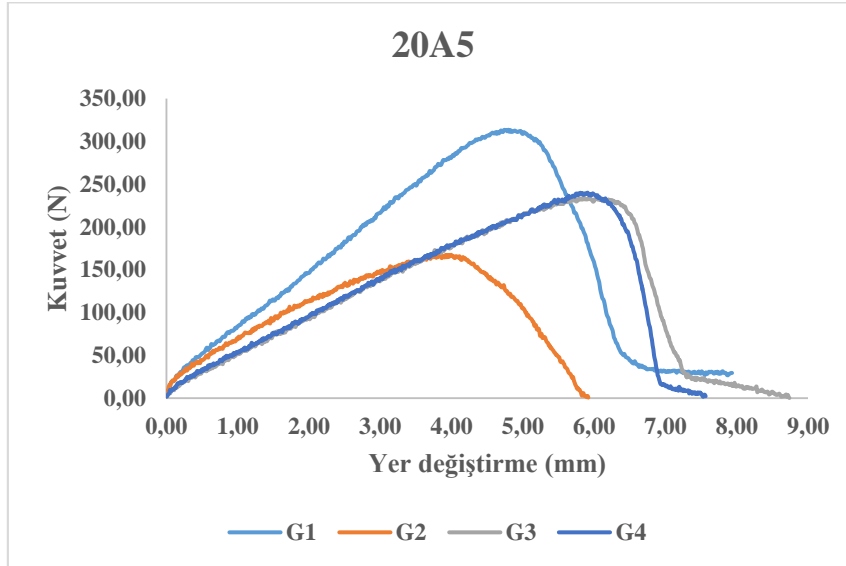
Şekil 4.15 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.16’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A4 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **300 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



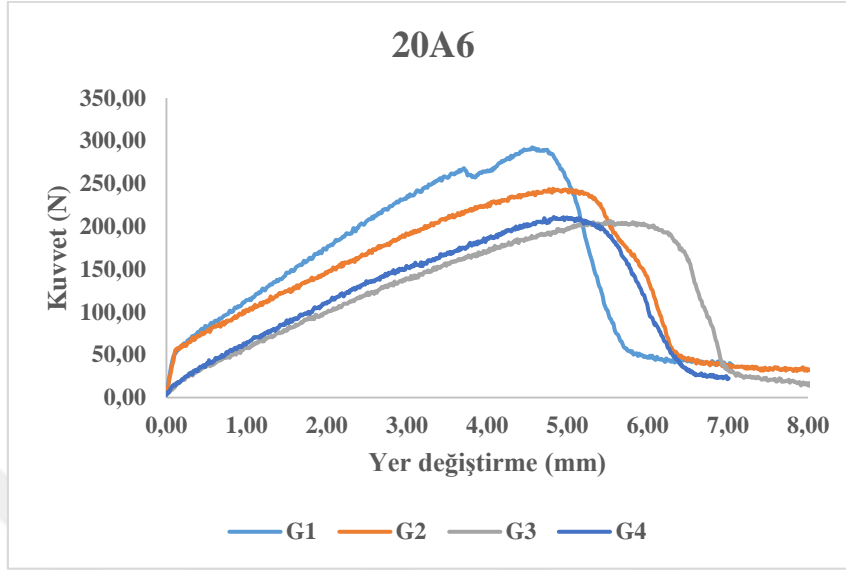
Şekil 4.16 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.17’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A5 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **310 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



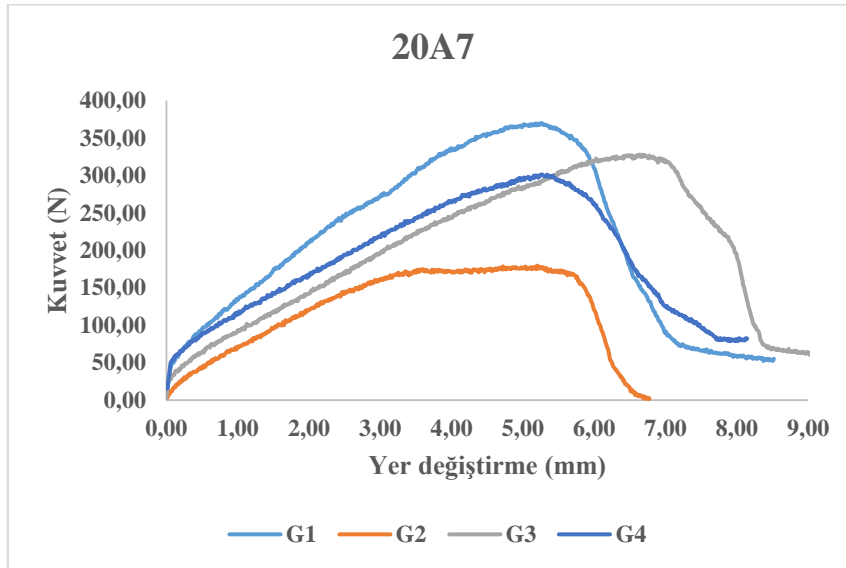
Şekil 4.17 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.18’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A6 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **285 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



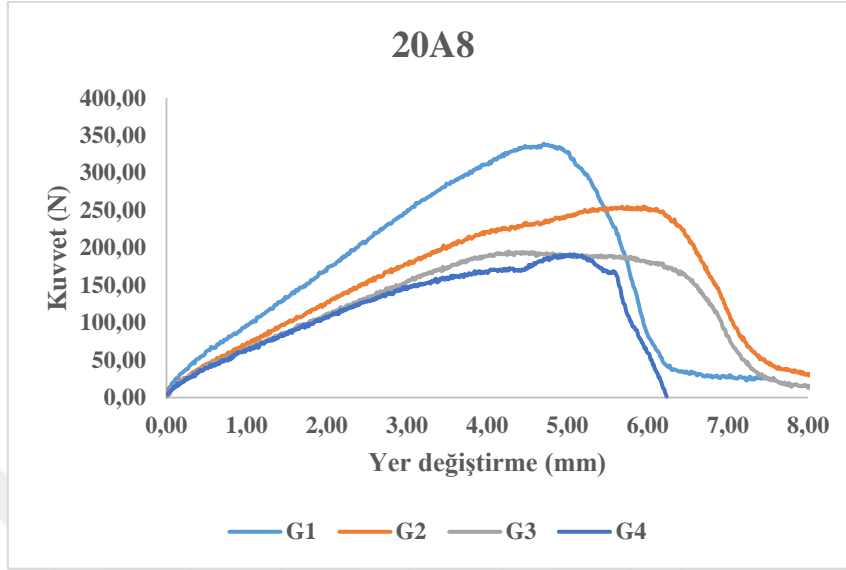
Şekil 4.18 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.19’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A7 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **360 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



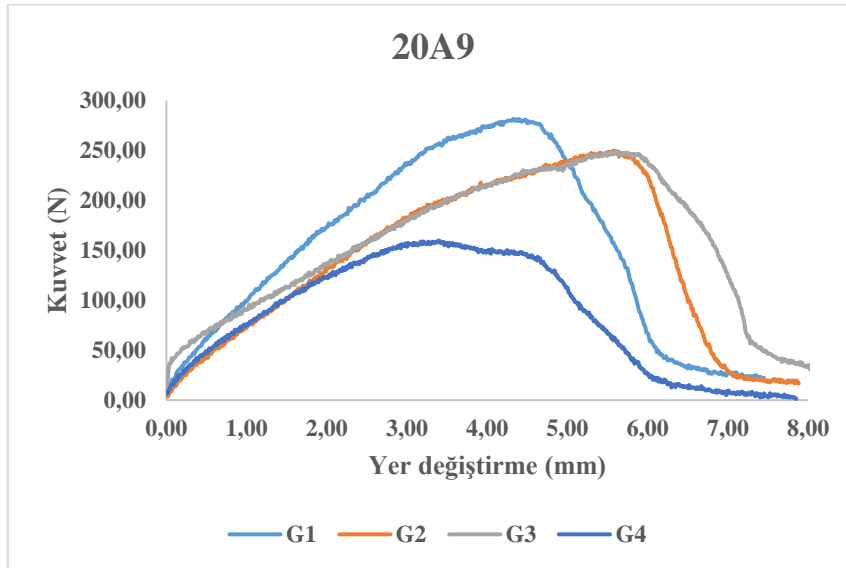
Şekil 4.19 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.20’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A8 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **330 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



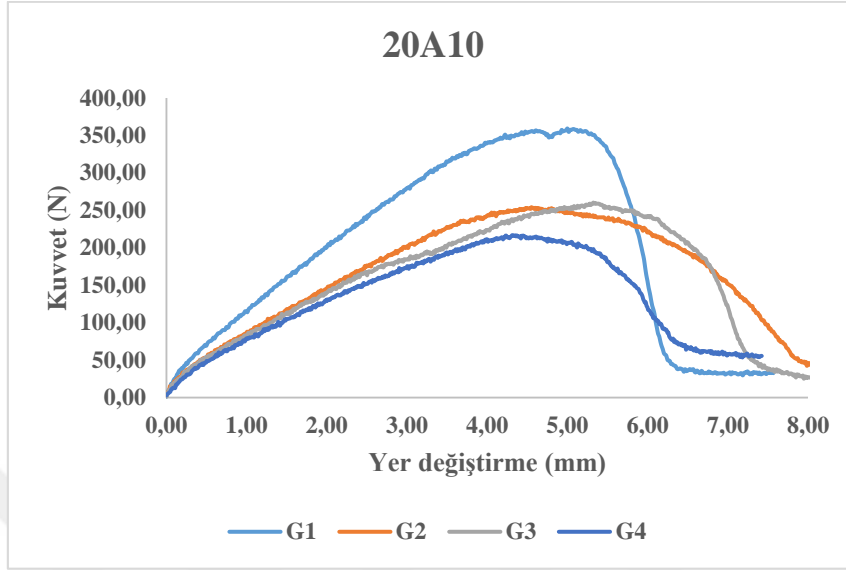
Şekil 4.20 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.21’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A9 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **280 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



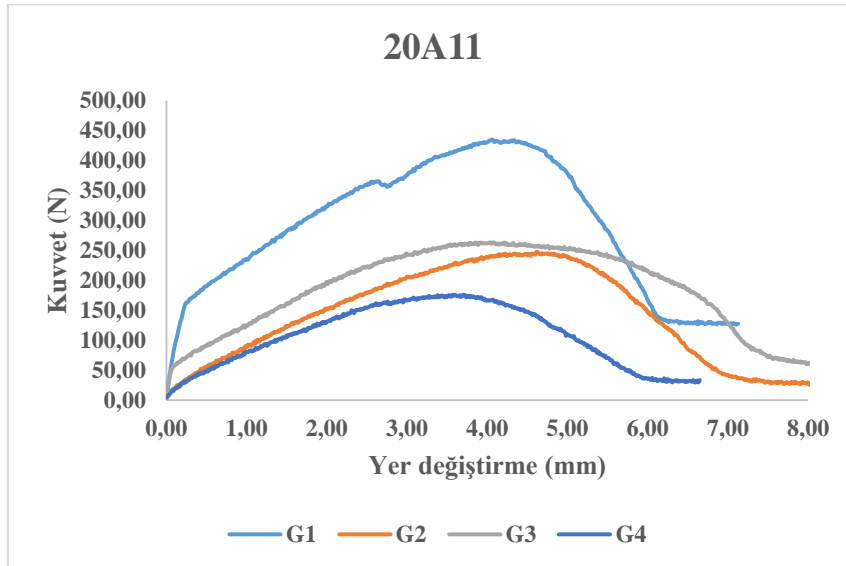
Şekil 4.21 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.22’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A10 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **355 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



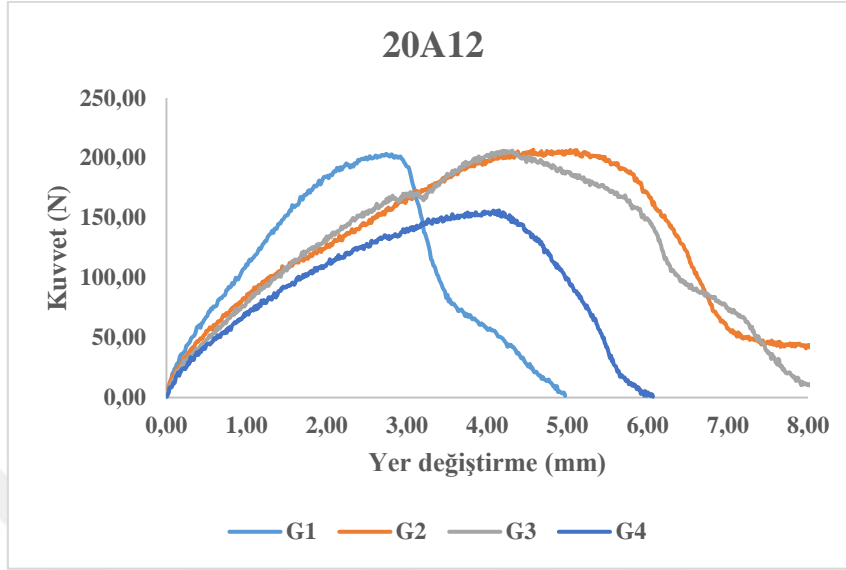
Şekil 4.22 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.23’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A11 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **430 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.23 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.24’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 20A12 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **205 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.24 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 20A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

#### 4.1.3. 24a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi

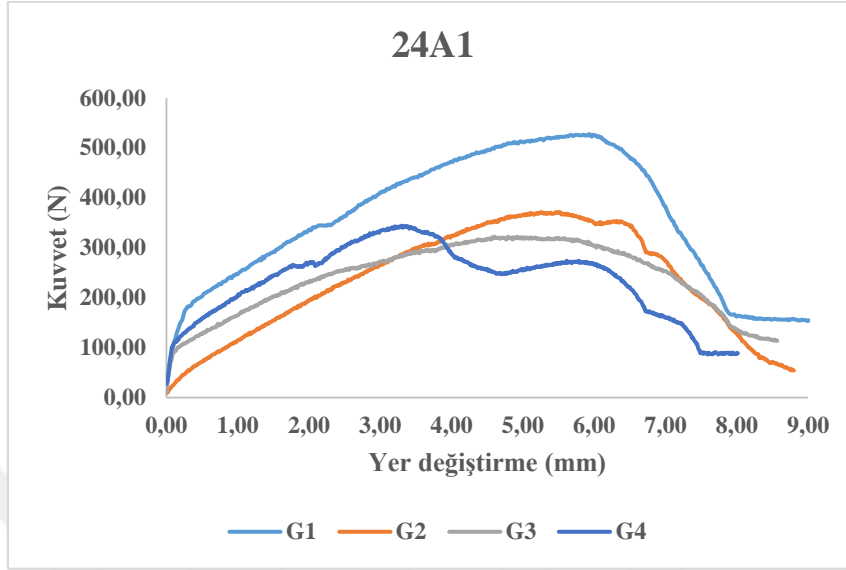
Önceki bölümde verilen Çizelge 3.1 esas alınarak oluşturulmuş olan ve Çizelge 3.2’de detaylı olarak elde edilmiş boyutsal parametrelere dayanılarak, farklı ön gerilmeler altında üretilen yapısal numunelerden 24a serisine ait çekme testlerine ait Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) sonuçları Şekil 4.25 ile Şekil 4.36 arasında detaylı olarak verilmiştir.

Bu seri içerisinde toplamda 12 adet yapısal numune bulunmaktadır. Her bir numune kendi içinde aynı geometrik parametrede olarak, farklı ön gerilmelerin oluşturduğu etkiler araştırılmıştır.

Bu numuneler üzerinde uygulanan  $10 \text{ N/mm}^2$  (Grup 1: G1),  $20 \text{ N/mm}^2$  (Grup 2: G2),  $40 \text{ N/mm}^2$  (Grup 3: G3) ve  $80 \text{ N/mm}^2$  (Grup 4: G4) olmak üzere toplamda 4 farklı değerde ön gerilmeler uygulanmıştır. Bu serideki numuneler içerisinde, maksimum yük taşıyan yapısal numunelerin uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

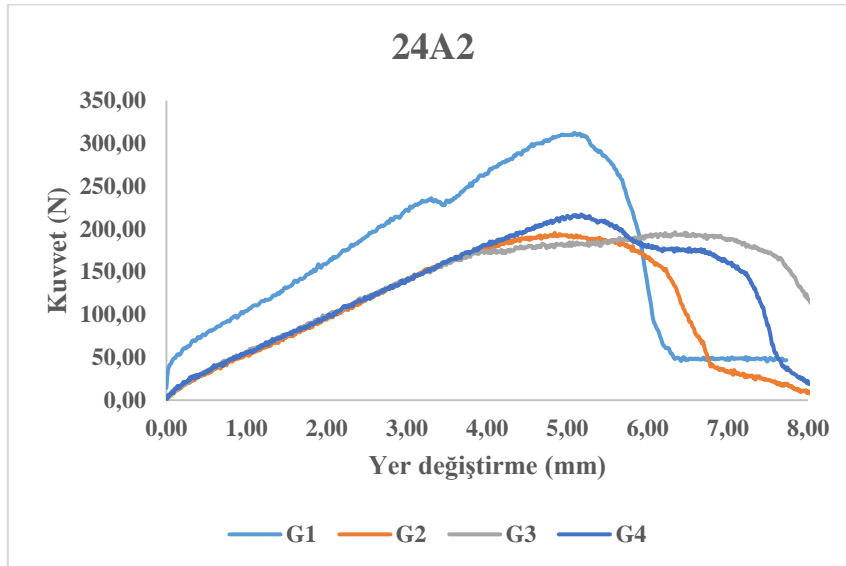


Şekil 4.25’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A1 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **525 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



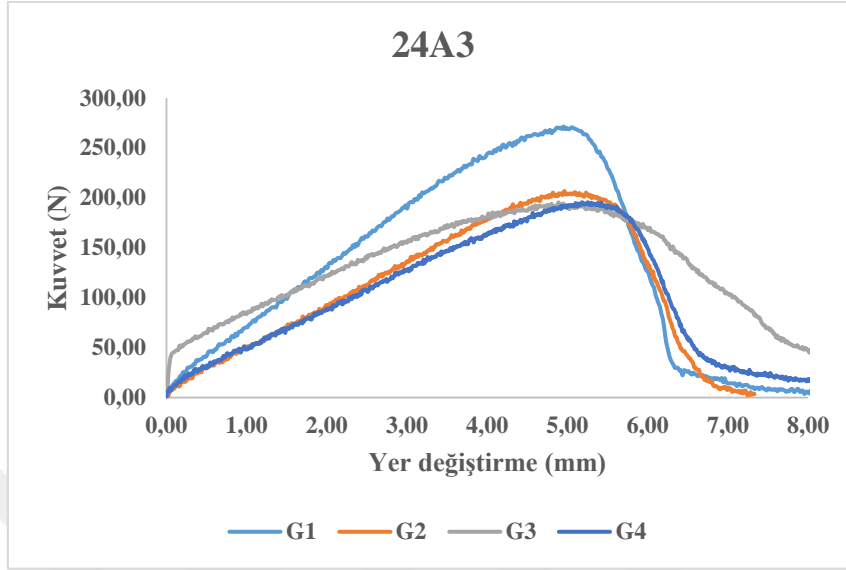
Şekil 4.25 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.26’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A2 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **310 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



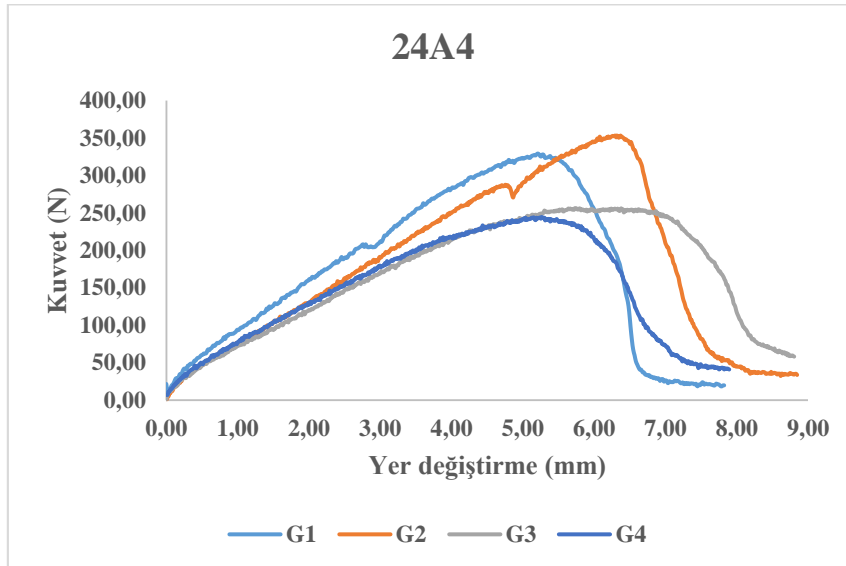
Şekil 4.26 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.27’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A3 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **270 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



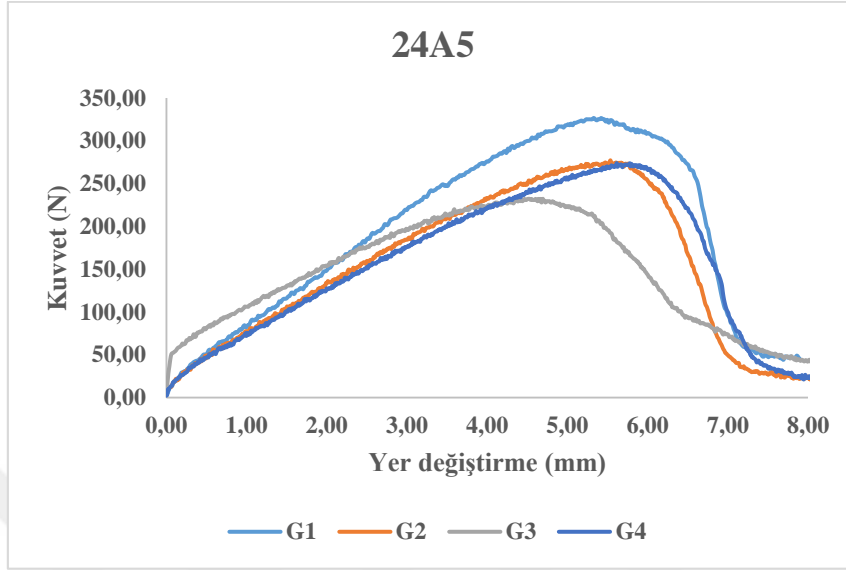
Şekil 4.27 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.28’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A4 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **350 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



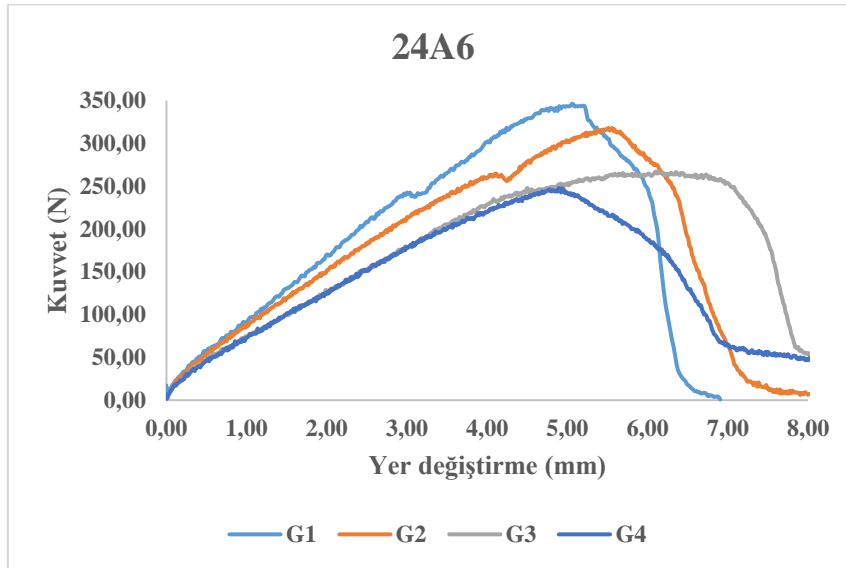
Şekil 4.28 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.29’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A5 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **325 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



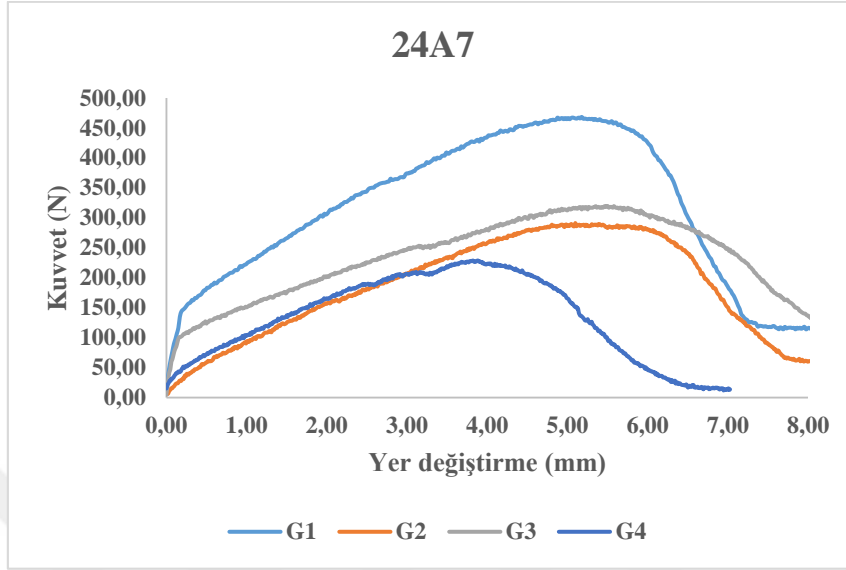
Şekil 4.29 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.30’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A6 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **330 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



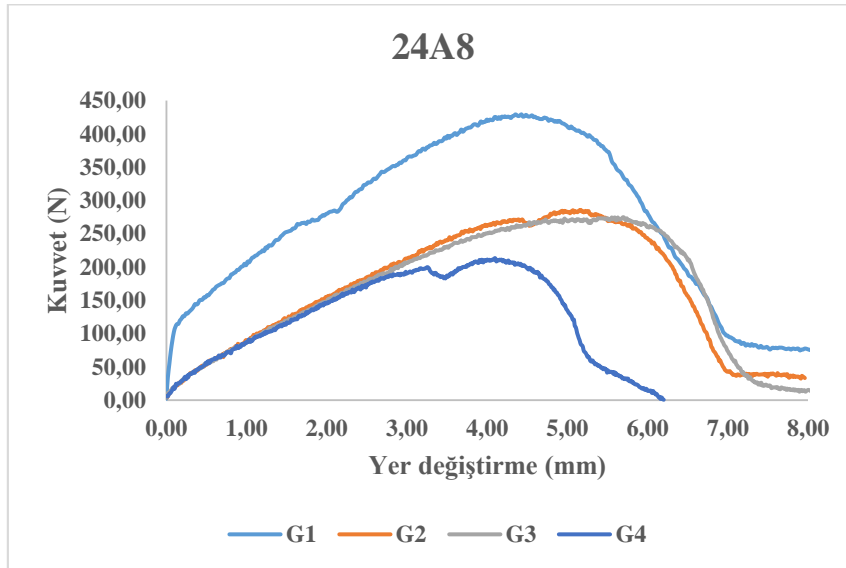
Şekil 4.30 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.31’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A7 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **465 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



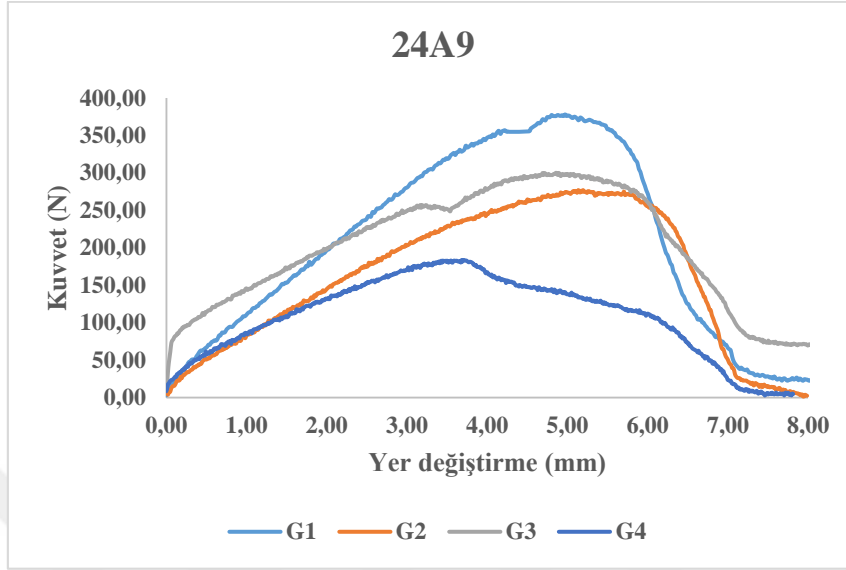
Şekil 4.31 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.32’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A8 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **425 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



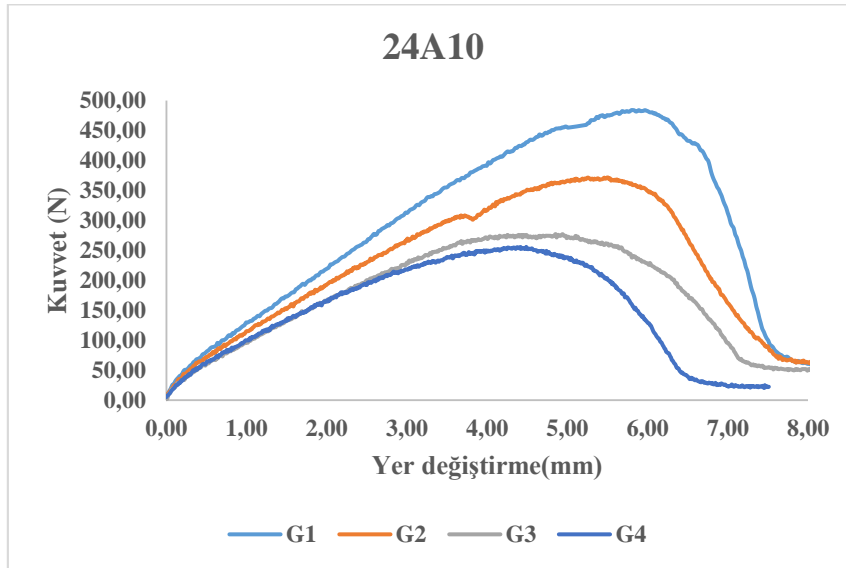
Şekil 4.32 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.33’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A9 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **375 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



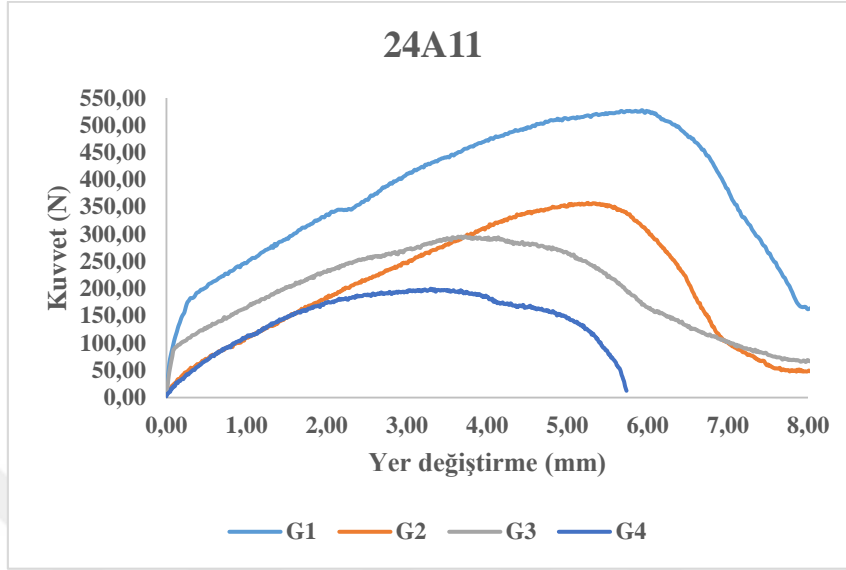
Şekil 4.33 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.34’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A10 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **480 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



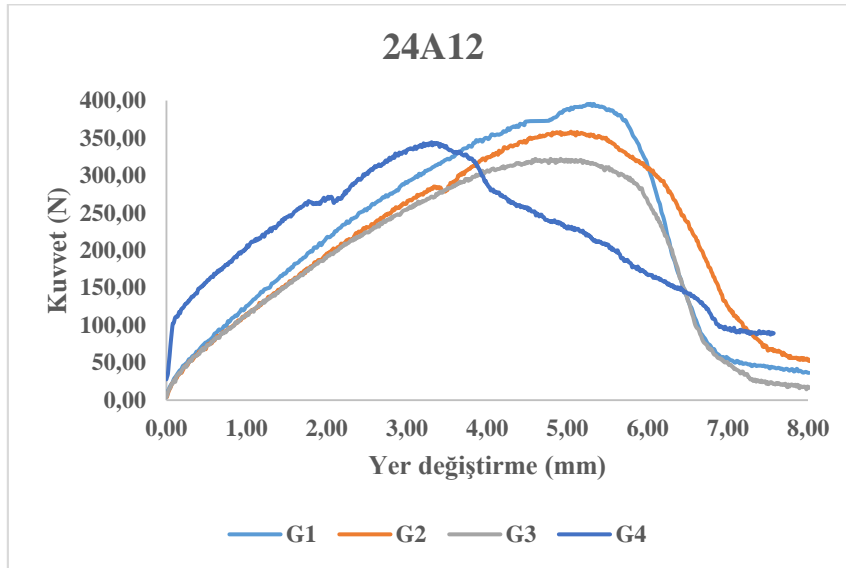
Şekil 4.34 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.35’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A11 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **525 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.35 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.36’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 24A12 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **400 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.36 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 24A12 numunesinin Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) davranışı

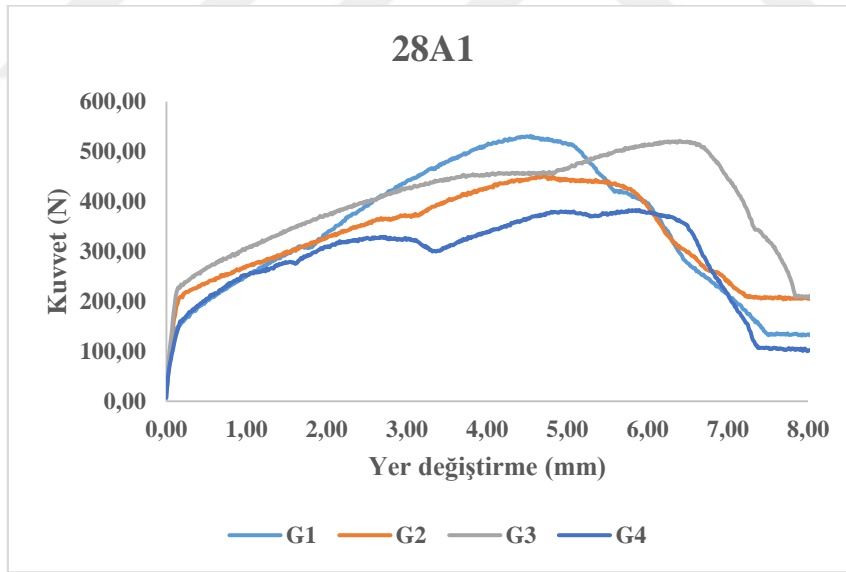
#### 4.1.4. 28a Serisine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Davranışlarının Değerlendirilmesi

Önceki bölümde verilen Çizelge 3.1 esas alınarak oluşturulmuş olan ve Çizelge 3.2’de detaylı olarak elde edilmiş boyutsal parametrelere dayanılarak, farklı ön gerilmeler altında üretilen yapısal numunelerden 28a serisine ait çekme testlerine ait Kuvvet (N) - Yer değiştirme (mm) sonuçları Şekil 4.37 ile Şekil 4.48 arasında detaylı olarak verilmiştir.

Bu seri içerisinde toplamda 12 adet yapısal numune bulunmaktadır. Her bir numune kendi içinde aynı geometrik parametrede olarak, farklı ön gerilmelerin oluşturduğu etkiler araştırılmıştır.

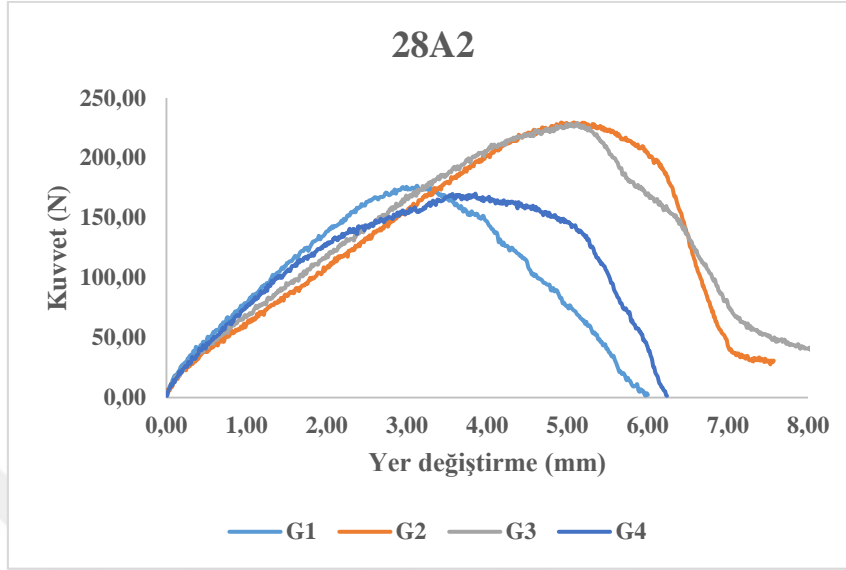
Bu numuneler üzerinde uygulanan  $10 \text{ N/mm}^2$  (Grup 1: G1),  $20 \text{ N/mm}^2$  (Grup 2: G2),  $40 \text{ N/mm}^2$  (Grup 3: G3) ve  $80 \text{ N/mm}^2$  (Grup 4: G4) olmak üzere toplamda 4 farklı değerde ön gerilmeler uygulanmıştır. Bu serideki numuneler içerisinde, maksimum yük taşıyan yapısal numunelerin uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.37’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A1 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **525 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



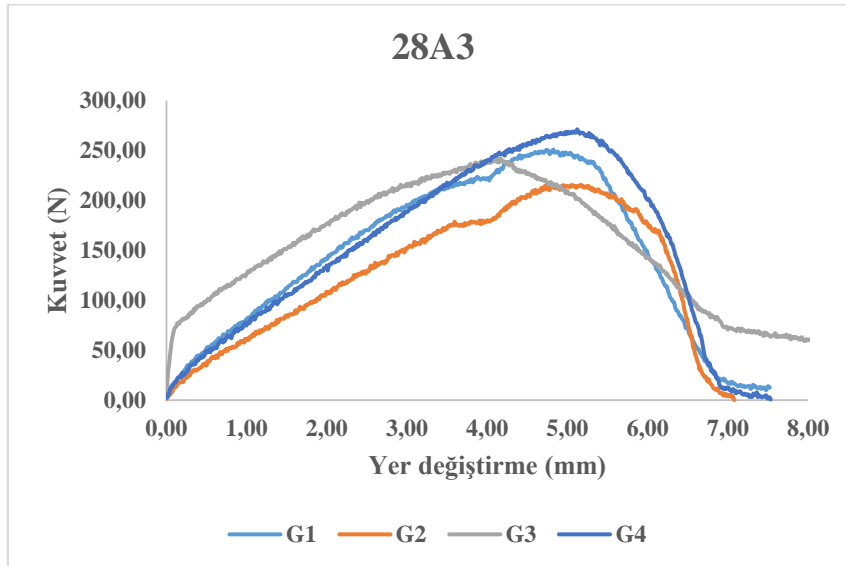
Şekil 4.37 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A1 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.38’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A2 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **225 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.38 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A2 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

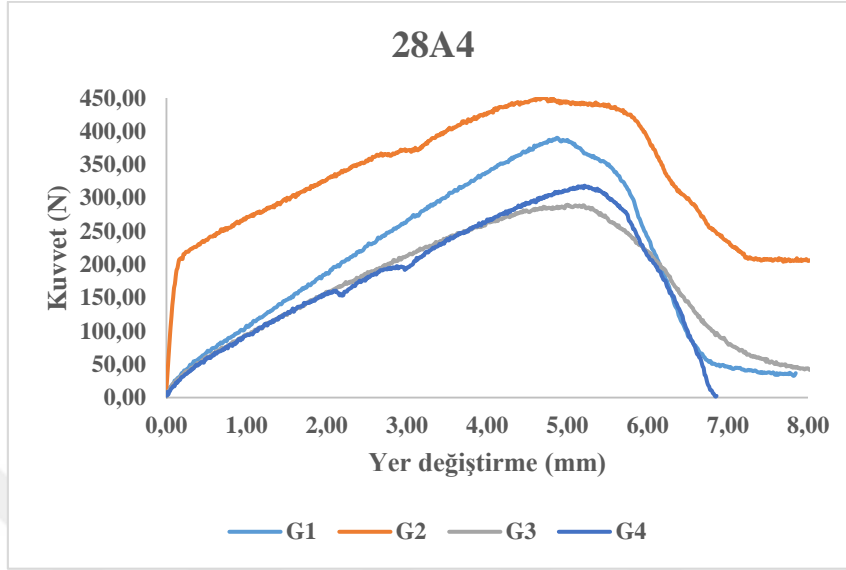
Şekil 4.39’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A3 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G4** ön gerilmesi altında yaklaşık **265 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.39 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A3 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

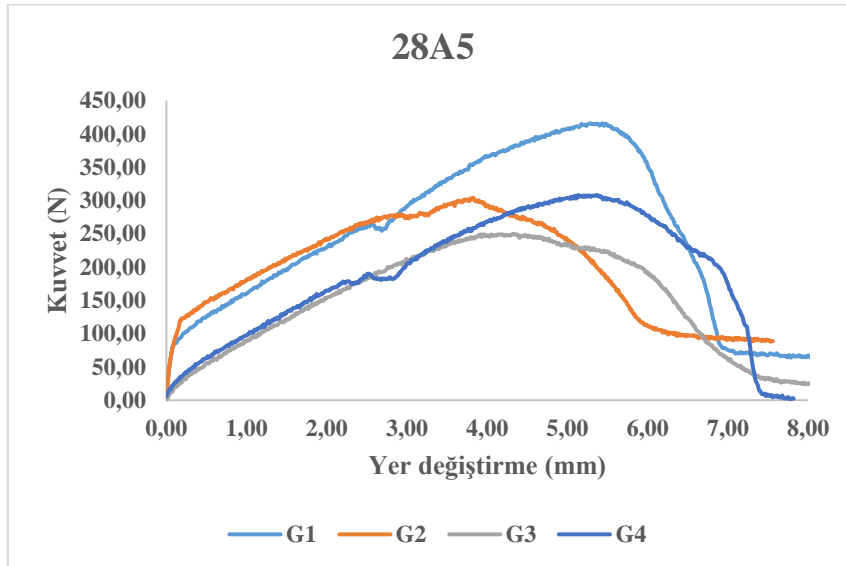


Şekil 4.40’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A4 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G2** ön gerilmesi altında yaklaşık **445 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



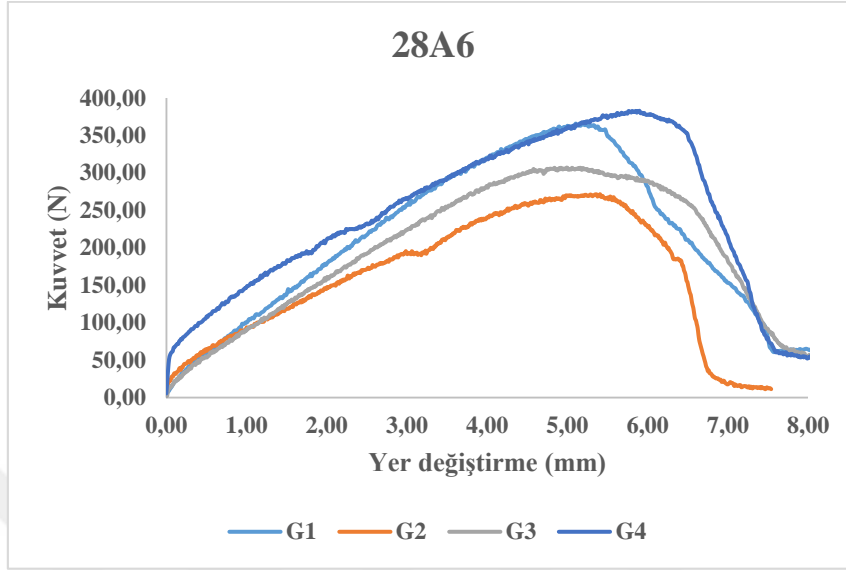
Şekil 4.40 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A4 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.41’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A5 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **415 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



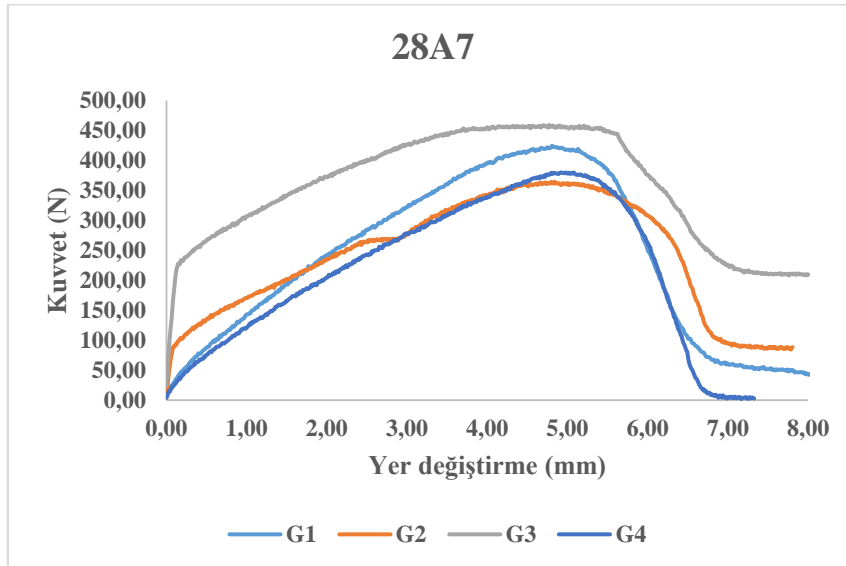
Şekil 4.41 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A5 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.42’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A6 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G4** n gerilmesi altında yaklaşık **375 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



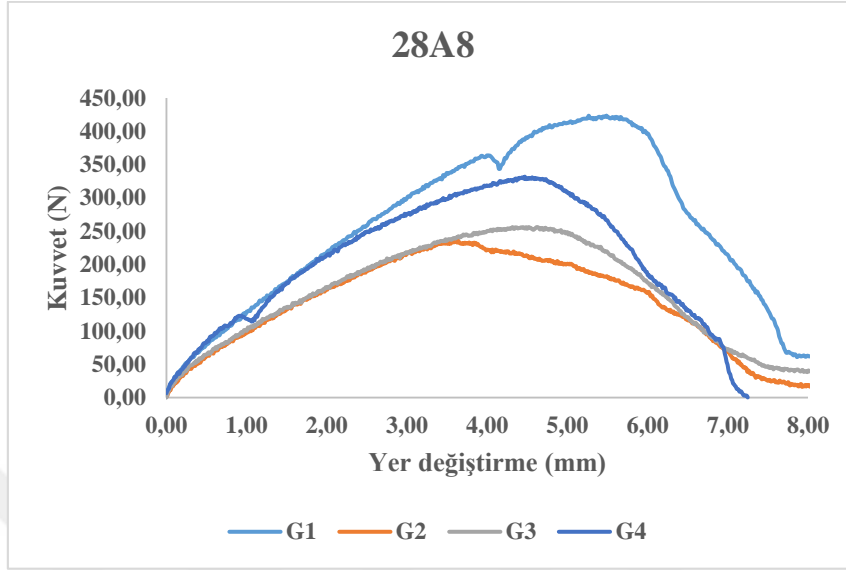
Şekil 4.42 Farklı n gerilmelerin uygulandığı 28A6 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.43’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A7 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G3** n gerilmesi altında yaklaşık **455 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



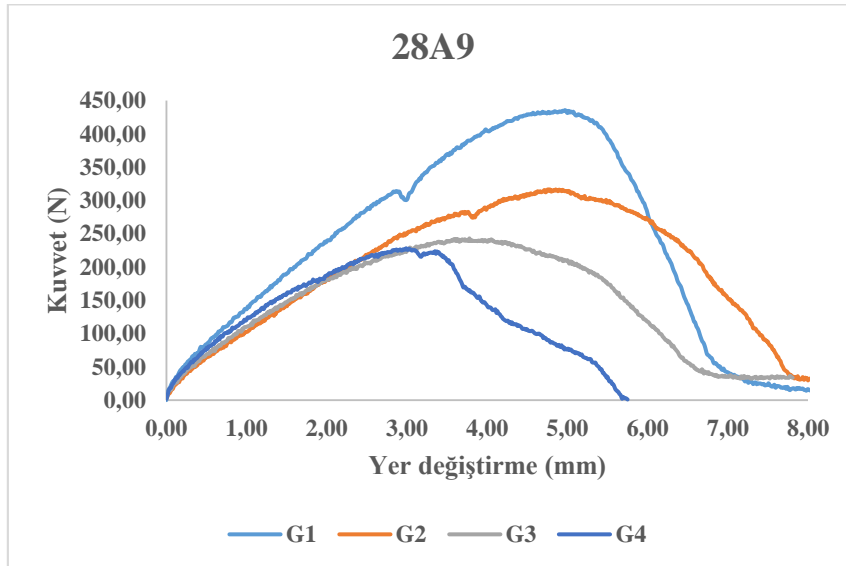
Şekil 4.43 Farklı n gerilmelerin uygulandığı 28A7 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.44’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A8 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **420 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



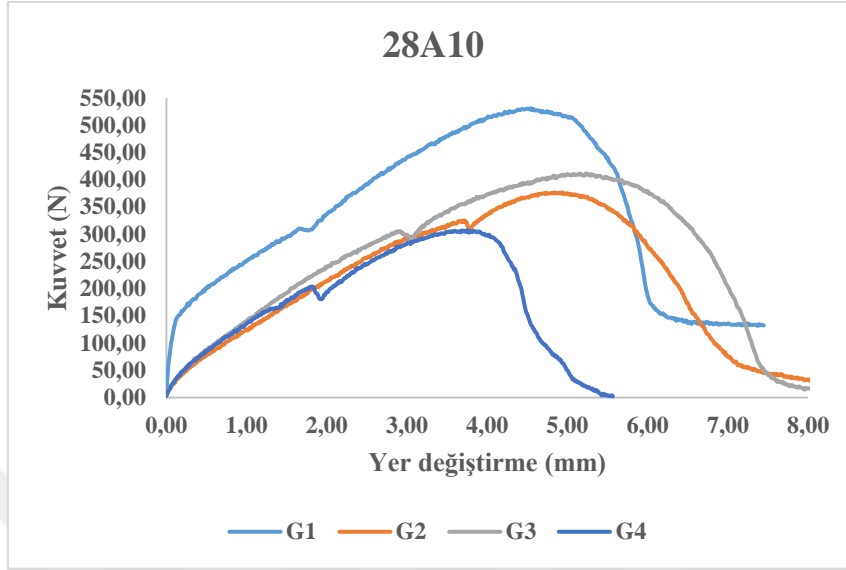
Şekil 4.44 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A8 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.45’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A9 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **430 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



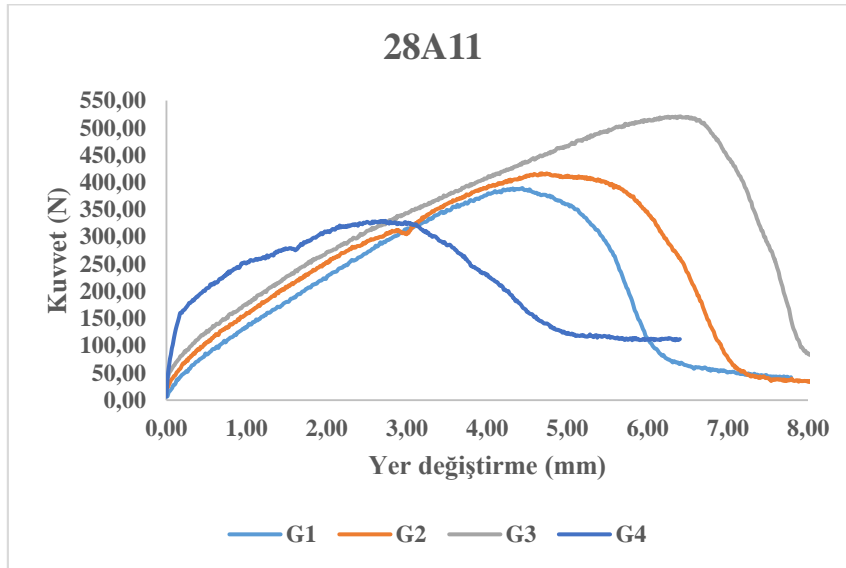
Şekil 4.45 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A9 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.46’da üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A10 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G1** ön gerilmesi altında yaklaşık **530 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



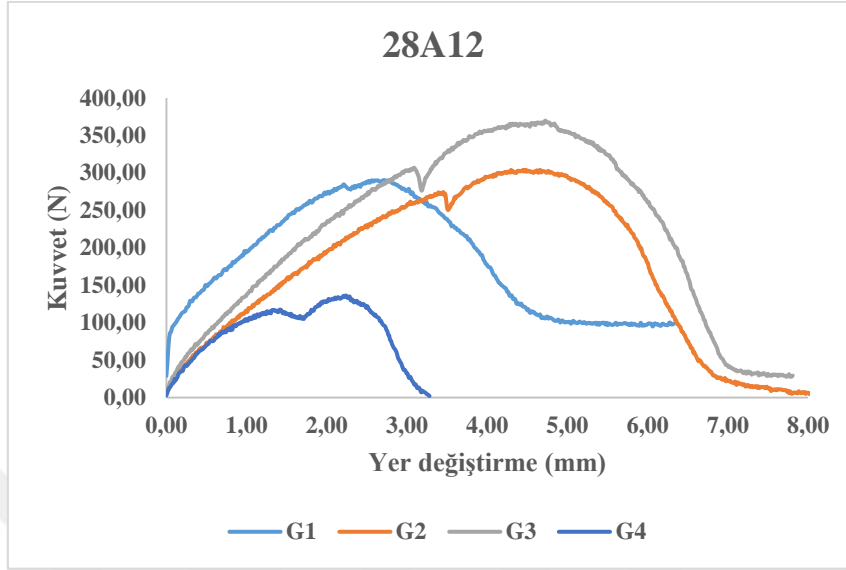
Şekil 4.46 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A10 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.47’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A11 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G3** ön gerilmesi altında yaklaşık **520 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.47 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A11 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Şekil 4.48’de üzerinde uygulanan 4 farklı ön gerilme ile birleştirilen 28A12 numunesinin deneysel olarak Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) davranışları gösterilmiş olup, maksimum yük taşıma kapasitesi **G3** ön gerilmesi altında yaklaşık **365 N** değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.48 Farklı ön gerilmelerin uygulandığı 28A12 numunesinin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

#### 4.2. Maksimum Yük Taşıyan Numunelerin Nümerik Analizlerle Karşılaştırmalı Sonuçları

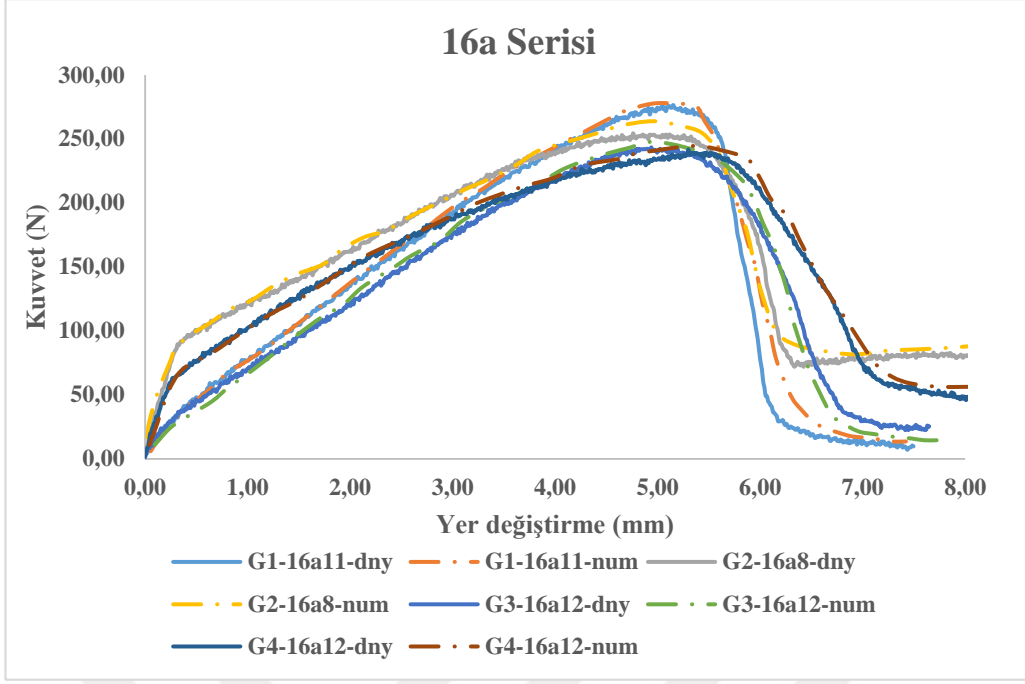
Farklı ön gerilmeler altında maksimum yapışma performansına ulaşan viskoelastik bant ile oluşturulan yapısal numunelerin içerisinde maksimum yük taşıyabilen numunelerin, 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışlı Abaqus Paralel Reolojik Ağ Modeli ile elde edilen optimum malzeme parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

Önceki bölümde oluşturulan tüm serilerin Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışları detaylı olarak verilmişti. Bu verilerin içerisinde maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin belirlenmesinde kullanılan temel gösterge, en az şekil değişimiyle en yüksek kuvvet değerine sahip olması şeklinde belirlenmiştir.

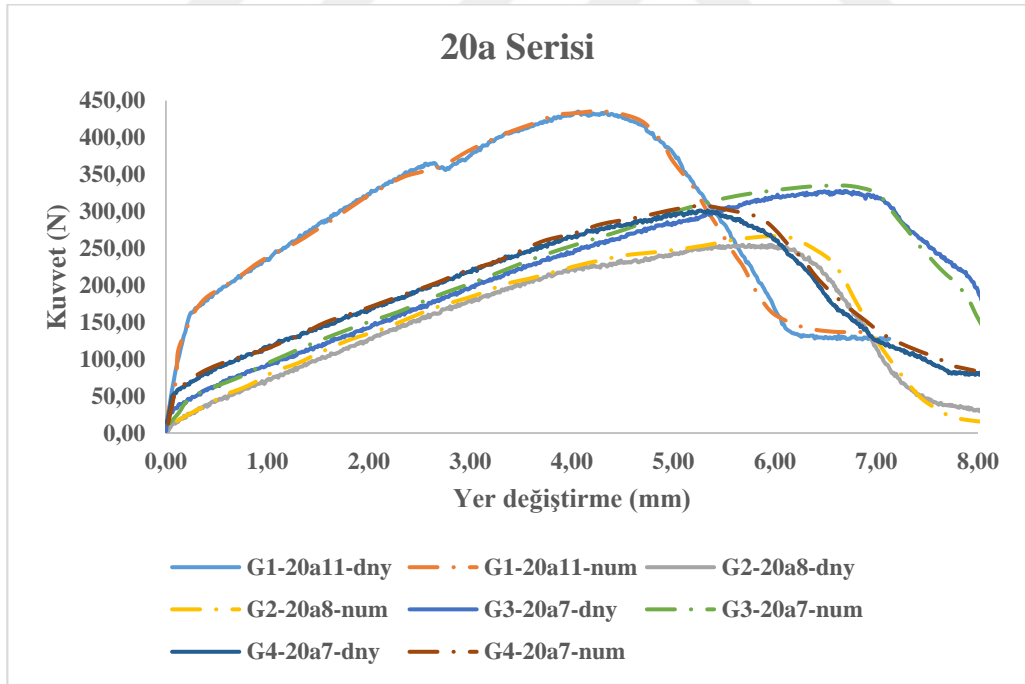
Maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin karşılaştırmalı *deneysel (dny)* ve *nümerik analiz sonuçları (num)*, aynı c boyutuna sahip yapısal tasarıma göre sınıflandırılmış olup, yapılan değerlendirmeler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Temel olarak tüm karşılaştırmalarda her serinin kendi değerlendirilmesi yapılmış olup, elde edilen sonuçlar sırayla aşağıda verilmiştir:

- ◆ Şekil 4.49'da, **16a** serisine ait maksimum yük taşıyan numunelerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak yük taşıma kapasitelerine ait maksimum değerler yaklaşık **G1-16A11** numunesi için, **270 N** ve **5 mm** civarında bulunmaktadır. Diğer numuneler için ön gerilme miktarı arttıkça maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalış olduğu belirlenmiştir.
- ◆ Şekil 4.50'de, **20a** serisine ait maksimum yük taşıyan numunelerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak yük taşıma kapasitelerine ait maksimum değerler yaklaşık **G1-20A11** numunesi için, **430 N** ve **4 mm** civarında bulunmaktadır. Diğer numunelerde ise ön gerilme miktarı arttıkça maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalış olduğu belirlenmiştir.
- ◆ Şekil 4.51'de, **24a** serisine ait maksimum yük taşıyan numunelerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak yük taşıma kapasitelerine ait maksimum değerler yaklaşık **G1-24A11** numunesi için, **525 N** ve **6 mm** civarında bulunmaktadır. Diğer numunelerde ise ön gerilme miktarı arttıkça maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalış olduğu belirlenmiştir.
- ◆ Şekil 4.52'de, **28a** serisine ait maksimum yük taşıyan numunelerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak yük taşıma kapasitelerine ait maksimum değerler yaklaşık **G1-28A10** numunesi için, **530 N** ve **4,5 mm** civarında bulunmaktadır. Diğer numunelerde ise ön gerilme miktarı arttıkça maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalış olduğu belirlenmiştir.

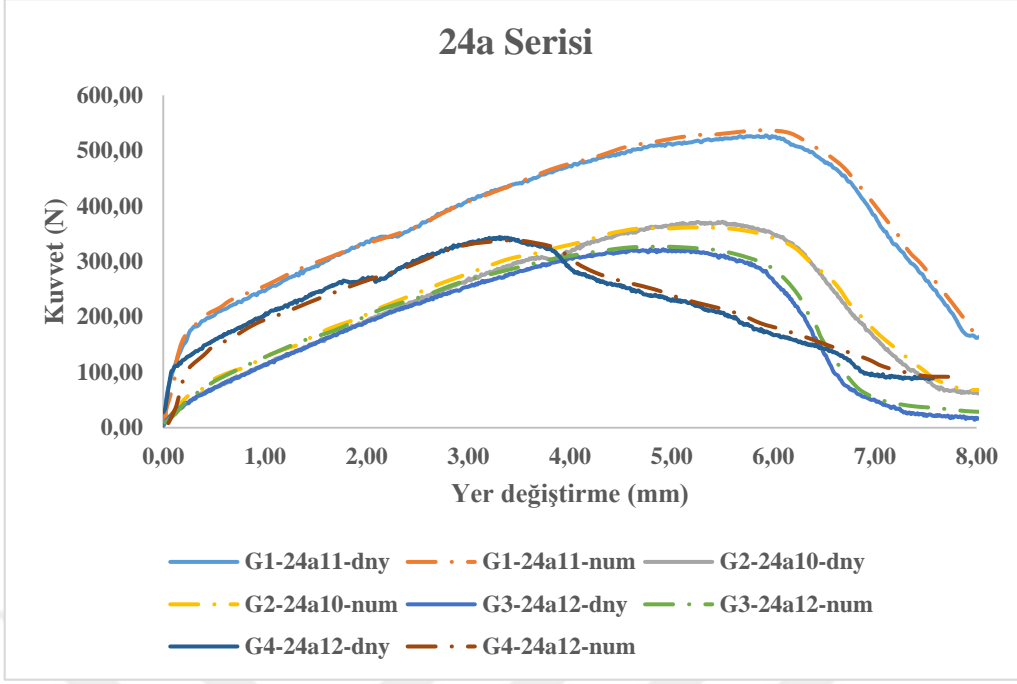
Akrilik polimer yapıda bulunan ve viskoelastik bir davranışa sahip olan VHB 4950 çift taraflı yapıştırıcı bant ile yapılan birleştirmelerin avantajları olarak, statik eksantrik yükler altındaki yüksek dayanımı ile diğer (perçin ve kaynak gibi) mekanik birleştirme yöntemlerine ve diğer yapıştırıcılarla yapılan birleştirmelere bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Çalışma kapsamında, viskoelastik bantın mekanik davranışlarına ait elde edilen sonuçların, literatürde yer alan ve incelemesi yapılan çalışmalara ait bulgularla uyumlu olduğu da belirlenmiştir [15, 19, 21, 23, 28, 31, 35]. Ayrıca homojen yük dağılımı ile yükün bölgesel olarak tek noktada yoğunlaşması engellenerek, tasarımda serbestliğe ulaşabilme avantajının olduğu da görülmüştür. Yapısal bileşenler olan kompozit plakalar üzerinde hasara neden olacak büyük ölçekteki bir deformasyon olmamıştır. Oluşan tüm hasarlar bant üzerinde yer almakla birlikte, bakım maliyetlerinin düşürülmesini sağlayarak servis ömrünün uzamasına katkı da bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, ekonomik ve hızlı bir süreç sağlamaktadır.



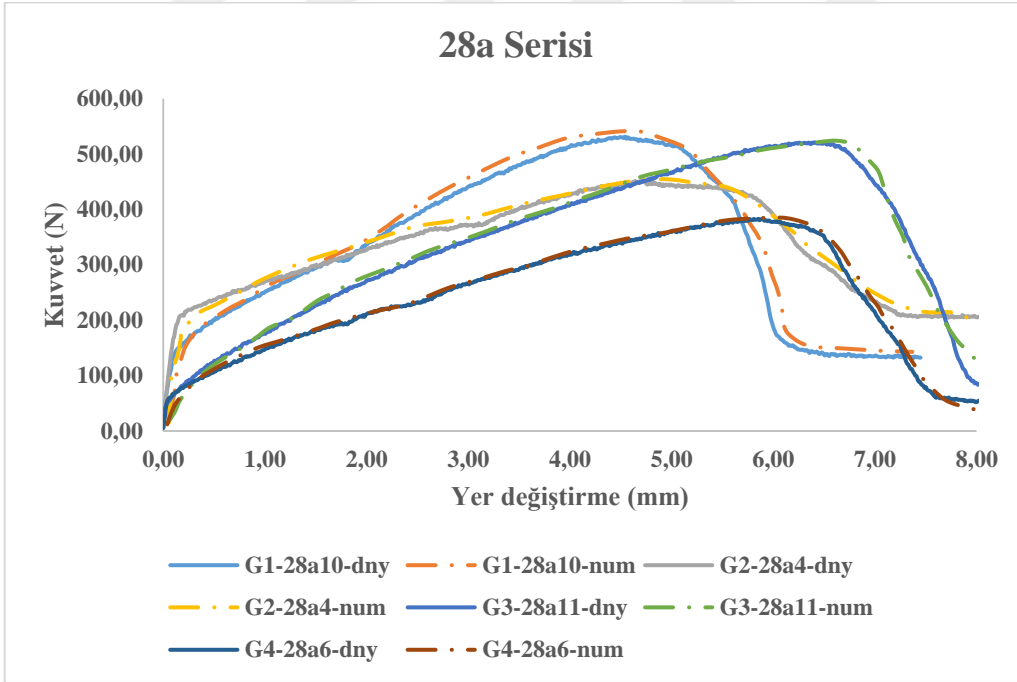
Şekil 4.49 Maksimum yük taşıyan 16a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı



Şekil 4.50 Maksimum yük taşıyan 20a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı



Şekil 4.51 Maksimum yük taşıyan 24a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı



Şekil 4.52 Maksimum yük taşıyan 28a serisi numunelerinin karşılaştırmalı Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışı

Yapısal olarak birleştirilmiş numuneler üzerinde uygulanan çekme testleri sonucunda elde edilen Kuvvet (N)–Yer değiştirme (mm) verileri ve sonlu elemanlar analiz sonuçları arasında



iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Çalışmamız kapsamında, en çok yük taşıma kapasitesine sahip olan yapısal numuneler gösterilmiş olup, belirlenen bu numunelere ait boyutsal özellikler ayrıca Çizelge 4.1’de detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca deney numuneleri üzerinde adhezyon ve kohezyon hasarları (ağırlıklı olarak) eş zamanlı olarak gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1 Maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin karşılaştırılması

| Numune Bilgileri |          | DeneySEL         |                        | NüMERİK          |                        |
|------------------|----------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
|                  |          | Maksimum Yük (N) | Maksimum Yer Değ. (mm) | Maksimum Yük (N) | Maksimum Yer Değ. (mm) |
| 16a Serisi       | G1-16A11 | 276,5652         | 7,4963                 | 277,7292         | 7,4228                 |
|                  | G2-16A8  | 254,5233         | 8,0280                 | 263,9344         | 8,0550                 |
|                  | G3-16A12 | 243,5000         | 7,6488                 | 247,7970         | 7,7244                 |
|                  | G4-16A12 | 241,7885         | 8,2172                 | 244,4981         | 8,1302                 |
| 20a Serisi       | G1-20A11 | 435,3695         | 7,1275                 | 435,9087         | 6,9892                 |
|                  | G2-20A8  | 255,0000         | 8,1206                 | 266,3093         | 8,1454                 |
|                  | G3-20A7  | 328,0000         | 9,1882                 | 334,9912         | 8,7218                 |
|                  | G4-20A7  | 301,3094         | 8,1460                 | 307,6865         | 7,9655                 |
| 24a Serisi       | G1-24A11 | 528,0000         | 8,3489                 | 537,2369         | 8,2651                 |
|                  | G2-24A10 | 371,7500         | 8,4334                 | 361,7087         | 8,1729                 |
|                  | G3-24A12 | 322,4069         | 8,6426                 | 326,9119         | 8,2007                 |
|                  | G4-24A12 | 344,5486         | 7,5718                 | 337,9232         | 7,7250                 |
| 28a Serisi       | G1-28A10 | 531,4513         | 7,4480                 | 541,0247         | 7,3682                 |
|                  | G2-28A4  | 452,6985         | 8,0203                 | 453,9589         | 7,9411                 |
|                  | G3-28A11 | 521,1458         | 8,4932                 | 524,4137         | 8,5254                 |
|                  | G4-28A6  | 382,9820         | 8,0480                 | 385,2737         | 8,0303                 |

Çizelge 4.1’e göre, **16a serisi** içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, **10 N/mm<sup>2</sup>** ön gerilme altındaki **G1-16A11** numunesi olduğu görülmektedir. **20a serisi** içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, **10 N/mm<sup>2</sup>** ön gerilme altındaki **G1-20A11** numunesi olduğu görülmektedir. **24a serisi** içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, **10 N/mm<sup>2</sup>** ön gerilme altındaki **G1-24A11** numunesi olduğu görülmektedir. **28a serisi** içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, **10 N/mm<sup>2</sup>** ön gerilme altındaki **G1-28A10** numunesi olduğu görülmektedir.

Genel olarak birleştirme işlemlerinde kullanılan yapıştırıcı bantlar, birleştirdikleri elemanların ağırlıkları veya tasarım içerisindeki iletmiş oldukları fonksiyonel yükleri hemen üzerlerine almaktadırlar. Bant için gerekli maksimum yapışma performansı değerine ulaşması için ihtiyaç duyulan süre, bazı uygulamalarda ihmal edilmekte olup bu nedenle yapıştırıcı bantın performansında farklılıklar oluştuğu bilinmektedir. Bu süre zarfı içerisinde, yüklemelerin şekli ise tamamen yapışma performansını etkilemektedir. Çalışma kapsamında, bu durumların farklı ön gerilmeler ve eksantrik yüklemelerle oluşturulması sağlanmıştır.

Temel olarak bu çalışmada, akrilik polimer grubunun bir elemanı olan ve viskoelastik bir yapıda bulunan çift taraflı yapıştırıcı bant VHB 4950 (3M™) elastomer malzemesinin, uygulanacağı yer için herhangi bir ilave ön yüzey hazırlama işlemine gerek duyulmadan, farklı fiziksel koşullar (ön gerilme altında birleştirme, yapısal tasarımla sağlanan eksantrik yükleme) altındaki yapısal davranışlarının nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için;

- Viskoelastik bant üzerinde ön gerilmenin etkisini araştırabilmek amacıyla, maksimum yapışma performansına ulaşma süresi boyunca yapısal birleştirmeler üzerine; 10 N/mm<sup>2</sup>, 20 N/mm<sup>2</sup>, 40 N/mm<sup>2</sup> ve 80 N/mm<sup>2</sup> değerlerinde ön gerilmeler uygulanmıştır. Belirlenen bu ön gerilmelerin uygulanabilmesi, tasarımı ve üretimi yapılan bilgisayar kontrollü bir hidrolik pres makinesi ile sağlanmıştır.
- Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan polimer esaslı tabakalı kompozit plakalar tercih edilerek oluşturulan yapısal tasarımlar aracılığıyla, viskoelastik bant üzerinde uygulamalarda karşılaşılabilecek en karmaşık yükleme türü olan eksantrik yüklemeler, sistematik bir şekilde viskoelastik bant üzerinde statik çekme testleri aracılığıyla oluşturulmuştur.

Araştırma; deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar olmak üzere 3 temel aşamadan oluşmuştur. Deneysel çalışmalarda, yapısal birleştirmenin alt bileşenlerinden olan VHB 4950 bantı için standartlaşmış farklı testlerden biri olan viskoelastik çevrimsel yükleme-boşaltma testleri yapılmış olup, tabakalı kompozit plakaların mekanik özellikleri, ilgili ASTM deney standartlarına göre belirlenmiştir.

Analitik ve nümerik çalışmalar için, malzeme modellerine ait çeşitli kuramsal temeller detaylı olarak incelenmiştir. Analitik çalışmalar için farklı malzeme modelleri bünyesinde bulunduran Mcalibration® yazılımı, nümerik çalışmalar için Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne göre çözüm sağlayan Abaqus®/Explicit yazılımı kullanılmıştır.

Tüm bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- ✓ Viskoelastik yapıda bulunan VHB 4950 bantının uygulanacağı epoksi matrisli yüzey için sadece Primer 94 ile ön yüzey hazırlama işlemi yapılarak, yapışma performansının yüksek olması sağlanmıştır.
- ✓ Viskoelastik bantın mekanik karakterizasyonu için uygulanan çevrimsel yükleme-boşaltma testleri, % 50, % 100, % 150, % 200 deformasyonda ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  değerlerindeki şekil değişimi altında yapılmıştır. Şekil değişim hız oranı ve deformasyonun artması durumunda, viskoelastik banta ait nominal gerilme değerlerinin yükselmeye başladığı tespit edilmiştir.
- ✓ Analitik çalışmalarda kullanılmak üzere; viskoelastik bant için yapılan tüm çevrimsel yükleme-boşaltma testlerinden elde edilen Nominal gerilme (kPa)-Gerinim(-) değerleri, Mcalibration® yazılımı ortamında bulunan (Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin, Hiperelastik -Mullins-Ogden, Hiperelastik -Mullins-Yeoh, PRF Model: 3 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı, PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Sinüs Hiperbolik Akışı, PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Güç Kanunu Akışı, PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Şekil Değişimli Güç K. Akışı, PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı) modellerine ait model kalibrasyon hata değerleri elde edilmiştir.
- ✓ Model kalibrasyon hata değerlerinin % 10 altında olduğu tespit edilen malzeme modelleri için en uygun çevrimsel yükleme-boşaltma testinin % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değişim hızında olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen bu malzeme modelleri, kuramsal esaslarıyla beraber incelenmiş olup, model parametrelerine ait ilgili değerleri optimize edilmiştir.
- ✓ Şekil değişim hızının ve deformasyonunun artması durumunda, model kalibrasyonu hata değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ En düşük model kalibrasyon hata değeri % 2,4284 ile PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı modelinden elde edilmiştir. Bu hata değerinde, ilgili malzeme modeline ait parametreler belirlenmiştir. Ayrıca bu modelin diğer şekil değişim hızı ve deformasyonları altındaki model hata kalibrasyon değerleri ve model parametreleri de tespit edilmiştir.
- ✓ Analitik çalışmalar neticesinde belirlenen PRF Model: 4 Yeoh Ağı ile Bergstrom-Boyce Akışı modelinden elde edilen malzeme model parametreleri, nümerik çalışmalarda

kullanılan Abaqus®/Explicit yazılımına aktarılmıştır. Böylece viskoelastik bantın sonlu elemanlar yöntemine göre modellenmesi yapılmıştır.

- ✓ Yapısal tasarımlarda kullanılan polimer esaslı tabakalı kompozit plakaların mekanik özellikleri, ilgili ASTM standartlarına göre belirlenerek, nümerik çalışmalarda kullanılan Abaqus®/Explicit yazılımına aktarılmıştır. Ayrıca yapısal tasarımın bir bütün halinde deney koşullarına göre modellenerek, deneysel çalışmalarda uygulanan statik çekme testleri altında elde edilen Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) verileri ile maksimum yük taşıma kapasiteleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır.
- ✓ Farklı ön gerilmeler altındaki viskoelastik yapıştırıcı bant ile birleştirilen yapısal numuneler, statik çekme testi esnasında tasarım neticesinde oluşan eksantrik yüklemeler altındaki numunelerin tamamının Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) davranışları deneysel olarak elde edilmiş olup, içlerinden maksimum yük taşıyan numunelerin tespiti yapılmıştır.
- ✓ Deneysel çalışmalar neticesinde; 16a serisi içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, 10 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altındaki G1-16A11 numunesi (270 N ve 5 mm civarında) olduğu belirlenmiştir. 20a serisi içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, 10 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altındaki G1-20A11 numunesi (430 N ve 4 mm civarında) olduğu belirlenmiştir. 24a serisi içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, 10 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altındaki G1-24A11 numunesi (525 N ve 6 mm) olduğu belirlenmiştir. 28a serisi içerisinde maksimum yük taşıyan numunenin, 10 N/mm<sup>2</sup> ön gerilme altındaki G1-28A10 numunesi (530 N ve 4,5 mm civarında) olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Deneysel çalışmalardan elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin temel özelliğinin, düşük ön gerilmeli ve geniş yapışma alanına sahip olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca yapısal tasarım ile oluşturulan eksantrik yüklemelerin, yapının geometrisinin tekli bindirme bağlantısına en yakın olduğu numuneler de düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir. (Bu durum; c boyutunun, a boyutuna yakın olan numuneler de geçerlidir.)
- ✓ Maksimum yük taşıma kapasitesine sahip numunelerin deneysel çalışmalardan elde edilen Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) verileri ile nümerik çalışmalar kapsamında yapılan Sonlu eleman analizi sonuçlarından elde edilen Kuvvet (N)-Yer değiştirme (mm) verileri birbirleri ile kıyaslandığında iyi bir uyum ve yakınsama gösterdiği

belirlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda elde edilen viskoelastik banta ait deformasyon geometrisinin, nümerik çalışmalarla da geometrik olarak yakınsaması elde edilmiştir. Bantın uç kısımlarında, eğilme ve burulma momentleri neticesinde oluşan gerilme değerlerinin yüksek olduğu ve oluşan ilk hasarın bu bölgelerde meydana geldiği belirlenmiştir.

### 4.3. Öneriler

Bu çalışma kapsamına alınmayan farklı yüzey pürüzlülükleri ve yüzey işlemlerinin, yapısal birleştirmeler üzerindeki maksimum yük taşıma kapasitelerine etkisi incelenebilir. Ayrıca ileride bu çalışma kapsamında, farklı sıcaklık ve nem koşulları altındaki maksimum yük taşıma kapasitelerinin araştırması da yapılabilir. Birleştirme elemanı olarak kullanılan viskoelastik bantın farklı türleri (yüzey enerji ilgisi, kalınlık değeri, basınca karşı duyarlılığı vb.) tercih edilebilir. Farklı eksantrik veya bileşik yüklemeleri sağlayacak tasarımlar geliştirilebilir ve farklı malzeme modelleme teorileri ile analitik değerlendirmelerde bulunulabilir. Malzeme modellerinin analitik fonksiyonları için farklı alt programlar hazırlanarak, Sonlu Hacimler, Sınır Elemanlar Yöntemi gibi çözüm teknikleri ile kullanımı sağlanabilir. Ayrıca yapısal birleştirme elemanı olarak kullanılan tabakalı kompozitlerin yerine farklı iletken ve/veya yalıtkan malzeme çiftleri kullanılarak elektroaktiflik, biyomekanik gibi benzeri özellikler, farklı şartlandırmalar altında araştırılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Callister, W. D., Rethwisch, D. G., 2011, “Materials Science and Engineering: An Introduction 8<sup>th</sup> ed.”, John Wiley & Sons, U.S.A., 3-14, 570-580, 607-614.
- [2] Bergström, J., 2015, “Mechanics of Solid Polymers Theory and Computational Modeling 1<sup>st</sup> ed.”, *Plastics Design Library, William Andrew is an imprint of Elsevier*, San Diego, CA 92101-4495, USA, 115-125, 131-150, 243-250, 259-263, 320-322, 427-431, 437-444.
- [3] Brinson, H. F., Brinson, L. C., 2015, “Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction 2<sup>nd</sup> ed.” *Wiley, Springer*, New York, 1-6, 78-82, 311-320.
- [4] Marques, S. P. C., Creus, G. J., 2012, “Computational Viscoelasticity”, *Springer*, New York, 1-4, 11-20, 82-84.
- [5] World Plastics Production 1950 –2015. *Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) 2016 / ConsulticMarketing & Industrieberatung GmbH*.
- [6] Plastics – the Facts 2016 An analysis of European plastics production, demand and waste data. *Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) 2016 / ConsulticMarketing & Industrieberatung GmbH*.
- [7] İnternet: Türk Plastik Sanayicileri Araştırma, Geliştirme ve Eğitim Vakfı, 2016, “Pagev Dünya Ve Türkiye Sektör İzleme Raporu-2016”  
<https://www.pagev.org/dunya-ve-turkiye-sektor-izleme-raporu-2016-mayis-57862a85704da>  
(Erişim tarihi:10.02.2017)
- [8] Bergström, J. S., Boyce, M. C., 1998, “Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers”, *J. Mech. Phys. Solids*, 46: 931–954.
- [9] Johlitz, M., Steeb, H., Diebels, S., Chatzouridou, A., Batal, J., Possart, W., 2007, “Experimental and theoretical investigation of nonlinear viscoelastic polyurethane systems”, *J. Mater. Sci.*, 42: 9894–9904.
- [10] Miehe, C., Göktepe, S., Lulei, F., 2004, “A micro-macro approach to rubber-like materials-part I: the non-affine micro-sphere model of rubber elasticity”, *J. Mech. Phys. Solids*, 52: 2617-2660.
- [11] Ask, A., Menzel, A., Ristinma, M., 2012, “Phenomenological modelling of viscous electrostrictive polymers”, *Int. J. Non-Linear Mech.*, 47: 156-165.
- [12] Vu, D. K., Steinmann, P., Possart, G., 2007, “Numerical modelling of non-linear electroelasticity”, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 70: 685-704.
- [13] Vu, D. K., Steinmann, P., 2010, “A 2-D coupled BEM-FEM simulation of electroelastostatics at large strain”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 199: 1124-1133.
- [14] Büschel, A., Klinkel, S., Wagner, W., 2011, “A viscoelastic model for dielectric elastomers based on a continuum mechanical formulation and its finite element implementation”,

*Proceedings SPIE 7976 Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, San Diego, California, United States.

- [15] Hossain, M., Vu, D.K., Steinmann P., 2012, “Experimental study and numerical modelling of VHB 4910 polymer”, *Computational Materials Science* 59: 65-74.
- [16] Kaliske, M., Rothert, H., 1997, “Formulation and implementation of three-dimensional viscoelasticity at small and finite strains”, *Comput. Mech.*, 19: 228-239.
- [17] Nandi, B., Dalrymple, T., Yao, J., Lapczyk, I., 2014, “Importance of capturing non-linear viscoelastic material behavior in tire rolling simulations”, *Dassault Systèmes Simulia Corp. Meeting of the Tire Society*, Providence, RI 02909, U.S.A.
- [18] Wissler, M., Mazza, E., 2007, “Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuators”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 134 (2): 494-504.
- [19] Vandembroucke, A., Laurent, H., Hocine, N. A., Rio, G., 2010, “A hyperelasto-visco-hysteresis model for an elastomeric behaviour: experimental and numerical investigations”, *Comput. Mater. Sci.*, 48: 495-503.
- [20] Amin, A. F. M. S., Lion, A., Sekita, S., Okui, Y., 2006, “Nonlinear dependence of viscosity in modeling the rate-dependent response of natural and high damping rubbers in compression and shear: experimental identification and numerical verification”, *Int. J. Plast.*, 22: 1610-1667.
- [21] Johlitz, M., Steeb, H., Diebels, S., Chatzouridou, A., Batal, J., Possart, W., 2007, “Experimental and theoretical investigation of nonlinear viscoelastic polyurethane systems”, *J. Mater. Sci.*, 42: 9894-9904.
- [22] Lion, A., 1997, “A physically based method to represent the thermo-mechanical behaviour of elastomers”, *Acta Mech.*, 123: 1–25.
- [23] Wissler, M., Mazza, E., 2015, “Modelling and simulation of dielectric elastomer actuators”, *Smart Mater. Struct.*, 14: 1396-1402.
- [24] Mars, W. V., Fatemi, A., 2004, “A novel specimen for investigating mechanical behavior of elastomers under multiaxial loading conditions”, *Experimental Mechanics* 44: 136-146.
- [25] Qi, H. J., Boyce, M. C., 2004, “Constitutive model for stretch-induced softening of the stress-strain behavior of elastomeric materials”, *Journal Mech. Physics Solids*, 52: 2187-2205.
- [26] Bergström, J. S., Rimnac, C. M., Kurtz, S. M., 2004, “An augmented hybrid constitutive model for simulation of unloading and cyclic loading behavior of conventional and highly crosslinked UHMWPE”, *Biomaterials*, 25: 2171-2178.
- [27] Yeoh, O. H., 1993, “Some forms of the strain energy function for rubber”, *Rubber Chem. Technol.*, 66: 754-771.

- [28] Lapczyk, I., Hurtado, J. A., Govindarajan, S. M., 2013, "Parallel Rheological Framework to model elastomers and Polymers", *Dassault Systèmes Simulia Corp. Meeting of the Tire Society*, Providence, RI 02909, U.S.A.
- [29] Internet : PolymerFEM, Modelling and Simulation, Versty Engineering, 2005, Bergström, J. S., "Constitutive modeling of elastomers-accuracy of predictions and numerical efficiency", [https://polymerfem.com/polymer\\_files/Elastomer\\_Modeling\\_Comparison.pdf](https://polymerfem.com/polymer_files/Elastomer_Modeling_Comparison.pdf) (Erişim Tarihi 21.01.2016).
- [30] Peng, Z. L., Chen, S. H., Soh, A. K., 2010, "Peeling behavior of a bio-inspired nano-film on a substrate", *International Journal of Solids and Structures*, 47: 1952–1960.
- [31] Takahashi, K., Shimizu, M., Inaba, K., Kishimoto, K., Inao, Y., Sugizaki, T., 2013, "Tack performance of pressure-sensitive adhesive tapes under tensile loading", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 45: 90-97.
- [32] Liu, Z., Huang, Y. A., Yin, Z., Bennati, S., Valvo, P. S., 2014, "A general solution for the two-dimensional stress analysis of balanced and unbalanced adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 54: 112-123.
- [33] Li, B., Chen, H., Zhou, J., 2013, "Electromechanical stability of dielectric elastomer composites with enhanced permittivity", *Composites: Part A*, 52: 55-61.
- [34] Rajagopal, K. R., Saccomandi, G., 2007, "On the dynamics of non-linear viscoelastic solids with material moduli that depend upon pressure", *International Journal of Engineering Science*, 45: 41–54.
- [35] Townsend, B. W., Ohanehi, D. C., Dillard, D. A., Austin, S. R., Salmon, F., Gagnon, D. R., 2011, "Characterizing acrylic foam pressure sensitive adhesive tapes for structural glazing applications-Part I: DMA and ramp-to-fail results", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31: 639-649.
- [36] Townsend, B. W., Ohanehi, D. C., Dillard, D. A., Austin, S. R., Salmon, F., Gagnon, D. R., 2011, "Characterizing acrylic foam pressure sensitive adhesive tapes for structural glazing applications-Part II: Creep rupture results", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31: 650-659.
- [37] Bakioğlu, M., "Cisimlerin Mukavemeti 1. Baskı", 2001, *Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.*, İstanbul, 77-82, 85-87, 106-112.
- [38] Reddy, J. N., "An introduction to continuum mechanics 2<sup>nd</sup> ed.", 2013, *Cambridge University Press*, New York, 1-4, 221-224.
- [39] PolyUMod Version 4.2.0 manual, A library of advanced user materials, Veryst Engineering, 80-85, 100-104.
- [40] Rubinstein, R. Y., Kroese, D. P., "Simulation and the Monte Carlo Method 3<sup>rd</sup> ed.", 2016, *Wiley*, New York, 49-55, 91-97.



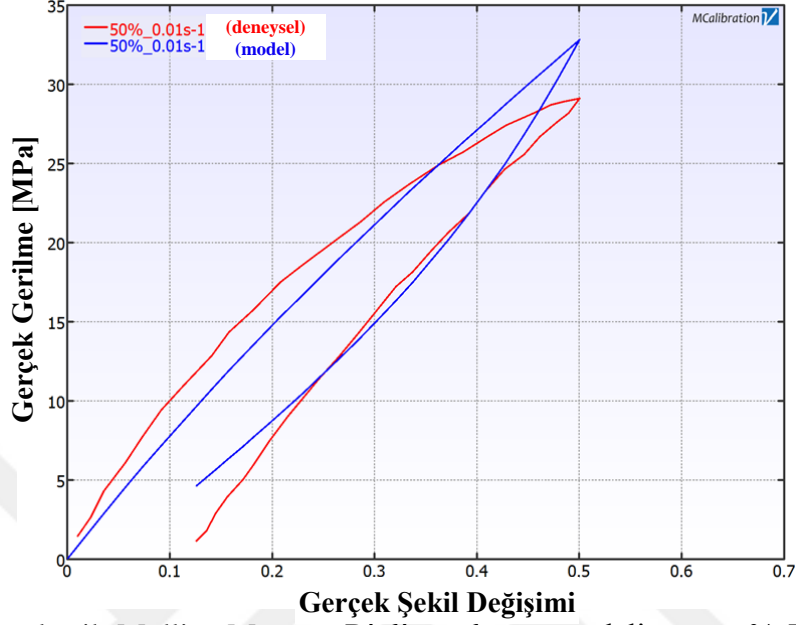
- [41] Robert, C. P., Casella, G., “Monte Carlo Statistical Methods 1<sup>st</sup> ed”, 2005, *Springer*, New York, 157-164.
- [42] Nelder, J. A., Mead, R., 1965, “A simplex method for function minimization”, *Computer J.*, 7: 308-313.
- [43] Bathe, K. J., “Finite Element Procedures in Engineering Analysis”, 1996, *Prentice-Hall Inc Englewood Cliffs*, New Jersey, 36-48.
- [44] Crisfield, M. A., “Non-linear finite element analysis of solids and structures vol. 1”, 2003, *John Wiley & Sons*, West Sussex, 56-62.
- [45] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., “Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics”, 2005, *Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill*, Oxford, 26-32.
- [46] Barbero, E. J., “Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus<sup>TM</sup>”, 2013, *CRC Press Taylor&Francis Group, LLC*, 35-43, 249-269.
- [47] Barbero, E. J., “Finite Element Analysis of Composite Materials”, 2008, *CRC Press Taylor&Francis Group, LLC*, 35-50, 169-185.
- [48] ASTM D575, Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression, 2001.
- [49] ASTM D2990, Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics, 2001.
- [50] ASTM D412, Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension, 2002.
- [51] ASTM D638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2003.
- [52] ASTM D256, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2004
- [53] ISO 180, Plastics—Determination of Izod Impact Strength, 2000.
- [54] ASTM D6110, Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics, 2004.
- [55] ISO179, Plastics—Determination of Charpy Impact Properties—Part 1: Non-Instrumented Impact Test, 2000.
- [56] ASTM D4065, Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures, 2001.
- [57] ISO 6721, Plastics—Determination of Dynamic Mechanical Properties, 1994.
- [58] ASTM D785, Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.

- [59] ASTM D2240, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, 2004
- [60] ASTM D2583, Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor, 2001
- [61] Chen, W. W., Song, B., “Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing, and Applications”, 2010, *Springer*, New York, 88-94.
- [62] ASTM F2183, Standard Test Method for Small Punch Testing of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Used in Surgical Implants, 2002.
- [63] ASTM D5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notch Beam Method, 2012.
- [64] ASTM D150-11, Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [65] ASTM D140 / D140M-16, Standard Practice for Sampling Asphalt Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [66] ASTM D257-14, Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [67] ASTM F1249-13, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [68] ASTM D3654 / D3654M-06(2011), Standard Test Methods for Shear Adhesion of Pressure-Sensitive Tapes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [69] ASTM D3330 / D3330M-04(2010), Standard Test Method for Peel Adhesion of Pressure-Sensitive Tape, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [70] ASTM D897-08(2016), Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [71] ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [72] ASTM D3039 / D3039M-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [73] ASTM D3410 / D3410M-16, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016

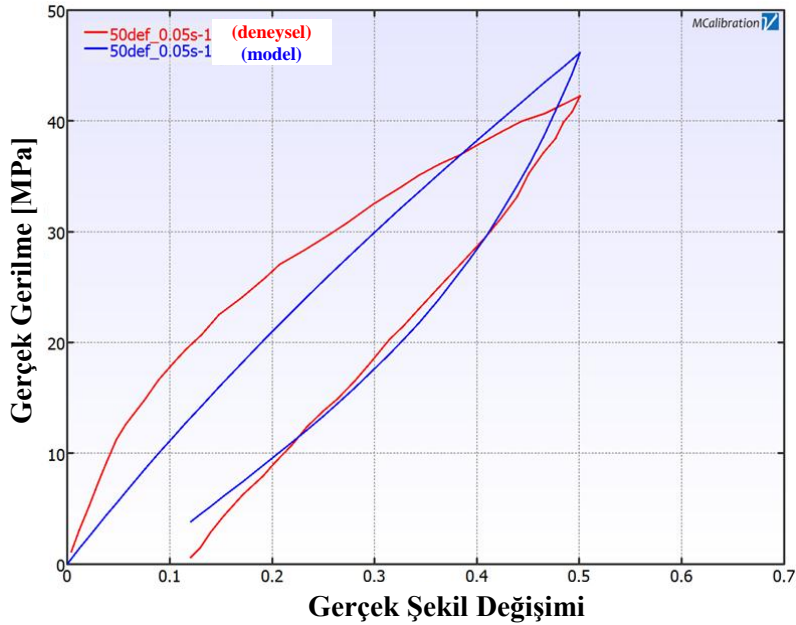
- [74] ASTM D3518 / D3518M-13, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [75] Jones, R. M., “Mechanics of Composite Material”, 1999, *Taylor&Francis Inc.*, Philadelphia, 519-520.
- [76] TS 1177 EN ISO 11722, Tekstil-Cam Takviyeli Plâstikler-Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminantlar-Tekstil-Cam ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini-Kalsinasyon Metotları, 2004.
- [77] 3M™ VHB™ Tapes Technical Data Sheet - October 2014.
- [78] Gutierrez-Lemini D., “Engineering Viscoelasticity”, 2014, *Springer Science+Business Media*, New York, 113-145.
- [79] Hurtado J. A., Lapczyk I., Govindarajan S. M., 2013, “Parallel rheological framework to model non-linear viscoelasticity, permanent set, and Mullins effect in elastomers” *Proceedings of the 8<sup>th</sup> European conference on constitutive models for rubbers*, San Sebastián, Spain, ECCMR VIII 95-100, Taylor & Francis Group, London, U.K.
- [80] 3M™ VHB™ Tapes IATDS Basic Training - 2015.
- [81] İnternet: Birleşik Devletler Ulaştırma Bakanlığı El Kitapları & Uygulama Yönergeleri (U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe, Volume 1, Ch. 1, 2012, FAA-H-8083-31) [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch01.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch01.pdf)  
(Erişim tarihi:18.09.2017)

## 6. EKLER

### 6.1. EK-1 Farklı Deformasyon-Şekil Değişirme Hızları Altında Gerilme-Şekil Değişirme Davranışlarının Deneysel ve Analitik Olarak Karşılaştırılmaları

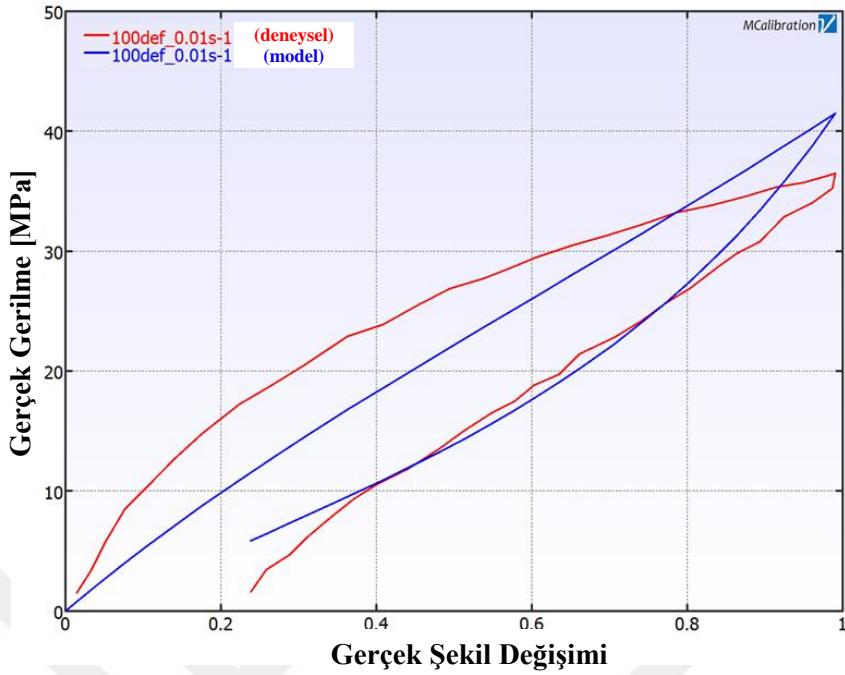


Şekil 6.1 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

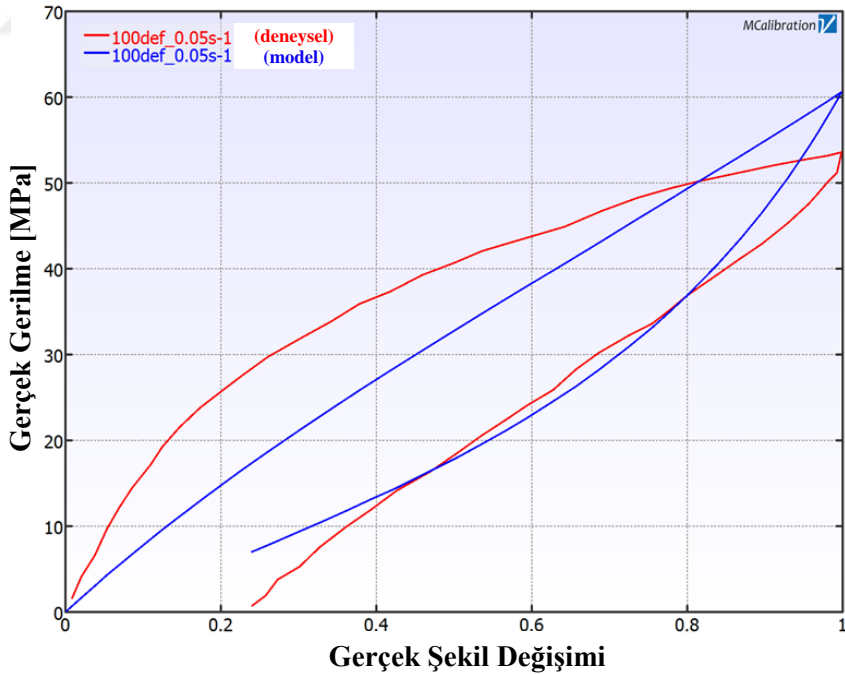


Şekil 6.2 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

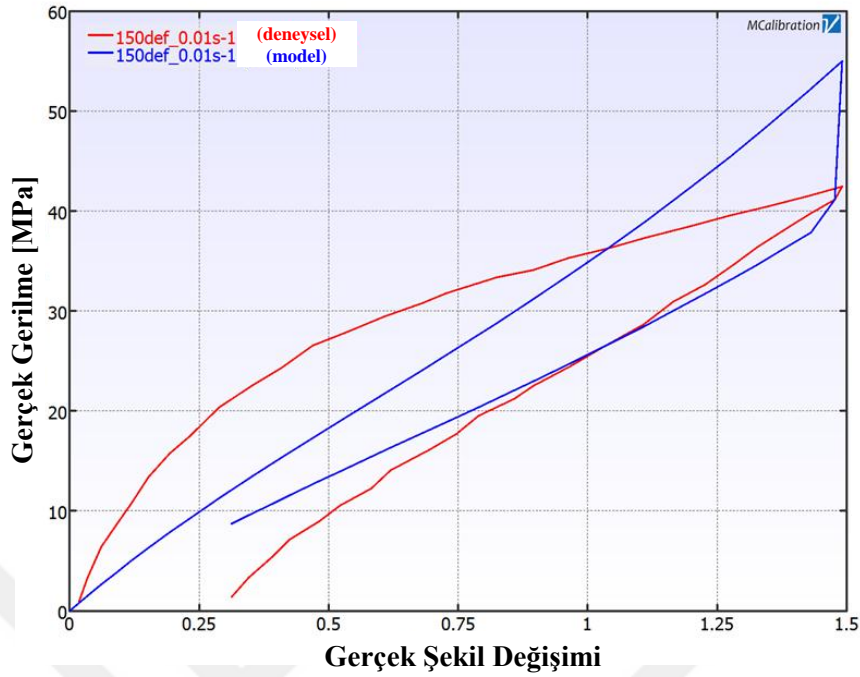


Şekil 6.3 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

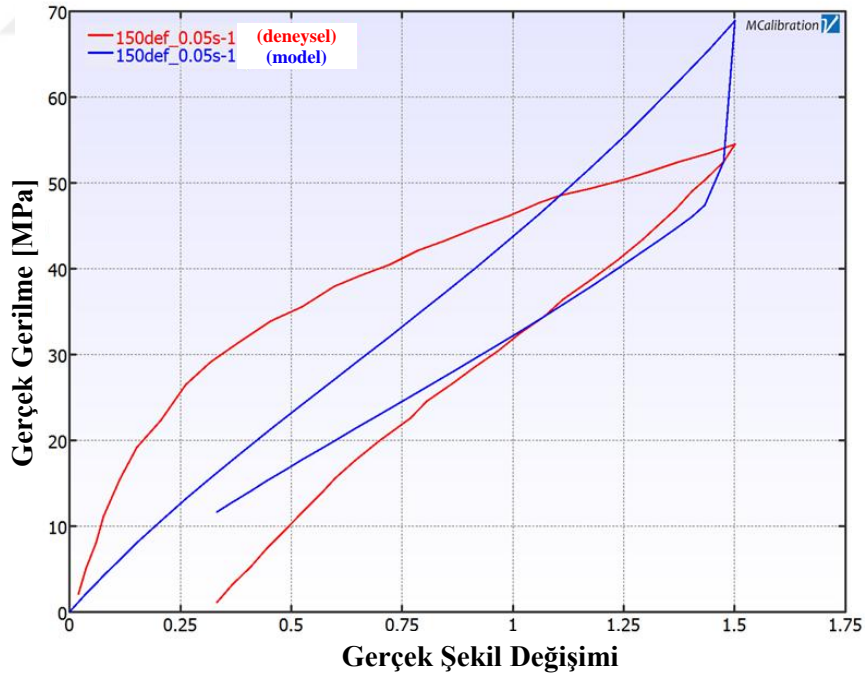


Şekil 6.4 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

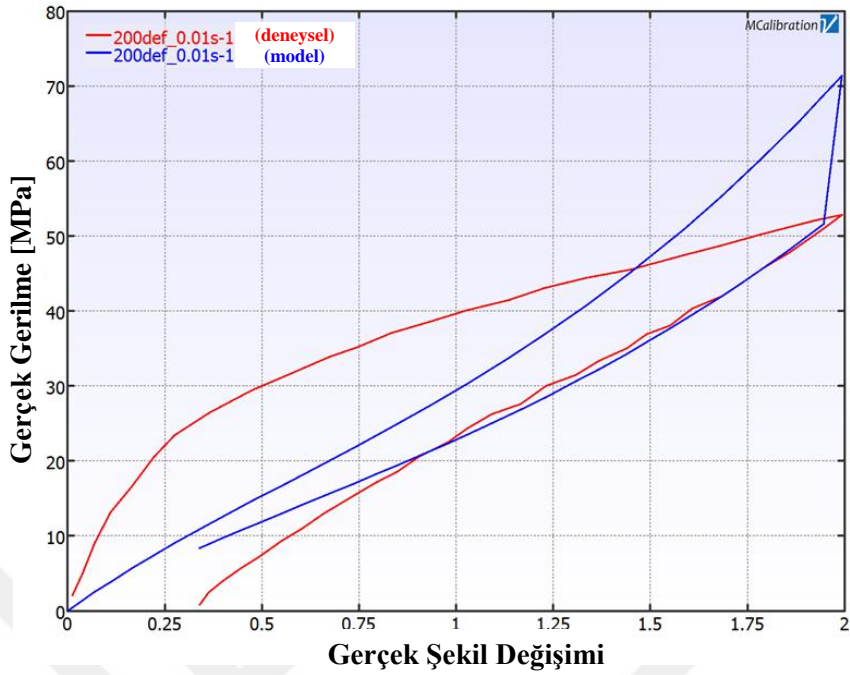


Şekil 6.5 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.6 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

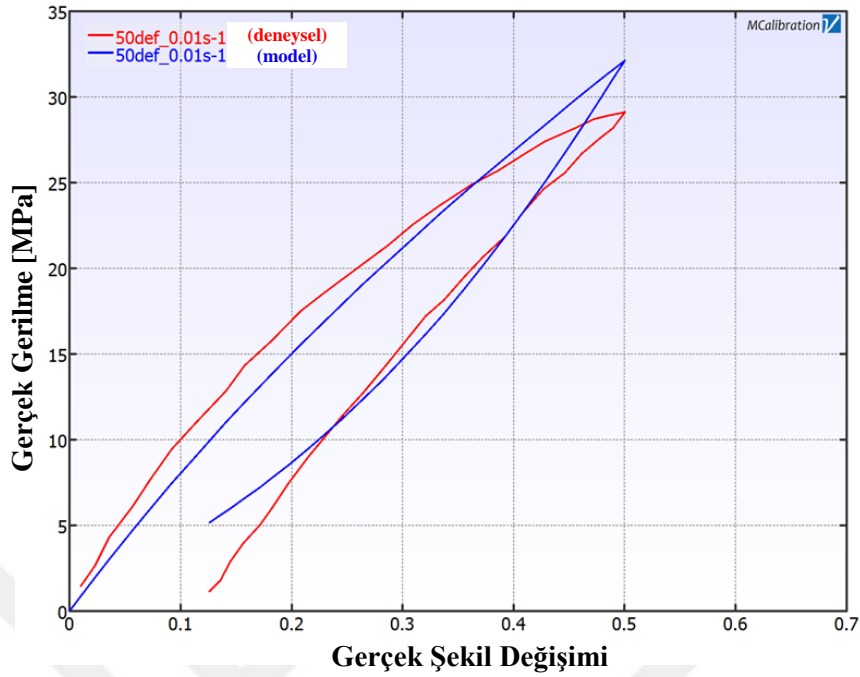


Şekil 6.7 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

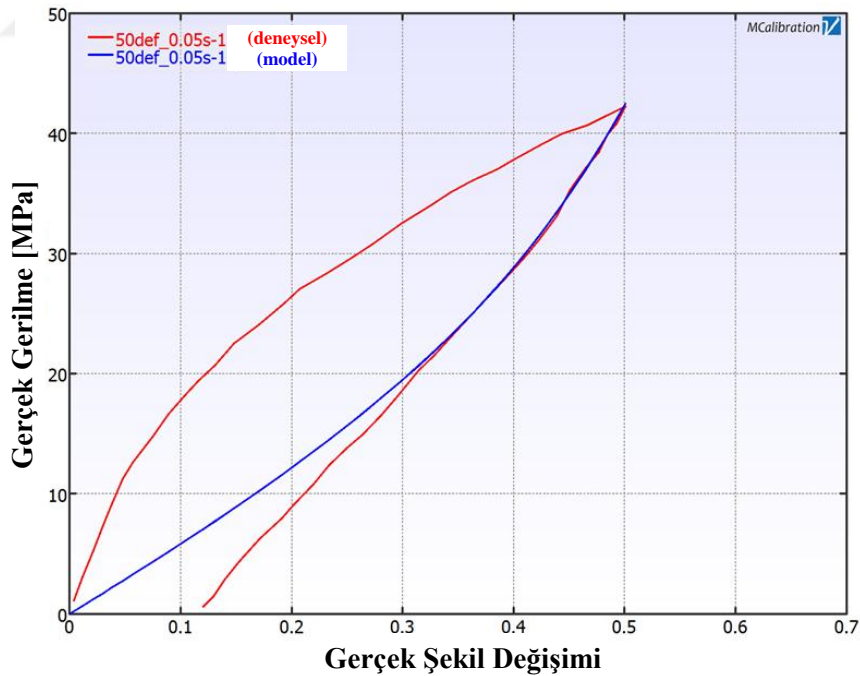


Şekil 6.8 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



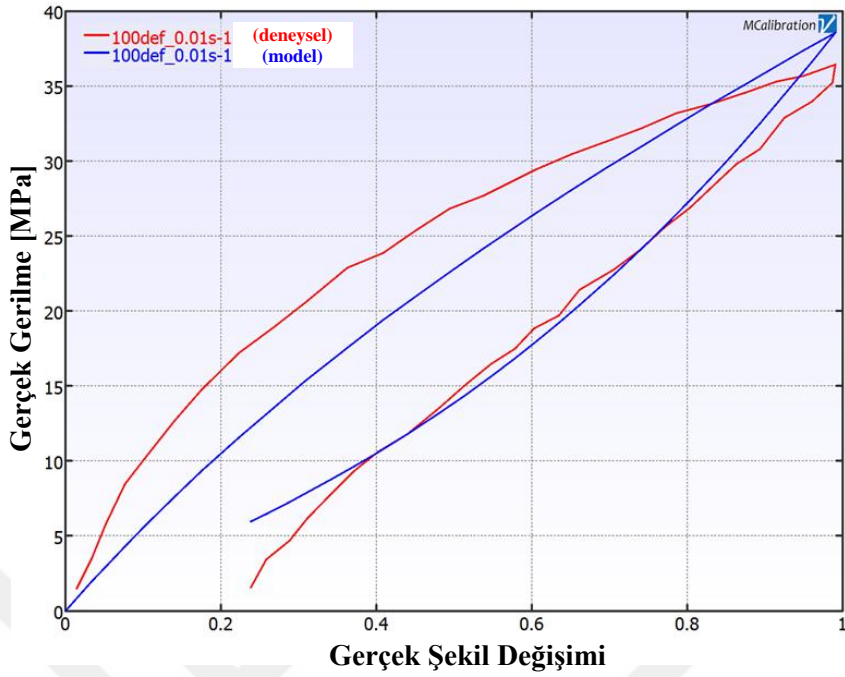
Şekil 6.9 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 50 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



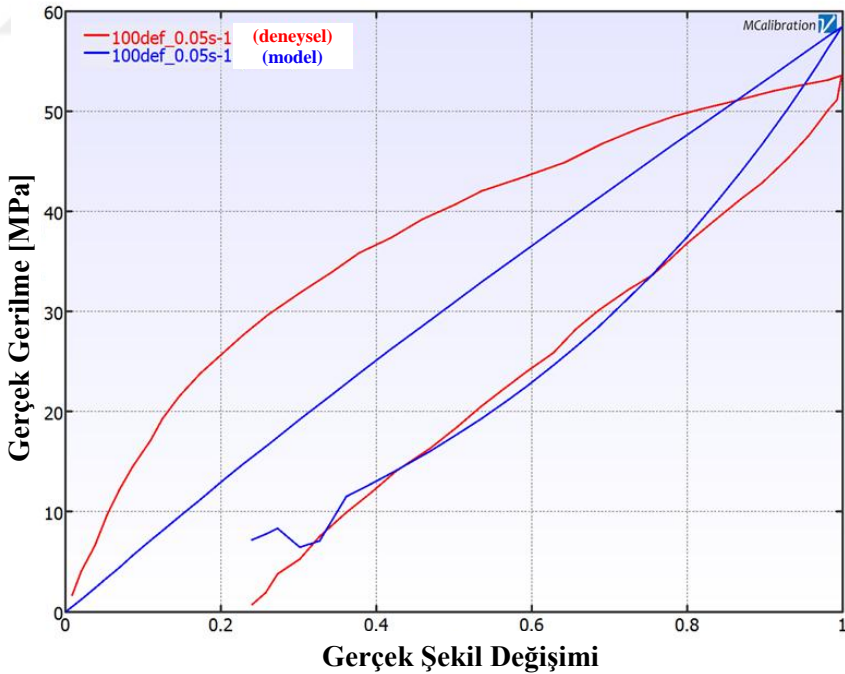
Şekil 6.10 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 50 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



EK-1 (Devam)

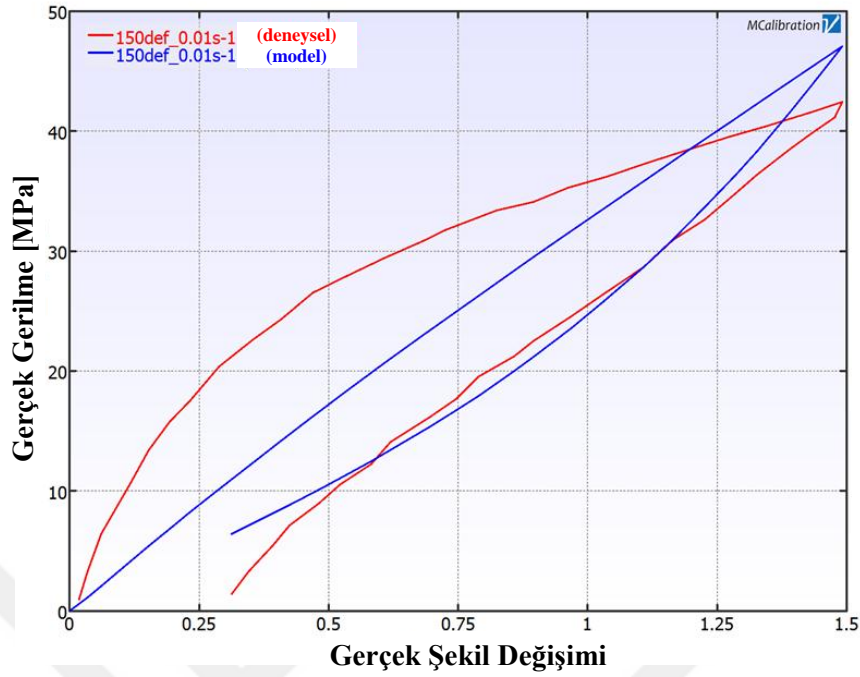


Şekil 6.11 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 100 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

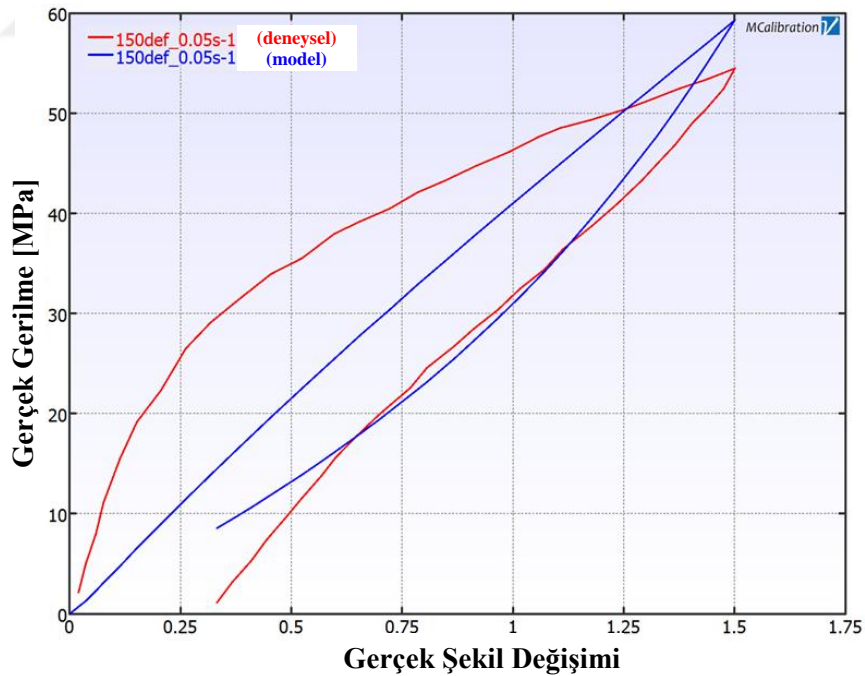


Şekil 6.12 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 100 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

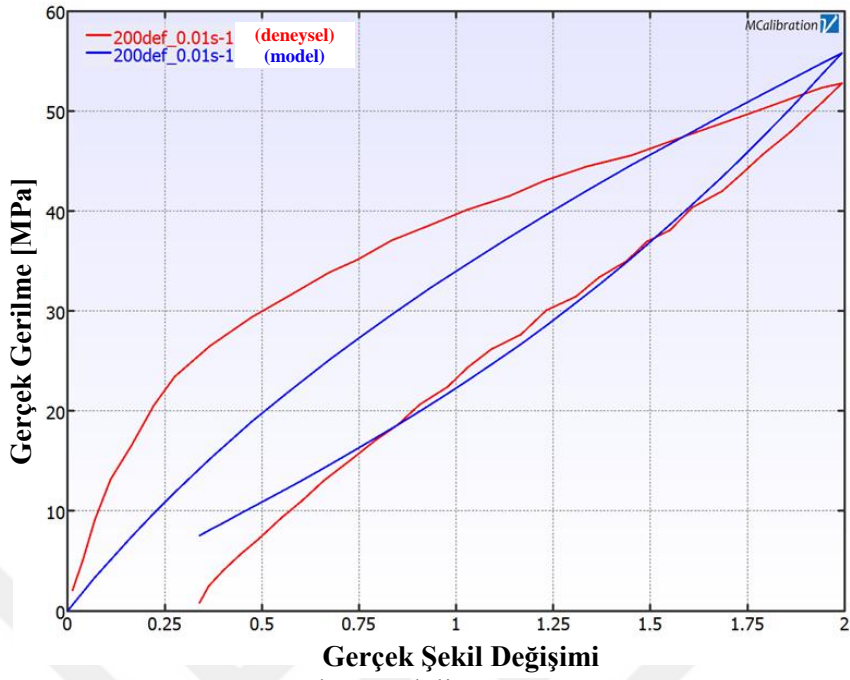


Şekil 6.13 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.14 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

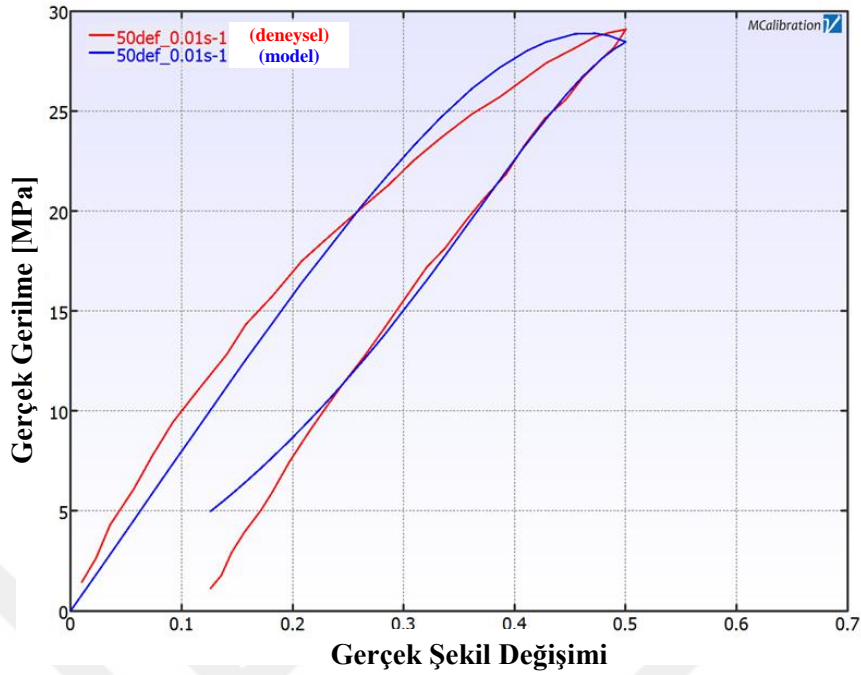


Şekil 6.15 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

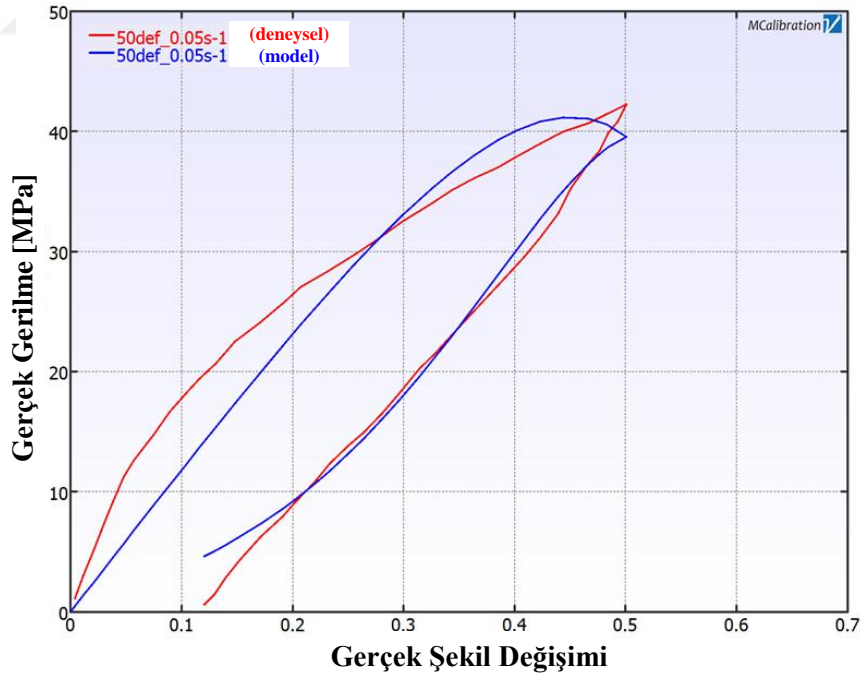


Şekil 6.16 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

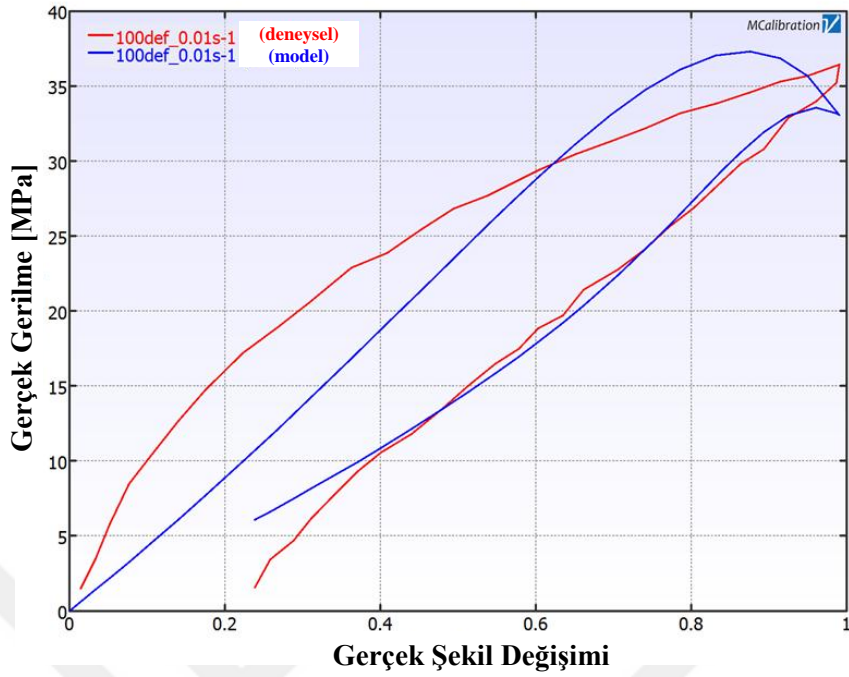


Şekil 6.17 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 50 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

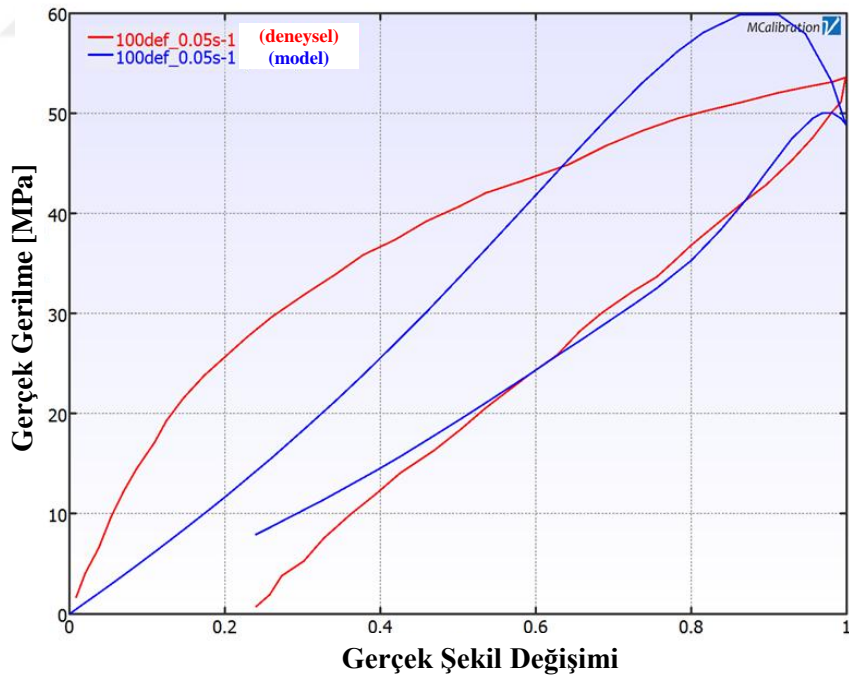


Şekil 6.18 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 50 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.19 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

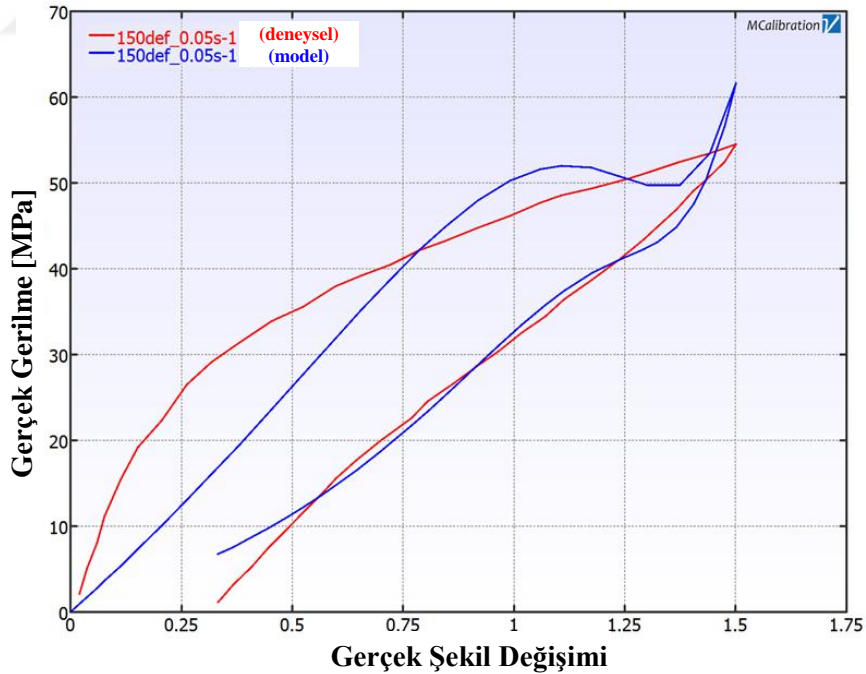


Şekil 6.20 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

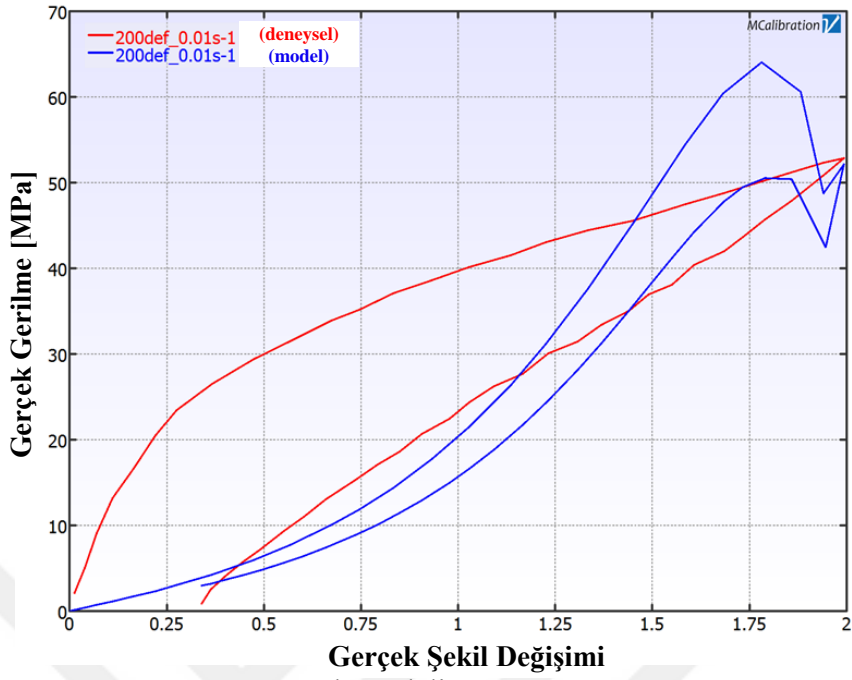


Şekil 6.21 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

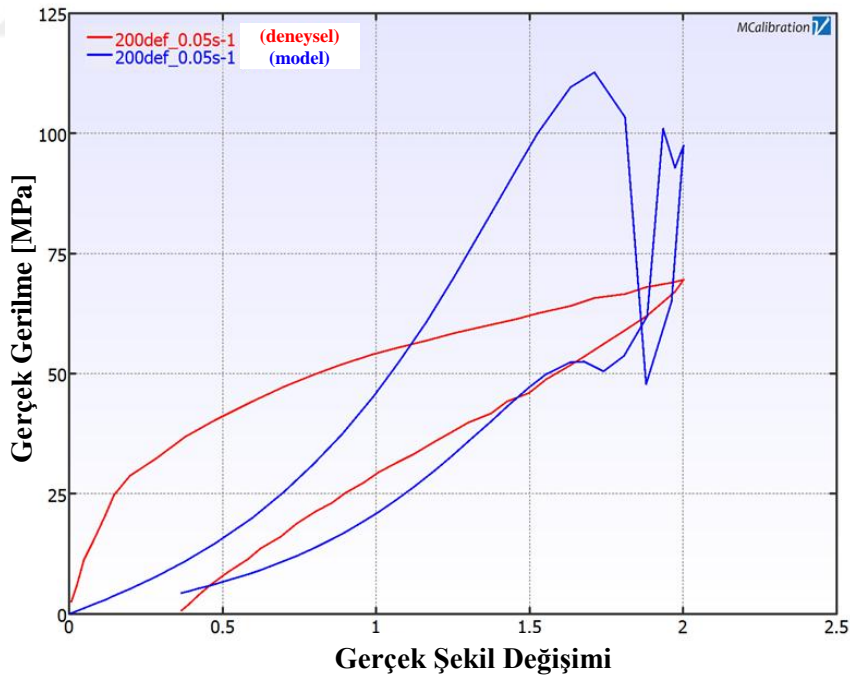


Şekil 6.22 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

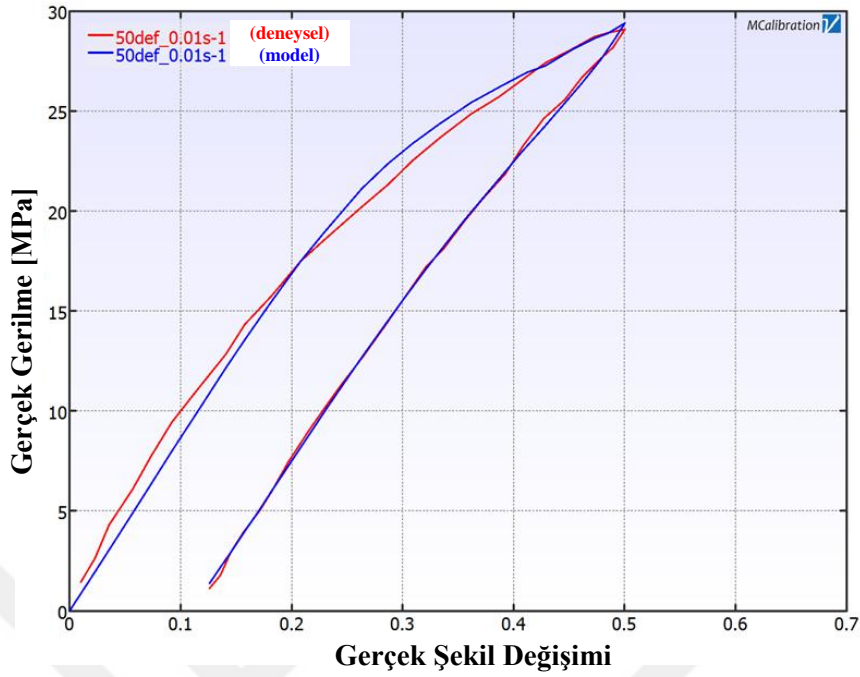


Şekil 6.23 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 200 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

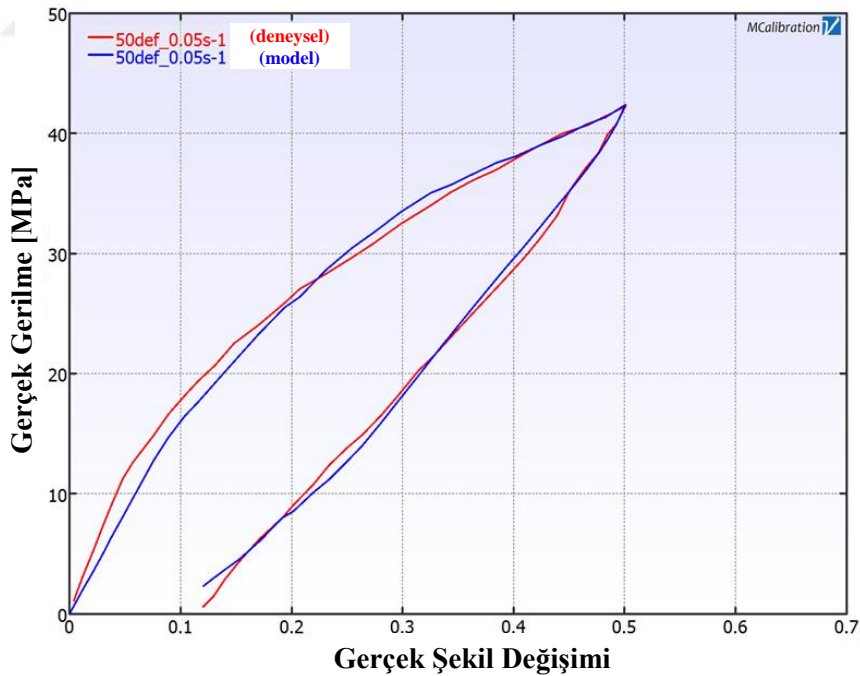


Şekil 6.24 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeline göre % 200 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.25 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



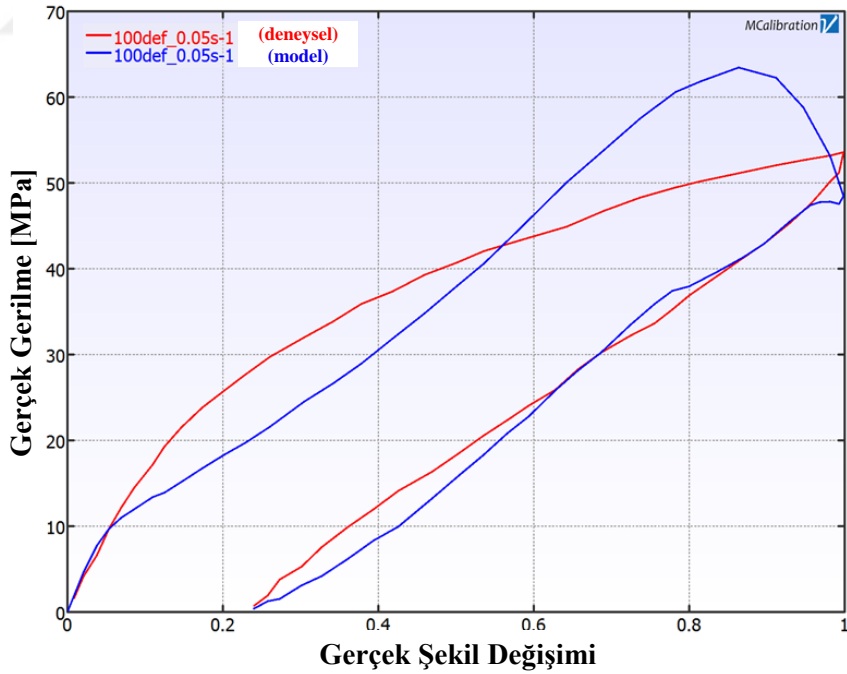
Şekil 6.26 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



EK-1 (Devam)

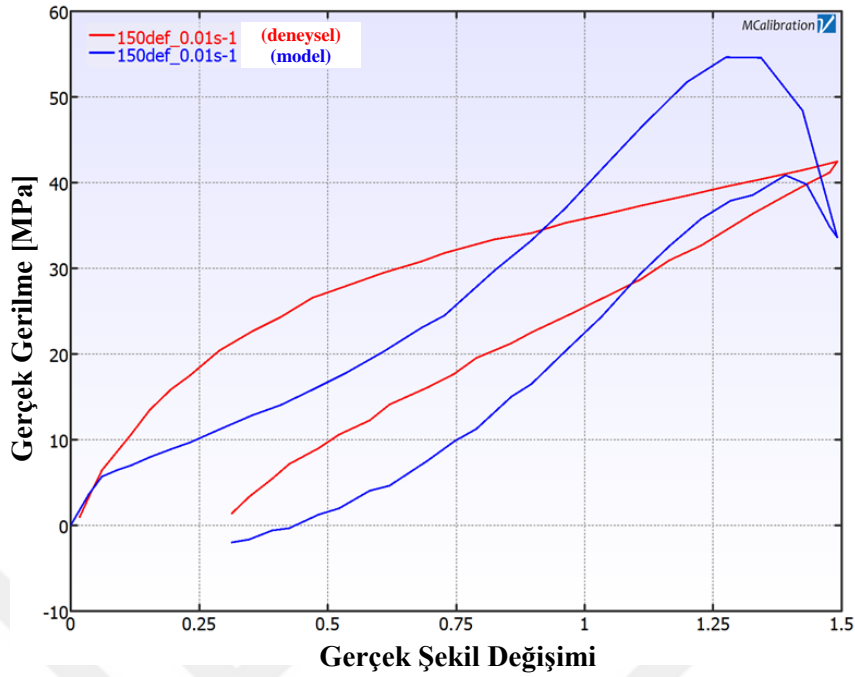


Şekil 6.27 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

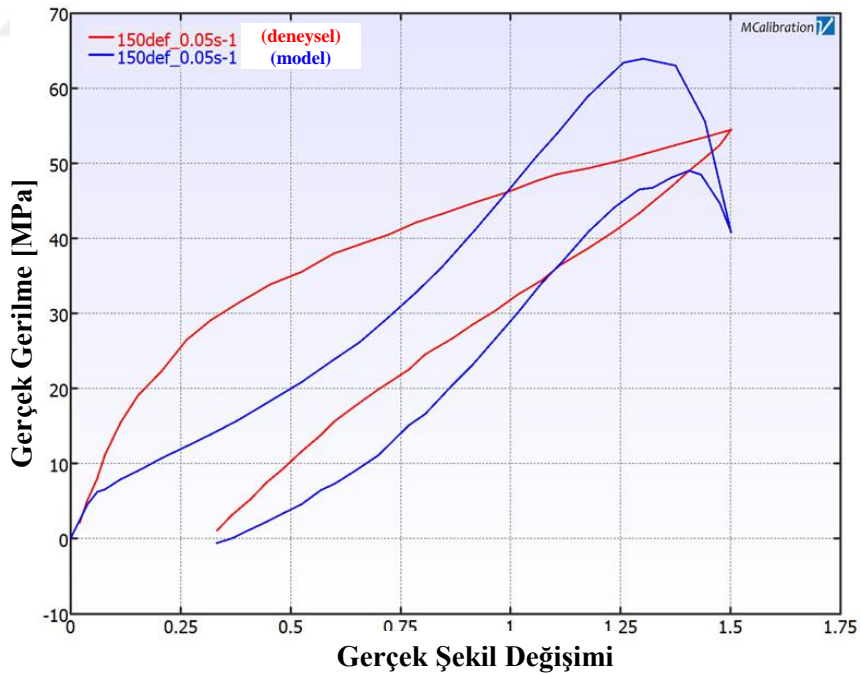


Şekil 6.28 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

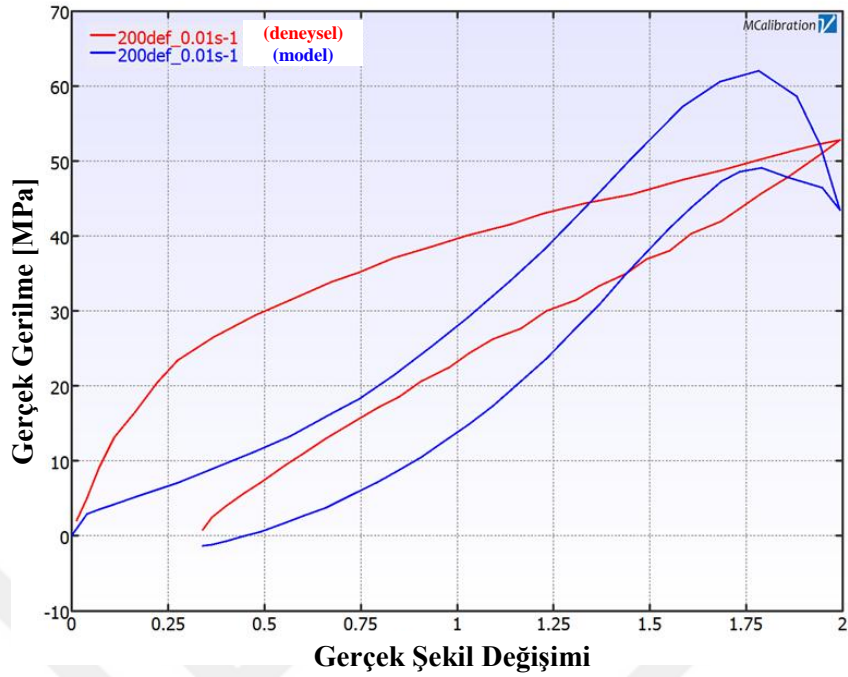


Şekil 6.29 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.30 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

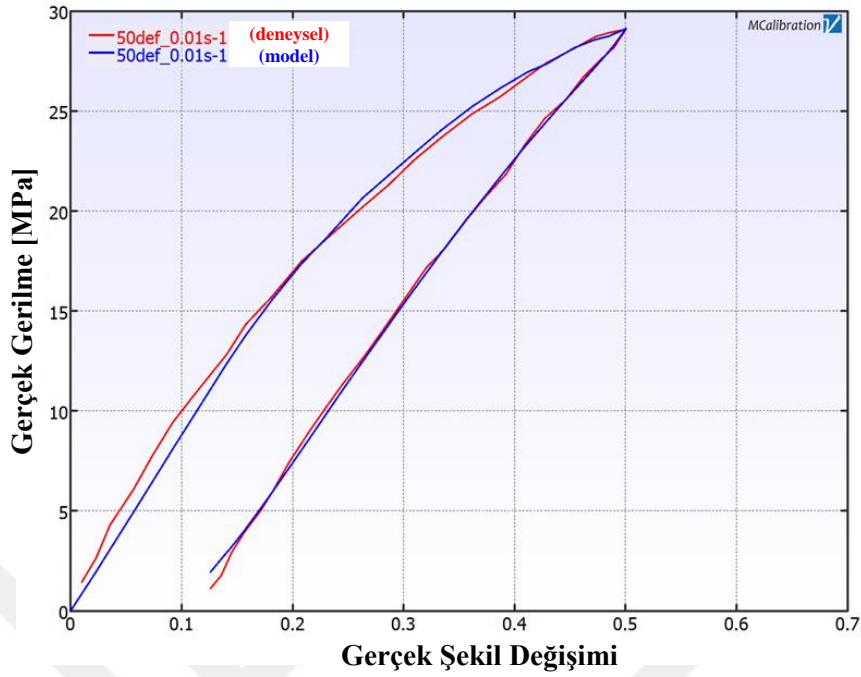


Şekil 6.31 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

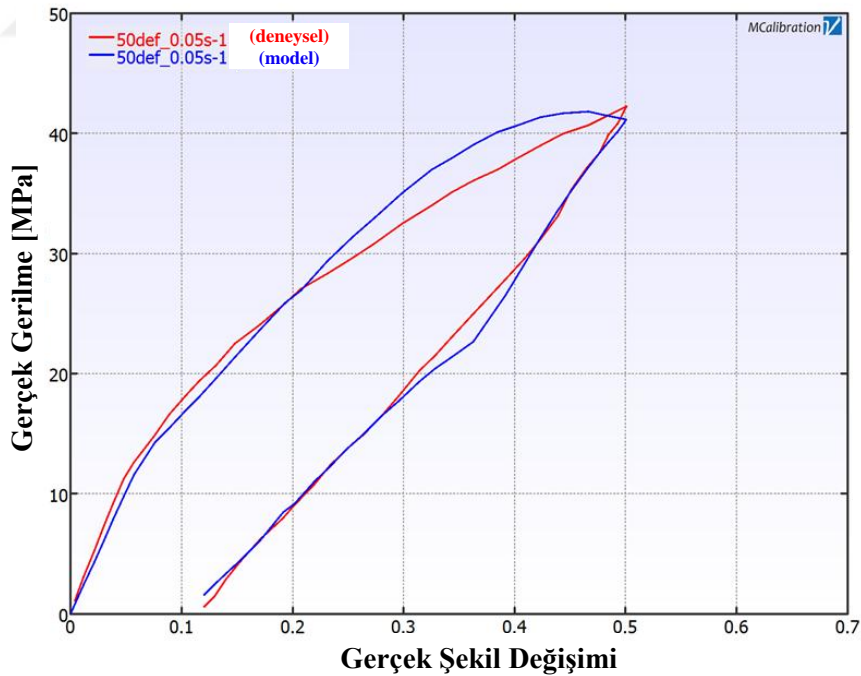


Şekil 6.32 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.33 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

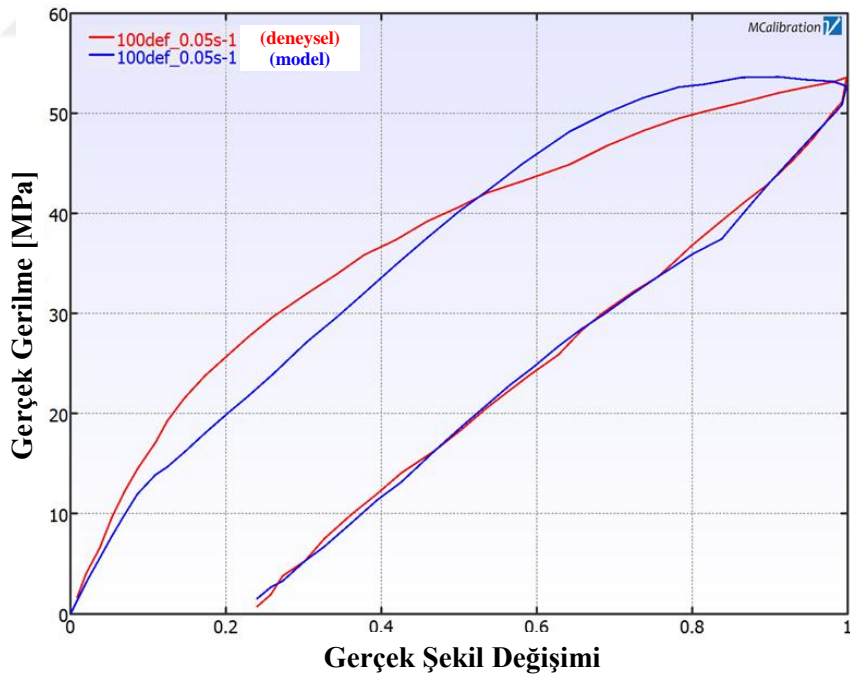


Şekil 6.34 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

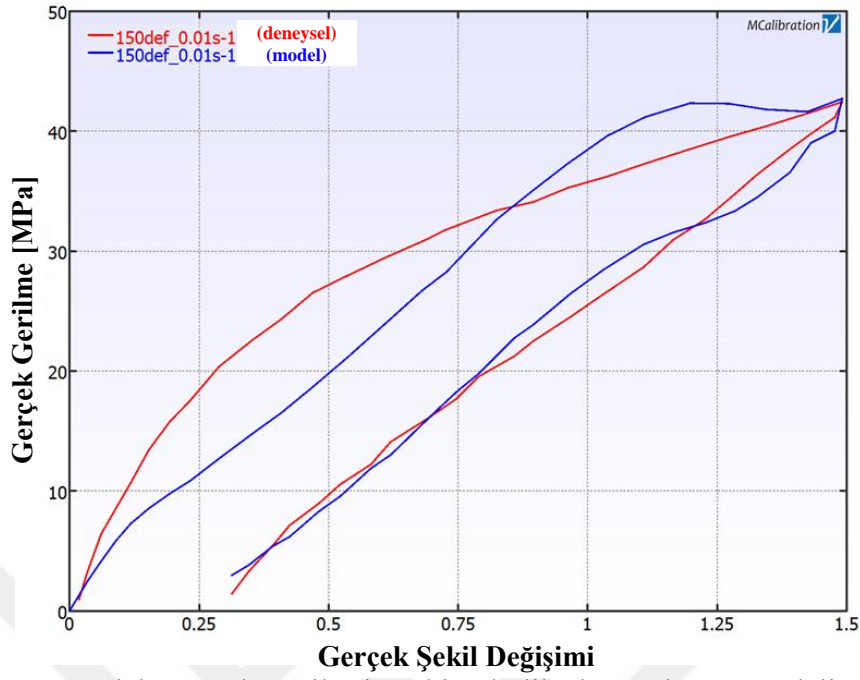


Şekil 6.35 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

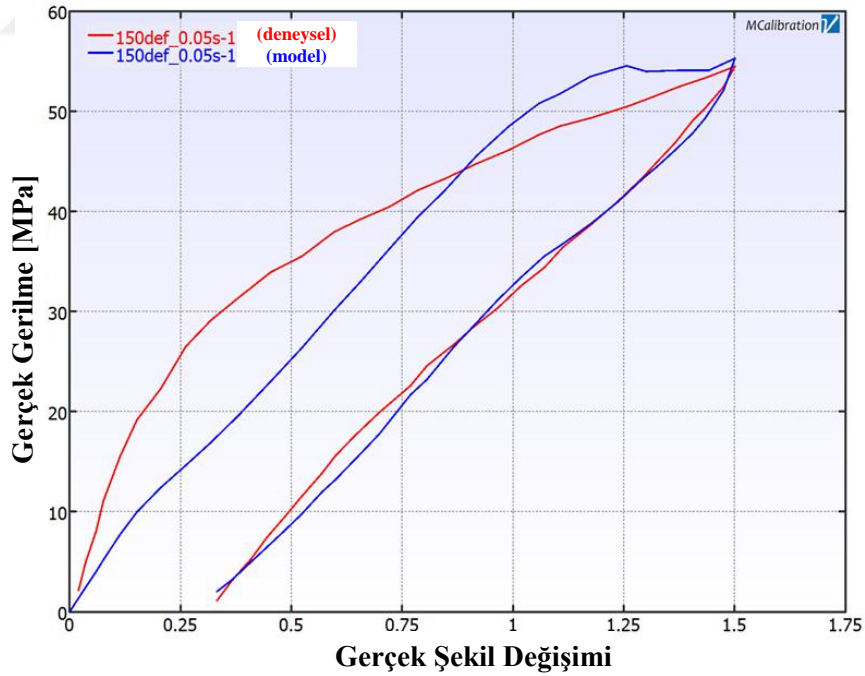


Şekil 6.36 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.37 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.38 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

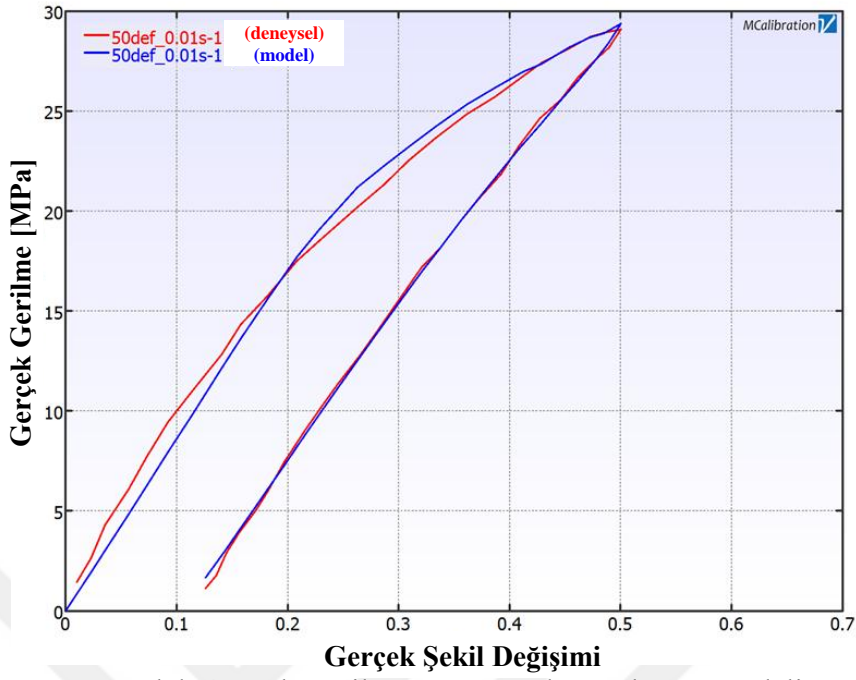


Şekil 6.39 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

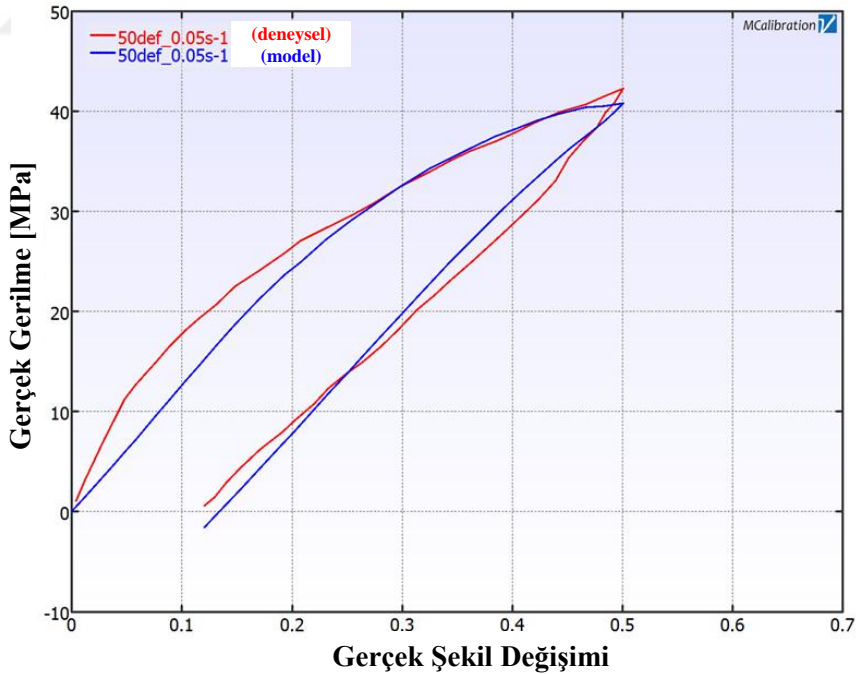


Şekil 6.40 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.41 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



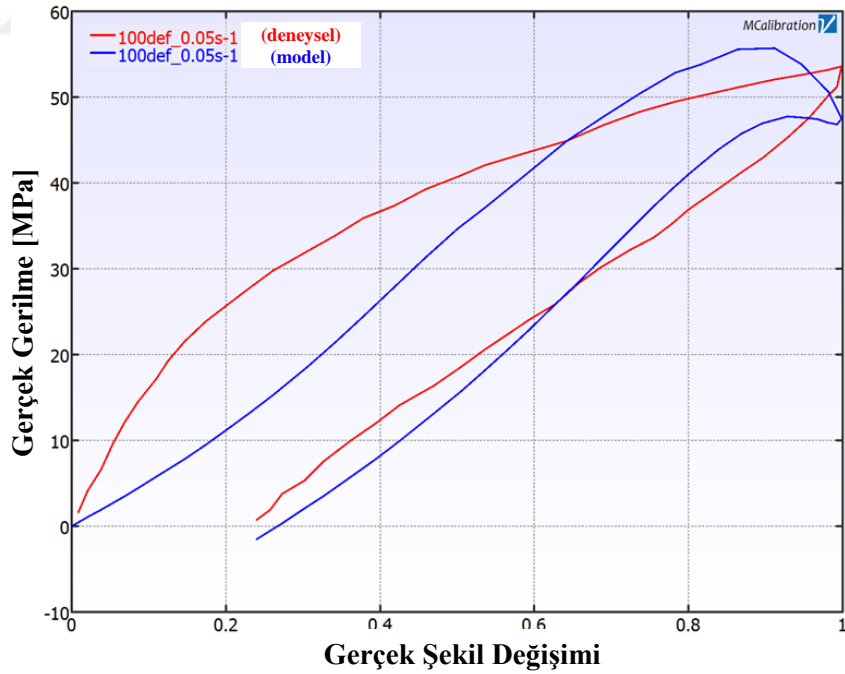
Şekil 6.42 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



EK-1 (Devam)

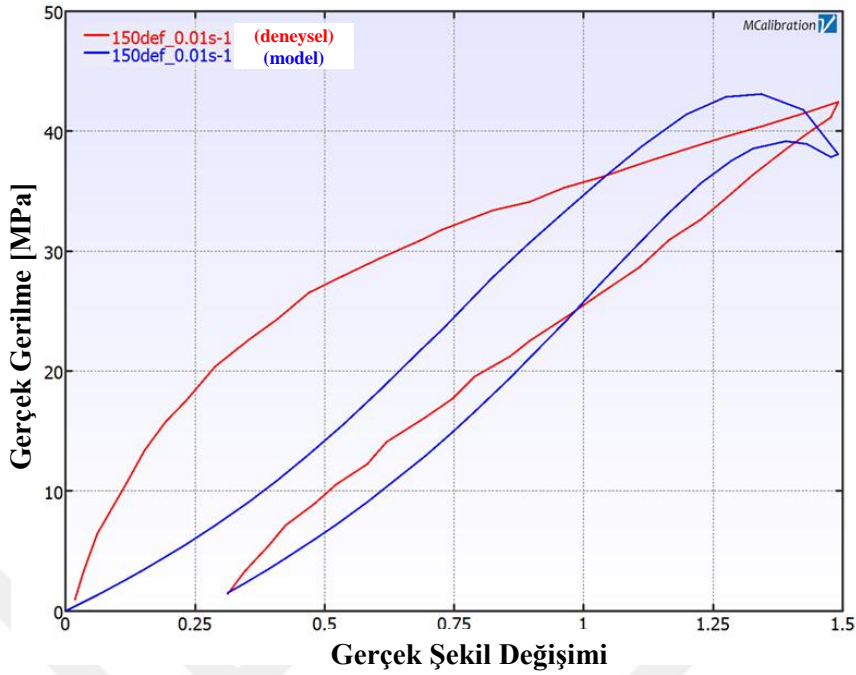


Şekil 6.43 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

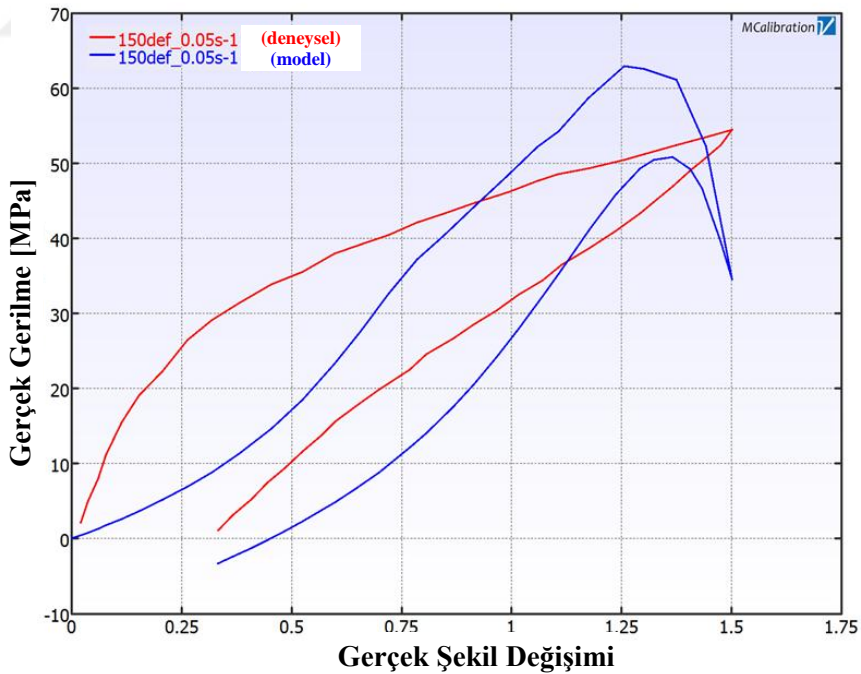


Şekil 6.44 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.45 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

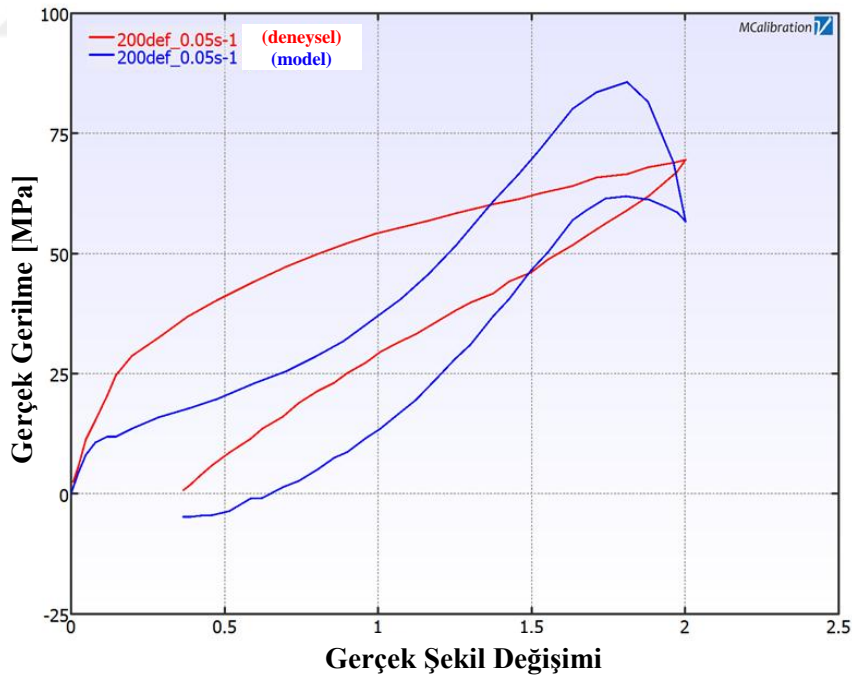


Şekil 6.46 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

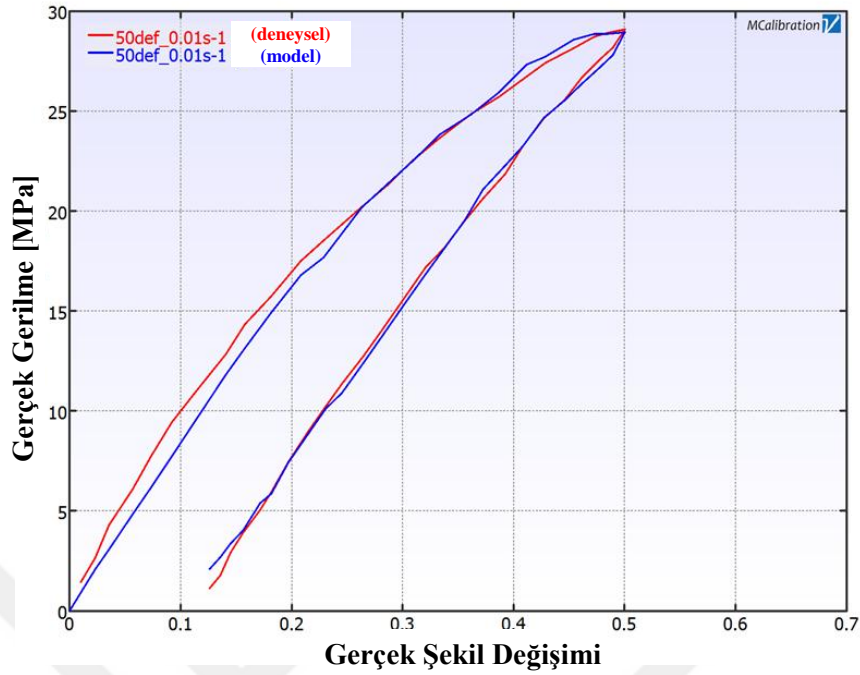


Şekil 6.47 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

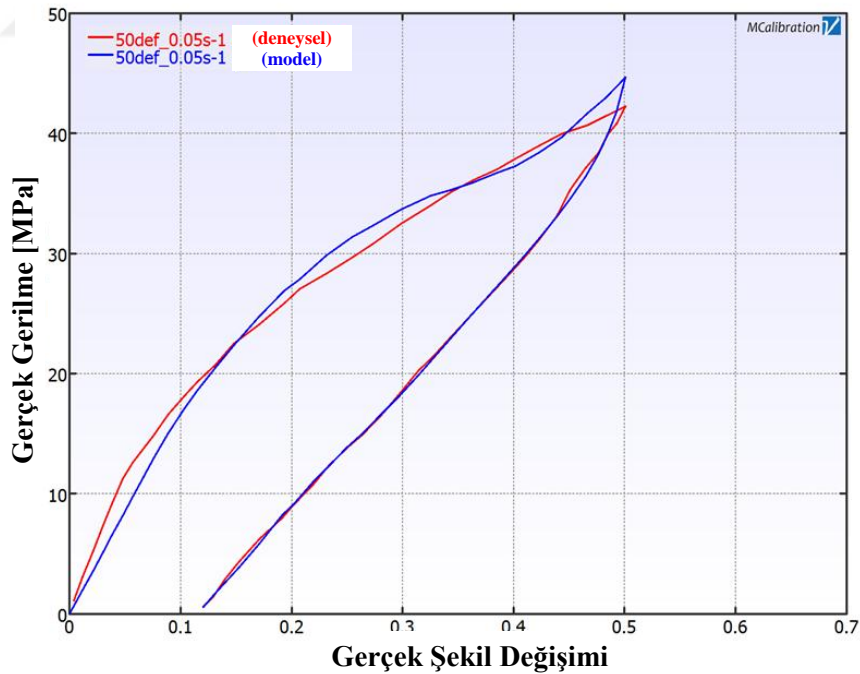


Şekil 6.48 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

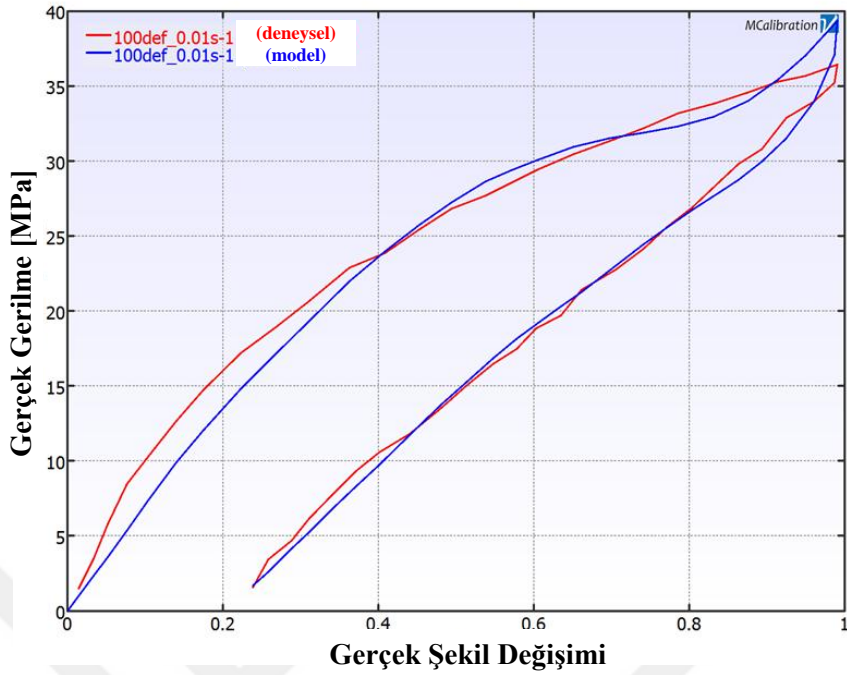


Şekil 6.49 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

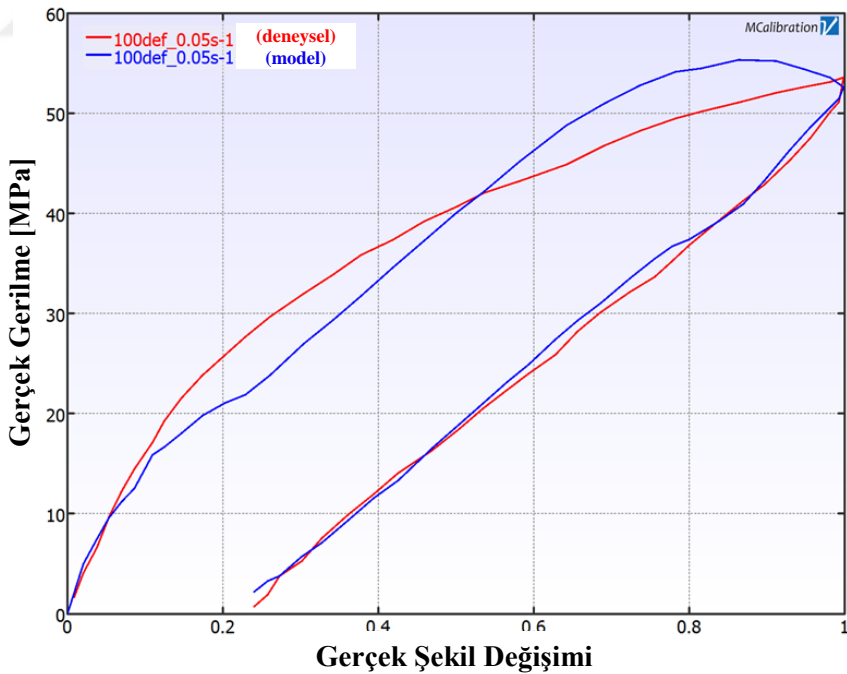


Şekil 6.50 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

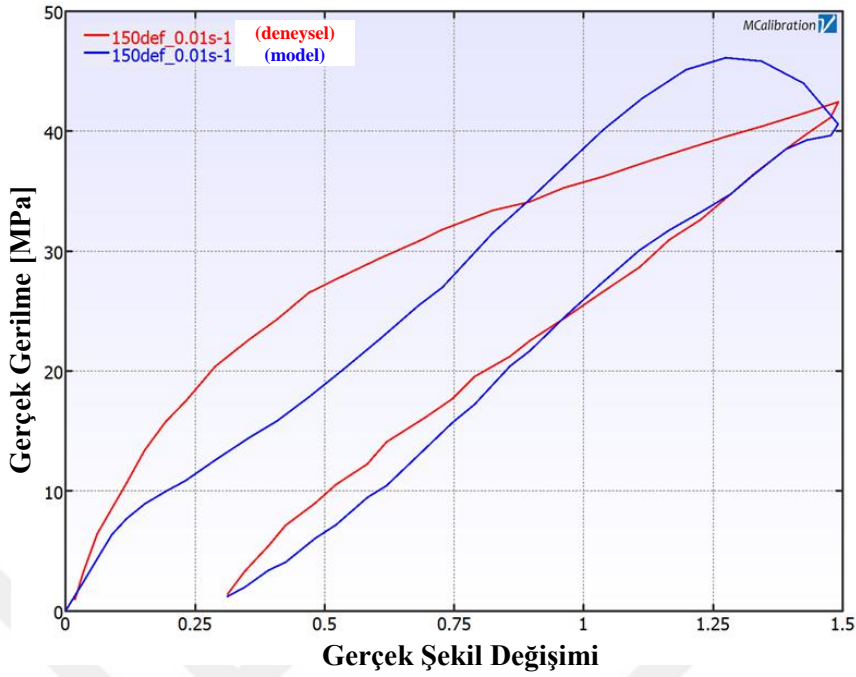


Şekil 6.51 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

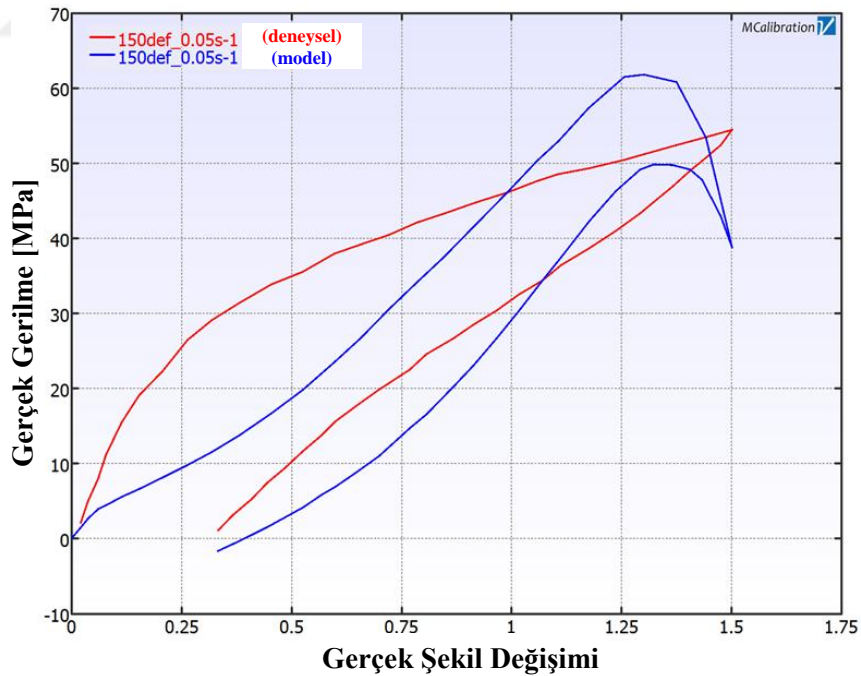


Şekil 6.52 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

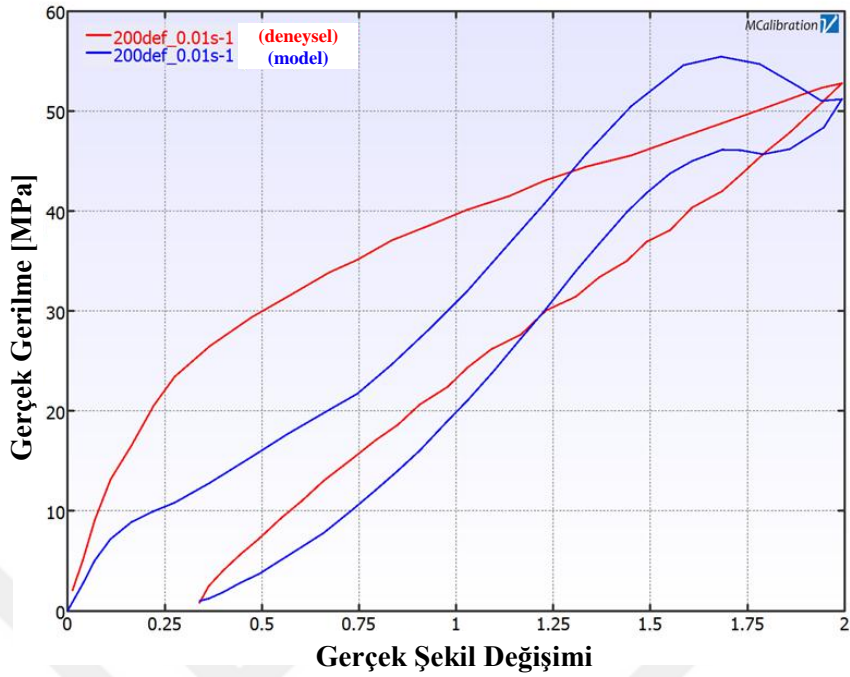


Şekil 6.53 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

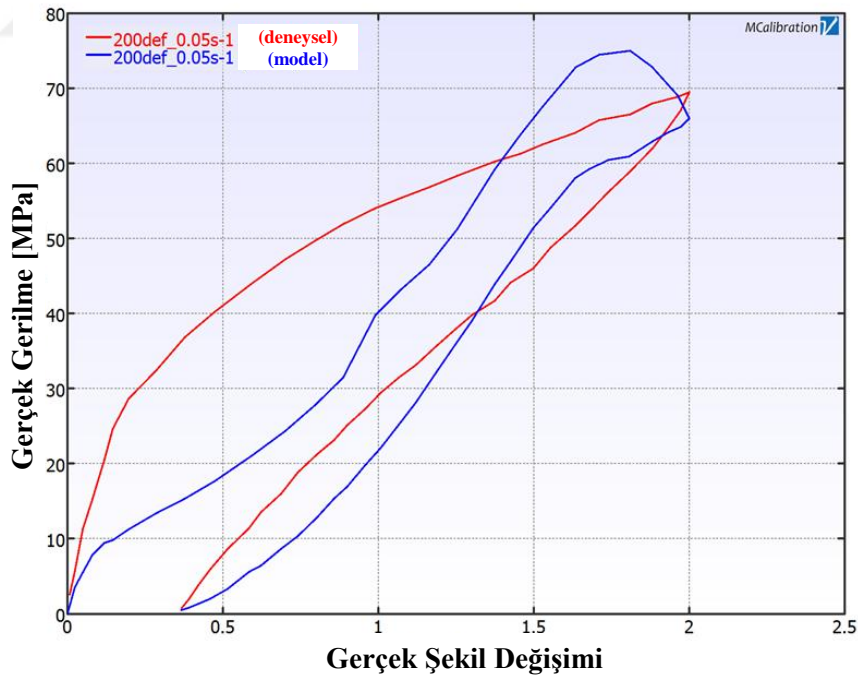


Şekil 6.54 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

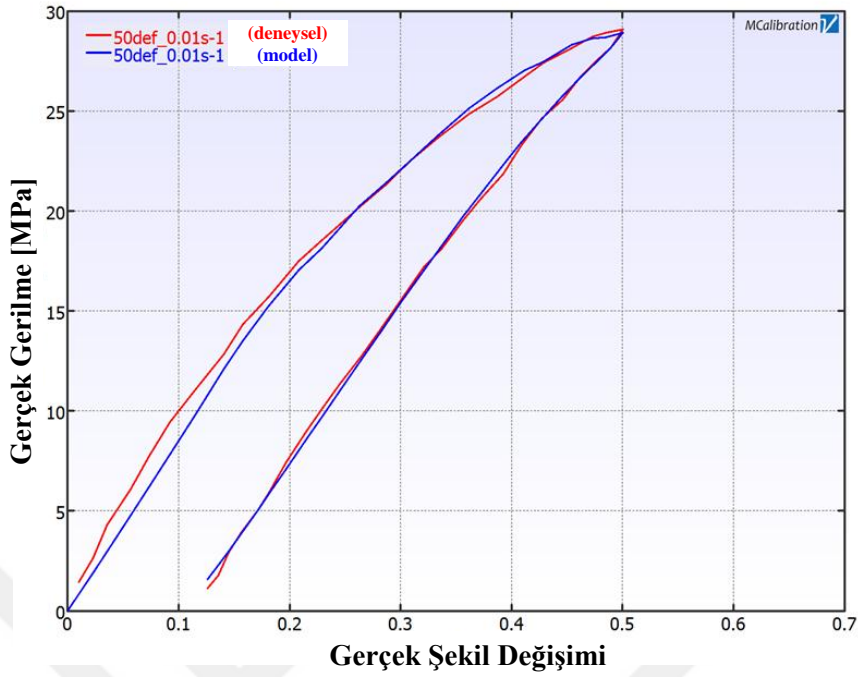


Şekil 6.55 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

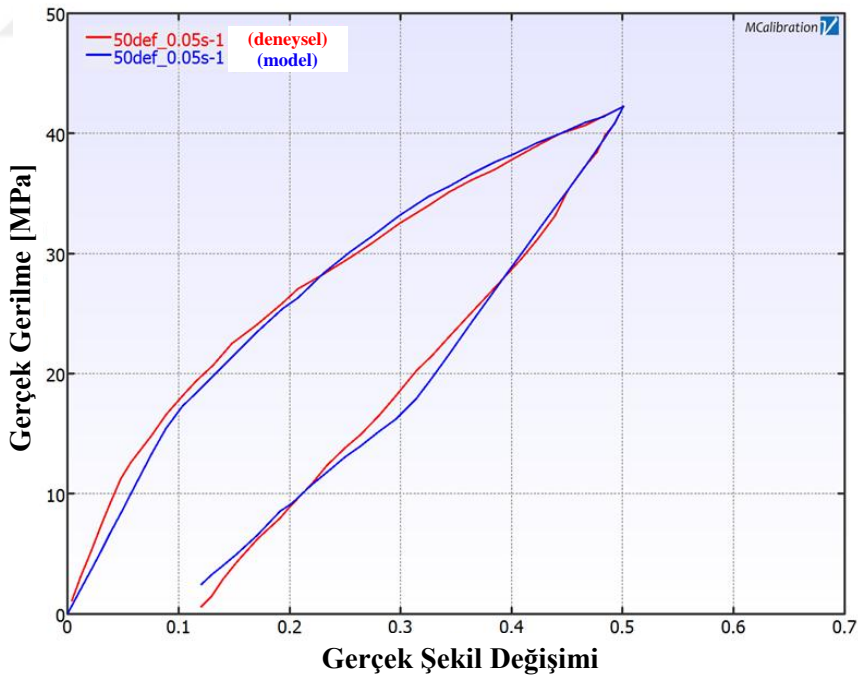


Şekil 6.56 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akış malzeme modeline göre % 200 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.57 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



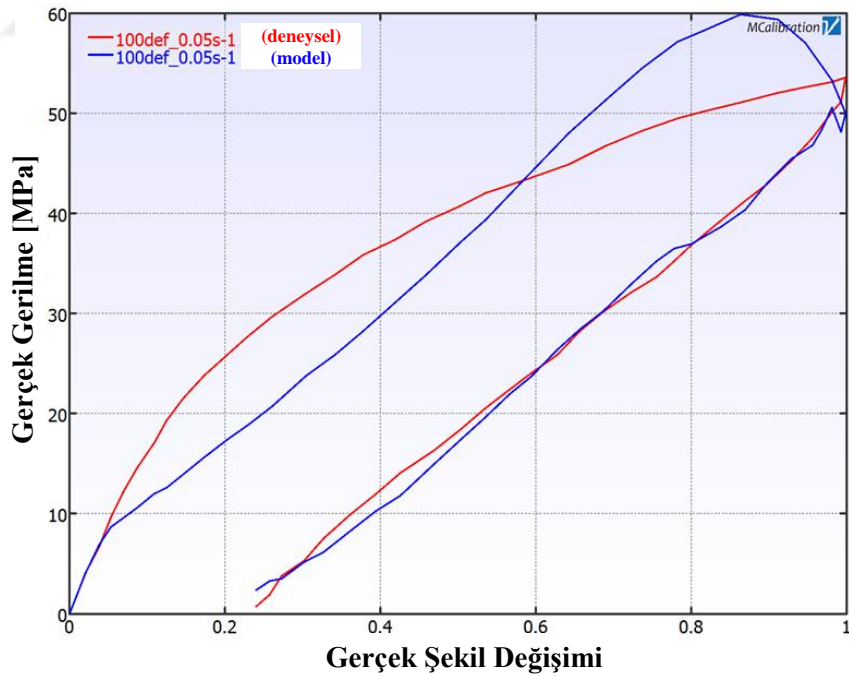
Şekil 6.58 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre % 50 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



EK-1 (Devam)

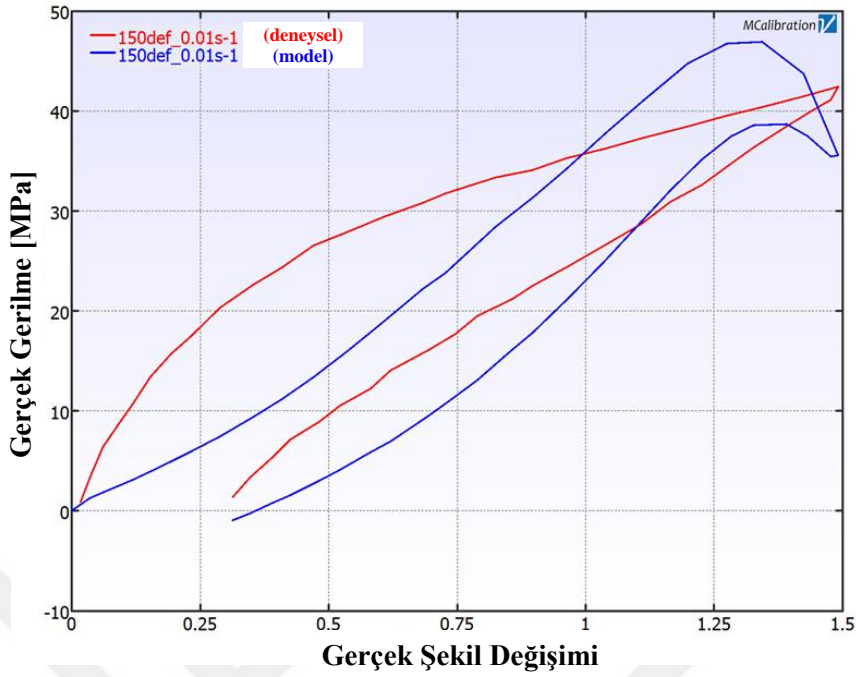


Şekil 6.59 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.60 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %100 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)

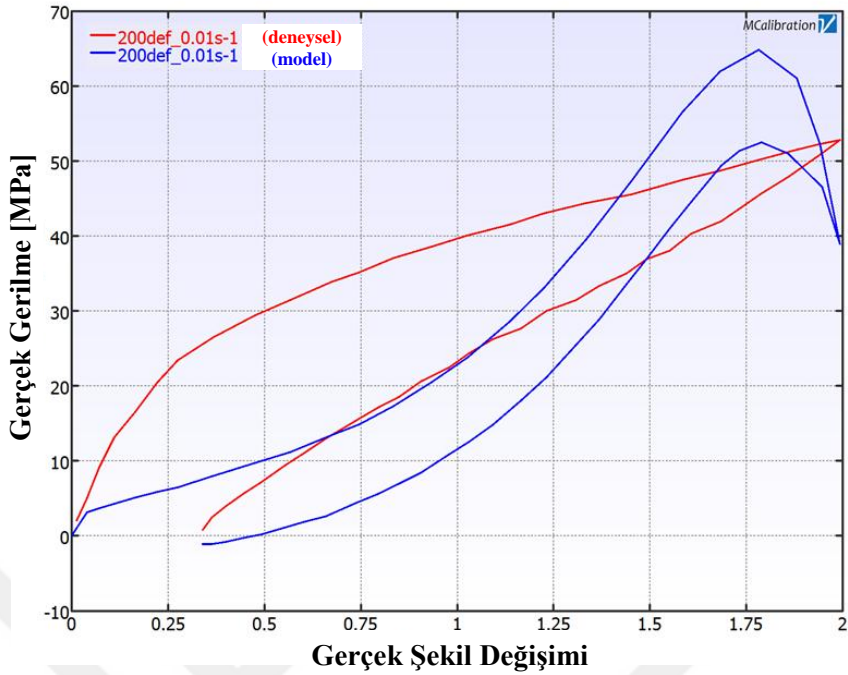


Şekil 6.61 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve  $0,01 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

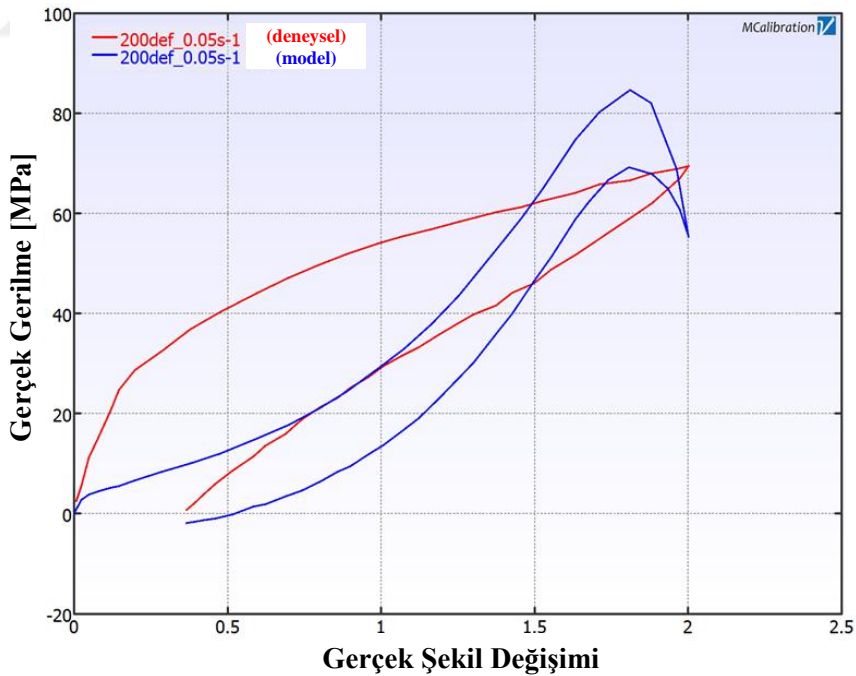


Şekil 6.62 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %150 deformasyon ve  $0,05 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

EK-1 (Devam)



Şekil 6.63 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve 0,01 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması



Şekil 6.64 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akış malzeme modeline göre %200 deformasyon ve 0,05 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması

## 6.2. EK-2 Farklı Deformasyon-Şekil Değiştirme Hızları Altındaki Malzeme Modellerine Ait Modelleme Parametreleri

Çizelge 6.1 Hiperelastik-Mullins-Mooney-Rivlin modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |        |      |         |         |          |
|-------------------------|---|---------------------|--------|------|---------|---------|----------|
|                         |   | C10                 | C01    | D1   | r       | m       | beta     |
| 50                      | 0,01                                      | 6,56805e-05         | 15,177 | 0,02 | 1,00137 | 17,3237 | 2,35658  |
|                         | 0,05                                      | 1,28002e-05         | 22,762 | 0,02 | 1,92866 | 17,2871 | 0,358106 |
| 100                     | 0,01                                      | 5,76507e-07         | 9,7203 | 0,02 | 1,02048 | 2,93798 | 2,74352  |
|                         | 0,05                                      | 9,25913e-06         | 15,163 | 0,02 | 1,14015 | 17,9882 | 1,69206  |
| 150                     | 0,01                                      | 0,0002418           | 7,8551 | 0,02 | 4,89592 | 2,07482 | 0,000502 |
|                         | 0,05                                      | 0,010634            | 10,198 | 0,02 | 5,10905 | 3,42565 | 0,015058 |
| 200                     | 0,01                                      | 5,12322e-07         | 6,4844 | 0,02 | 5,70534 | 0,76504 | 0,002151 |
|                         | 0,05                                      | 1,80972e-06         | 8,8505 | 0,02 | 5,80112 | 1,07029 | 0,029055 |

Çizelge 6.2 Hiperelastik-Mullins-Ogden modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |      |         |           |          |
|-------------------------|---|---------------------|----------|------|---------|-----------|----------|
|                         |   | mu1                 | alpha1   | D1   | r       | m         | beta     |
| 50                      | 0,01                                      | 44,5623             | -2,59501 | 0,02 | 1       | 0,0734922 | 1,57782  |
|                         | 0,05                                      | 57,6193             | 9,38047  | 0,02 | 55,0778 | 0,215107  | 64,9537  |
| 100                     | 0,01                                      | 28,6985             | -1,20609 | 0,02 | 1,00001 | 0,0964097 | 1,51483  |
|                         | 0,05                                      | 23,9393             | -1,00847 | 0,02 | 1,00228 | 55,8296   | 1,08e-05 |
| 150                     | 0,01                                      | 13,1842             | -0,70445 | 0,02 | 1,11679 | 81,6635   | 4,90e-05 |
|                         | 0,05                                      | 17,7648             | -0,67273 | 0,02 | 1,00046 | 121,226   | 0,00040  |
| 200                     | 0,01                                      | 22,0962             | -0,55668 | 0,02 | 1       | 0,0949044 | 1,76458  |
|                         | 0,05                                      | 29,9914             | -0,54880 | 0,02 | 1,0005  | 0,0759046 | 1,54736  |

EK-2 (Devam)

Çizelge 6.3 Hiperelastik-Mullins-Yeoh modeli için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |            |           |      |    |    |         |            |           |
|-------------------------|---|---------------------|------------|-----------|------|----|----|---------|------------|-----------|
|                         |   | C10                 | C20        | C30       | D1   | D2 | D3 | r       | m          | beta      |
| 50                      | 0,01                                      | 14,4582             | -3,78919   | -0,136026 | 0,02 | 0  | 0  | 1,0749  | 3,79291    | 1,22694   |
|                         | 0,05                                      | 22,6683             | -6,06668   | -0,784024 | 0,02 | 0  | 0  | 1,02377 | 5,0966     | 0,815442  |
| 100                     | 0,01                                      | 7,27936             | -0,42858   | -0,008362 | 0,02 | 0  | 0  | 2,16833 | 0,0164957  | 0,537328  |
|                         | 0,05                                      | 9,66033             | 0,205834   | -0,117623 | 0,02 | 0  | 0  | 2,12244 | 3,18859    | 0,193954  |
| 150                     | 0,01                                      | 3,33683             | 0,0098251  | -0,003233 | 0,02 | 0  | 0  | 2,93128 | 4,06543    | 0,0193303 |
|                         | 0,05                                      | 8,05472             | -0,453762  | 0,0113241 | 0,02 | 0  | 0  | 1,26731 | 0,00911157 | 1,05561   |
| 200                     | 0,01                                      | 1,56679             | 0,00727812 | -0,000298 | 0,02 | 0  | 0  | 4,03279 | 1,05675    | 0,129266  |
|                         | 0,05                                      | 4,06482             | 0,022276   | -0,001286 | 0,02 | 0  | 0  | 1,66231 | 0,792832   | 0,0686874 |

Çizelge 6.4 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |           |       |          |          |         |         |          |
|-------------------------|---|---------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|---------|---------|----------|
|                         |   | C10                 | C20      | C30       | kappa | S1       | tauBase1 | m1      | C1      | E1       |
| 50                      | 0,01                                      | 3,11887             | -1,3622  | 0,479241  | 2000  | 0,442913 | 7,12062  | 3,11887 | -1,3622 | 0,479241 |
|                         | 0,05                                      | 14,8344             | -6,75009 | 2,10891   | 2000  | 0,868314 | 11,4061  | 8,76825 | -0,5570 | 0,001    |
| 100                     | 0,01                                      | 3,76143             | 0,359353 | -0,077797 | 2000  | 4,61412  | 0,572231 | 8,18644 | -0,4667 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 6,2089              | 0,193471 | -0,071034 | 2000  | 2,91485  | 5,37562  | 7,76076 | -0,5122 | 0,001    |
| 150                     | 0,01                                      | 2,12771             | 0,032651 | -0,002966 | 2000  | 4,88525  | 5,20727  | 7,9965  | -0,4991 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 2,79511             | 0,013098 | -0,002674 | 2000  | 4,68844  | 6,30147  | 8,01317 | -0,4995 | 0,001    |
| 200                     | 0,01                                      | 1,36565             | 0095444  | -1,40e-05 | 2000  | 8,59864  | 3,81537  | 8,00848 | -0,5000 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 1,54249             | -0,01139 | 3,665e-06 | 2000  | 4,2319   | 2,05039  | 7,99862 | -0,5002 | 0,001    |

EK-2 (Devam)

Çizelge 6.5 PRF Model: 3 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |           |       |          |          |         |         |          |
|-------------------------|---|---------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|---------|---------|----------|
|                         |   | C10                 | C20      | C30       | kappa | S2       | tauBase2 | m2      | C2      | E2       |
| 50                      | 0,01                                      | 3,11887             | -1,3622  | 0,479241  | 2000  | 0,442913 | 7,12062  | 3,11887 | -1,3622 | 0,479241 |
|                         | 0,05                                      | 14,8344             | -6,75009 | 2,10891   | 2000  | 0,010431 | 117,473  | 4,43577 | -0,3886 | 0,001    |
| 100                     | 0,01                                      | 3,76143             | 0,359353 | -0,077797 | 2000  | 3,62832  | 5,56414  | 8,78353 | -0,5156 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 6,2089              | 0,193471 | -0,071034 | 2000  | 2,11409  | 6,08874  | 14,0031 | -0,3804 | 0,001    |
| 150                     | 0,01                                      | 2,12771             | 0,032651 | -0,002966 | 2000  | 2,36802  | 2,35555  | 8,02839 | -0,4997 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 2,79511             | 0,013098 | -0,002674 | 2000  | 1,71061  | 1,70221  | 8,03587 | -0,5016 | 0,001    |
| 200                     | 0,01                                      | 1,36565             | 0095444  | -1,40e-05 | 2000  | 0,358793 | 7,82045  | 8,00432 | -0,5000 | 0,001    |
|                         | 0,05                                      | 1,54249             | -0,01139 | 3,665e-06 | 2000  | 0,630339 | 16,5656  | 8,00585 | -0,4996 | 0,001    |

Çizelge 6.6 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akışı için göre farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |            |             |       |          |          |            |         |
|-------------------------|---|---------------------|------------|-------------|-------|----------|----------|------------|---------|
|                         |   | C10                 | C20        | C30         | kappa | S1       | A1       | B1         | n1      |
| 50                      | 0,01                                      | 1,05589             | -0,342768  | 0,0778349   | 2000  | 4,97567  | 0,242652 | 0,00158276 | 7,85712 |
|                         | 0,05                                      | 2,09791             | -0,545106  | 0,00035314  | 2000  | 2,41139  | 1,05773  | 0,00724992 | 5,49023 |
| 100                     | 0,01                                      | 1,49626             | -0,0966129 | 2,49673e-05 | 2000  | 2,72404  | 0,498485 | 0,0137454  | 2,40179 |
|                         | 0,05                                      | 3,41209             | -0,348906  | 0,0169857   | 2000  | 1,76209  | 0,549744 | 0,0289886  | 4,62579 |
| 150                     | 0,01                                      | 0,981316            | -0,0396027 | 0,00072169  | 2000  | 2,753    | 1,46333  | 0,0224088  | 6,13981 |
|                         | 0,05                                      | 1,30166             | -0,0490922 | 0,00084639  | 2000  | 2,11959  | 0,911378 | 0,0144884  | 6,83161 |
| 200                     | 0,01                                      | 1,42176             | -0,0146266 | 5,11305e-05 | 2000  | 0,185021 | 1,34587  | 0,0546508  | 5,76106 |
|                         | 0,05                                      | 1,97215             | -0,0236394 | 0,00012239  | 2000  | 0,348811 | 0,995067 | 0,101794   | 6,18189 |

EK-2 (Devam)

Çizelge 6.7 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile sinüs hiperbolik akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |           |         |         |          |          |         |
|-------------------------|---|---------------------|----------|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|
|                         |   | S2                  | A2       | B2        | n2      | S3      | A3       | B3       | n3      |
| 50                      | 0,01                                      | 4,05853             | 0,772725 | 0,0743126 | 3,3681  | 3,47399 | 0,5298   | 0,242409 | 8,84807 |
|                         | 0,05                                      | 3,93934             | 0,585537 | 0,043211  | 8,13832 | 8,84523 | 0,211459 | 0,139539 | 8,88383 |
| 100                     | 0,01                                      | 4,62823             | 1,27018  | 0,183066  | 6,99978 | 9,00651 | 1,88202  | 0,88929  | 4,76112 |
|                         | 0,05                                      | 3,80841             | 0,355878 | 0,14108   | 8,88516 | 7,24176 | 1,96061  | 1,67316  | 4,43559 |
| 150                     | 0,01                                      | 7,0297              | 1,29573  | 1,86005   | 4,96307 | 6,2719  | 1,37839  | 0,203343 | 5,12471 |
|                         | 0,05                                      | 0,665438            | 0,989847 | 0,191364  | 6,68685 | 4,63893 | 2,03492  | 0,160376 | 5,13532 |
| 200                     | 0,01                                      | 4,45625             | 0,849518 | 0,284521  | 6,45092 | 8,38883 | 0,596609 | 0,417918 | 6,50123 |
|                         | 0,05                                      | 4,32881             | 1,20764  | 0,352278  | 6,59708 | 5,35727 | 1,31456  | 1,27576  | 6,16802 |

Çizelge 6.8 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |             |             |       |          |         |         |           |
|-------------------------|---|---------------------|-------------|-------------|-------|----------|---------|---------|-----------|
|                         |   | C10                 | C20         | C30         | kappa | S1       | q1      | n1      | m1        |
| 50                      | 0,01                                      | 0,883281            | -0,296057   | 0,0786577   | 2000  | 5,76107  | 7,42939 | 13,9132 | -0,145684 |
|                         | 0,05                                      | 1,33089             | -0,325687   | 0,0224701   | 2000  | 3,57678  | 20,7783 | 6,89649 | -0,003033 |
| 100                     | 0,01                                      | 0,524295            | -0,0365477  | 0,00093376  | 2000  | 5,53192  | 8,56342 | 5,83691 | -0,001088 |
|                         | 0,05                                      | 3,8132              | 0,220179    | -0,0509753  | 2000  | 0,358687 | 5,11373 | 6,6624  | -0,003687 |
| 150                     | 0,01                                      | 0,577044            | -0,0110972  | -1,3926e-05 | 2000  | 1,17212  | 15,516  | 6,06647 | -0,043686 |
|                         | 0,05                                      | 1,16228             | 0,0788819   | -0,00402852 | 2000  | 0,815178 | 7,69258 | 6,38729 | -0,008416 |
| 200                     | 0,01                                      | 1,16406             | -0,0121689  | 4,4416e-05  | 2000  | 11,5806  | 2,62991 | 6,12952 | -0,036480 |
|                         | 0,05                                      | 1,86836             | -0,00966388 | -5,5259e-05 | 2000  | 7,70016  | 3,0038  | 6,12688 | -0,009584 |

EK-2 (Devam)

Çizelge 6.9 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |       |          |         |         |             |           |          |
|-------------------------|---|---------------------|-------|----------|---------|---------|-------------|-----------|----------|
|                         |   | a1                  | edot1 | S2       | q2      | n2      | m2          | a2        | edot2    |
| 50                      | 0,01                                      | -0,0807819          | 1     | 3,96687  | 13,4466 | 6,81622 | -0,00370499 | 0,182082  | 0,360995 |
|                         | 0,05                                      | 0,0882204           | 1     | 4,30381  | 16,7748 | 7,08441 | -0,0130438  | 0,171462  | 0,993176 |
| 100                     | 0,01                                      | 0,0012563           | 1     | 3,88045  | 17,8103 | 6,02525 | -0,00766504 | 0,0941588 | 0,552685 |
|                         | 0,05                                      | 0,0337073           | 1     | 0,321963 | 5,24074 | 5,92443 | -0,054159   | 0,0067845 | 0,93213  |
| 150                     | 0,01                                      | -0,0001058          | 1     | 2,2841   | 8,20208 | 5,48769 | -0,00212626 | 0,0014329 | 0,833312 |
|                         | 0,05                                      | -0,0003704          | 1     | 0,452734 | 4,75769 | 6,37377 | -0,0963803  | -0,000912 | 0,754509 |
| 200                     | 0,01                                      | 0,0003641           | 1     | 3,16517  | 2,40201 | 5,63238 | -0,0070592  | -3,36e-05 | 1,00638  |
|                         | 0,05                                      | 0,0004510           | 1     | 5,04785  | 2,9286  | 6,04461 | -0,00481183 | -0,001059 | 0,372188 |

Çizelge 6.10 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |         |         |              |             |          |
|-------------------------|---|---------------------|---------|---------|--------------|-------------|----------|
|                         |   | S3                  | q3      | n3      | m3           | a3          | edot3    |
| 50                      | 0,01                                      | 5,07724             | 14,8821 | 5,31617 | -0,00194573  | 0,0297578   | 0,689766 |
|                         | 0,05                                      | 6,5017              | 14,1095 | 7,68464 | -0,567148    | -0,116515   | 1,40861  |
| 100                     | 0,01                                      | 3,20937             | 18,8281 | 6,22381 | -0,000106209 | 0,00097350  | 0,519512 |
|                         | 0,05                                      | 0,470282            | 7,1765  | 7,13139 | -0,00123501  | 0,00276918  | 1,62549  |
| 150                     | 0,01                                      | 1,6044              | 19,0321 | 5,80342 | -0,00468465  | -0,00046017 | 0,597111 |
|                         | 0,05                                      | 0,872512            | 9,66862 | 12,1077 | -0,000955295 | -0,00074665 | 0,826846 |
| 200                     | 0,01                                      | 0,455394            | 27,8198 | 5,56905 | -0,0229811   | 0,00053773  | 1,21429  |
|                         | 0,05                                      | 3,38999             | 3,18291 | 5,73878 | -0,00800065  | -0,00104553 | 1,5124   |



EK-2 (Devam)

Çizelge 6.11 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |           |            |       |         |          |         |              |
|-------------------------|---|---------------------|-----------|------------|-------|---------|----------|---------|--------------|
|                         |   | C10                 | C20       | C30        | kappa | S1      | tauBase1 | n1      | m1           |
| 50                      | 0,01                                      | 0,73644             | -0,11123  | -0,0164008 | 2000  | 20,2693 | 0,285749 | 5,66958 | -0,00615785  |
|                         | 0,05                                      | 1,8297              | -1,24395  | 0,590279   | 2000  | 5,0322  | 5,95995  | 8,08602 | -0,0340591   |
| 100                     | 0,01                                      | 0,68172             | -0,11386  | 0,0103435  | 2000  | 5,28088 | 3,47266  | 7,49631 | -0,0867751   |
|                         | 0,05                                      | 4,92692             | -0,420904 | 0,0142495  | 2000  | 12,3548 | 2,36474  | 7,73979 | -0,0232759   |
| 150                     | 0,01                                      | 0,485977            | -0,013720 | 0,0001366  | 2000  | 17,4189 | 5,46555  | 8,01192 | -0,000651171 |
|                         | 0,05                                      | 2,00627             | 0,0364715 | -0,0029820 | 2000  | 4,18837 | 3,01181  | 8,04779 | -0,141536    |
| 200                     | 0,01                                      | 0,58991             | -0,008278 | 4,8827e-05 | 2000  | 10,502  | 3,31466  | 8,00269 | -0,0102277   |
|                         | 0,05                                      | 1,20579             | -0,013768 | 6,2954e-05 | 2000  | 12,3397 | 1,83601  | 8,00683 | -0,00131432  |

Çizelge 6.12 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile şekil değiştirmeli güç yasası akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |         |             |          |          |         |             |
|-------------------------|---|---------------------|----------|---------|-------------|----------|----------|---------|-------------|
|                         |   | S2                  | tauBase2 | n2      | m2          | S3       | tauBase3 | n3      | m3          |
| 50                      | 0,01                                      | 6,08625             | 5,21848  | 7,24206 | -0,0313796  | 10,6122  | 44,2741  | 13,4713 | -0,0376068  |
|                         | 0,05                                      | 4,32648             | 14,7114  | 7,25235 | -0,00507326 | 5,1553   | 22,6581  | 10,3278 | -0,0242817  |
| 100                     | 0,01                                      | 6,52936             | 19,7852  | 8,03354 | -0,147168   | 3,88829  | 12,1867  | 8,19707 | -0,0758535  |
|                         | 0,05                                      | 2,80875             | 5,64916  | 8,51852 | -0,0211743  | 0,788089 | 22,1212  | 8,88667 | -0,00083033 |
| 150                     | 0,01                                      | 2,05026             | 27,4286  | 8,00512 | -0,0242242  | 3,45383  | 49,1249  | 7,98191 | -0,0115873  |
|                         | 0,05                                      | 0,403641            | 7,75331  | 8,30971 | -0,396931   | 0,356529 | 5,22043  | 8,23822 | -0,0176358  |
| 200                     | 0,01                                      | 5,96536             | 2,92852  | 8,00253 | -0,030801   | 2,28847  | 103,46   | 7,99845 | -0,00016995 |
|                         | 0,05                                      | 8,41485             | 5,44642  | 7,99328 | -0,00052306 | 0,879479 | 58,0559  | 7,99918 | -0,00192625 |

EK-2 (Devam)

Çizelge 6.13 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |           |       |          |          |         |           |       |
|-------------------------|---|---------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|---------|-----------|-------|
|                         |   | C10                 | C20      | C30       | kappa | S1       | tauBase1 | m1      | C1        | E1    |
| 50                      | 0,01                                      | 7,10882             | -1,4984  | 0,072382  | 2000  | 0,721729 | 6,78044  | 11,4311 | -0,298672 | 0,001 |
|                         | 0,05                                      | 3,42004             | -1,29143 | 0,34797   | 2000  | 4,21721  | 8,34518  | 15      | -4,03e-06 | 0,001 |
| 100                     | 0,01                                      | 2,74055             | 0,199717 | -0,049756 | 2000  | 7,65117  | 1,49385  | 7,97982 | -0,519373 | 0,001 |
|                         | 0,05                                      | 5,84458             | -0,06037 | -0,035318 | 2000  | 3,39204  | 8,80757  | 8,56567 | -0,493726 | 0,001 |
| 150                     | 0,01                                      | 1,5059              | 0,008288 | -0,001519 | 2000  | 3,20393  | 0,933092 | 8,01592 | -0,499536 | 0,001 |
|                         | 0,05                                      | 2,44755             | 0,000882 | -0,001766 | 2000  | 4,0667   | 2,99017  | 8,24675 | -0,496382 | 0,001 |
| 200                     | 0,01                                      | 1,06422             | -0,00010 | -0,000106 | 2000  | 7,86276  | 2,648    | 8,00499 | -0,500824 | 0,001 |
|                         | 0,05                                      | 1,33915             | 0,002600 | -0,000150 | 2000  | 8,28528  | 2,65051  | 7,99456 | -0,500596 | 0,001 |

Çizelge 6.14 PRF Model: 4 Yeoh ağı ile Bergstrom-Boyce akışı için farklı deformasyon-şekil değiştirme hızı altındaki model parametreleri

| Deformasyon Miktarı (%) | Şekil Değiştirme Oranı (s <sup>-1</sup> ) | Model Parametreleri |          |         |           |       |          |          |         |          |
|-------------------------|---|---------------------|----------|---------|-----------|-------|----------|----------|---------|----------|
|                         |   | S2                  | tauBase2 | m2      | C2        | E2=E3 | S3       | tauBase3 | m3      | C3       |
| 50                      | 0,01                                      | 0,00026191          | 12,4017  | 11,1661 | -0,146765 | 0,001 | 0,206511 | 53,9199  | 14,2368 | -0,04825 |
|                         | 0,05                                      | 1,53949             | 18,7743  | 12,3845 | -0,215587 | 0,001 | 1,69268  | 20,3564  | 12,2617 | -0,20343 |
| 100                     | 0,01                                      | 0,225866            | 4,02654  | 8,35681 | -0,482738 | 0,001 | 0,591727 | 10,5081  | 8,82838 | -0,45260 |
|                         | 0,05                                      | 4,81767             | 1,31603  | 7,39481 | -0,494643 | 0,001 | 0,149527 | 11,7835  | 8,5158  | -0,43969 |
| 150                     | 0,01                                      | 0,440023            | 5,49188  | 7,99164 | -0,500408 | 0,001 | 0,689772 | 10,5502  | 8,05661 | -0,50039 |
|                         | 0,05                                      | 2,32411             | 1,71858  | 8,30274 | -0,483642 | 0,001 | 0,337367 | 9,1572   | 8,17638 | -0,48116 |
| 200                     | 0,01                                      | 5,29452             | 1,78289  | 7,99345 | -0,500431 | 0,001 | 0,194791 | 12,1909  | 7,99912 | -0,49989 |
|                         | 0,05                                      | 5,71252             | 2,32203  | 7,99204 | -0,500303 | 0,001 | 0,274568 | 6,04171  | 8,00068 | -0,49878 |

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ENGİNSOY, Halil Murat  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 1987 - Afyonkarahisar  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0276 221 2136 - 2765  
e-mail : [murat.enginsoy@usak.edu.tr](mailto:murat.enginsoy@usak.edu.tr)  
[hmenginsoy@gmail.com](mailto:hmenginsoy@gmail.com)

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                              | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|--|------------------|
| Doktora       | Uşak Üniversitesi/Makine Mühendisliği      | 2017             |
| Yüksek lisans | Pamukkale Üniversitesi/Makine Mühendisliği | 2012             |
| Lisans        | Pamukkale Üniversitesi/Makine Mühendisliği | 2010             |
| Lise          | Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi              | 2005             |

### İş Deneyimi

| Yıl        | Yer               | Görev               |
|------------|-------------------|---------------------|
| 2013-devam | Uşak Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar programlama, kitap okuma.