

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENEYSEL VERİLER VE SONLU ELEMANLAR METODU
KULLANARAK LASTİK ŞOK EMİCİNİN DARBE
DAVRANIŞININ ANALİZİ

EVREN KUTLU

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

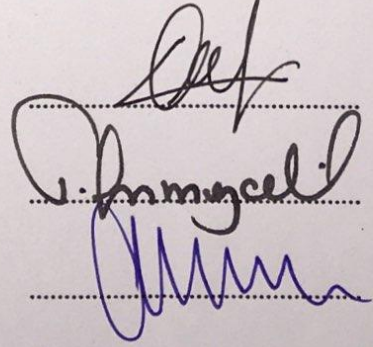
DENEYSEL VERİLER VE SONLU ELEMANLAR METODU
KULLANARAK LASTİK ŞOK EMİCİNİN DARBE
DAVRANIŞININ ANALİZİ

EVREN KUTLU

Yrd.Doç.Dr. Serkan ZEREN
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.


.....
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
.....
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.05.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Sadece tez sürecinde değil bana her zaman destek olan, beni yönlendiren, kişiliğini ve akademik niteliklerini kendime örnek aldığım Prof. Dr. Cüneyt Oysu'ya,

Bana deneyimi ve bilgisi ile yol gösterip, desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik'e,

Malzeme tedarikinde ve bilgi paylaşımında beni destekleyen Teklas A.Ş.'ye ve Genel Müdür Nebi Anıl ve Genel Müdür Yardımcısı Serkan Ünal'a,

Tezimin laboratuvar ve deney sürecinde benden yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Egemen Avcu'ya ve Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan Meslek Yüksekokulu'na,

Değerli katkılarından dolayı danışmanım Yard. Doç. Dr. Serkan Zeren'e,

Bana tez sürecimde anlayışla yaklaşan Kocaeli Üniversitesi Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu'ndan Yrd. Doç. Dr. Mustafa Seçilmiş ve Yrd. Doç. Dr. Şule Şirin'e, okul yönetimine ve hocalarına,

Sabırla yanımda olan eşime ve aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Nisan – 2017

Evren KUTLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. DENEY DÜZENEGİ MEKANİK TASARIMI	3
2. DENEYLER	12
3. HİPERELASTİSİTE TEORİSİ	30
4. SONLU ELEMANLAR TEORİSİ	48
5. DENEYSEL SONUÇLAR	52
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
EKLER	83
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	94
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kullanılan farklı şok emici uygulamaları	6
Şekil 1.2.	Deney düzeneğinin mekanik tasarımı.....	8
Şekil 1.3.	Deney düzeneği genel fotoğrafı	9
Şekil 1.4.	Testler için farklı kütleler.....	9
Şekil 1.5.	Test Kütleleri ve Adetleri Dağılımı	10
Şekil 1.6.	Temel plaka – Alüminyum.....	10
Şekil 1.7.	Test numunesi kesit	11
Şekil 1.8.	Testlerde Yüksek Hızlı Kamera (HSC) konumu ve kütlenin serbest düşüş yüksekliğini gösteren şematik çizim	12
Şekil 1.9.	Deney Düzeneği Genel Görünüm	13
Şekil 2.1.	25 cm yükseklikten 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 9,01 ms)	18
Şekil 2.2.	25 cm yükseklikten 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 13,5ms)	19
Şekil 2.3.	25 cm yükseklikten 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 18,0ms)	20
Şekil 2.4.	25 cm yükseklikten 10,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 20,0 ms)	21
Şekil 2.5.	61cm yükseklikten 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 10,0ms)	22
Şekil 2.6.	61cm yükseklikten 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 12,0 ms)	23
Şekil 2.7.	61cm yükseklikten 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 17,5ms)	24
Şekil 2.8.	61cm yükseklikten 10 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 15ms)	25
Şekil 2.9.	25 cm yükseklikten serbest düşme	26
Şekil 2.10.	25 cm’den serbest düşme eğrisi (eğilim çizgisi)	29
Şekil 3.1.	Dış yükler altında bir katının deformasyonu	32
Şekil 3.2.	Sonsuz küçüklükteki çizgi elemanlarının bir katıdaki deformasyonu	34
Şekil 3.3.	Katıdaki iç bir malzeme elemanının deformasyonu	36
Şekil 3.4.	Sıcaklık ve birim değiştirme fonksiyonu olarak tipik bir polimerin modulusünün değişimi	38
Şekil 3.5.	Bir köpük malzemenin gerilme-birim uzama eğrisi	40
Şekil 3.6.	Dış kuvvetlere maruz kalan bir deforme edilebilen katının deformasyonu	42
Şekil 3.7.	Numune malzemesine ait tek eksenli gerilme ile gerinim diyagramı.....	44
Şekil 3.8.	Malzeme Modelleri Tek Eksenli Gerilim - Birim Uzama Eğrileri.....	47
Şekil 4.1.	Eksenel simetrik modele uygulanan sınır koşulları	49
Şekil 4.2.	Numunenin deforme olmuş halindeki gerinimin Abaqus modelinde logaritmik ölçeklendirmede gösterimi (3 kg’lık kütlenin 25 cm’den serbest düşmesi ile elde edilen)	49

Şekil 4.3.	En yüksek deformasyon seviyesindeki von Mises eşdeğer gerilme dağılımı	50
Şekil 5.1.	25 cm'den 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	53
Şekil 5.2.	25 cm'den 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	54
Şekil 5.3.	25 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	55
Şekil 5.4.	25 cm'den 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	57
Şekil 5.5.	25 cm'den 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	58
Şekil 5.6.	25 cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	59
Şekil 5.7.	25 cm'den 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	61
Şekil 5.8.	25 cm'den 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	62
Şekil 5.9.	25 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	63
Şekil 5.10.	61 cm'den 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	65
Şekil 5.11.	61 cm'den 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	66
Şekil 5.12.	61 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	67
Şekil 5.13.	61 cm'den 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	69
Şekil 5.14.	61 cm'den 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	70
Şekil 5.15.	61 cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	71
Şekil 5.16.	61 cm'den 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)	73
Şekil 5.17.	61 cm'den 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)	74
Şekil 5.18.	61 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği	75
Şekil 5.19.	Tüm deneyler yükseklik-zaman grafikleri	77

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Standart çarpma hızları ve ilgili düşme yükseklik ve zamanları-1.....	14
Tablo 2.2. Standart çarpma hızları ve ilgili düşme yükseklik ve zamanları-2.....	15
Tablo 2.3. Standart darbe hızları ve kütleleri için tahmini darbe kuvveti ve ivmesi.....	15
Tablo 2.4. Deneyler Matrisi.....	16
Tablo 2.5. Örnek bir test için deneysel sonuçlar.....	17
Tablo 2.6. 25 cm'den serbest düşme analizi.....	27
Tablo 2.7. 61 cm'den serbest düşme analizi.....	28
Tablo 3.1. Bazı basit deformasyon örnekleri.....	32
Tablo 3.2. Hiperelastik bünyesel denklemler ile bulunan $\sigma(S)$ - $\varepsilon(\lambda)$ ilişkileri.....	46
Tablo 5.1. Deney ve analizler özet tablosu.....	52
Tablo 5.2. 25cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	56
Tablo 5.3. 25cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	60
Tablo 5.4. 25 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	64
Tablo 5.5. 61 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	68
Tablo 5.6. 61cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	72
Tablo 5.7. 61 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları.....	76
Tablo 5.8. Tüm deneyler korelasyon özet tablosu.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Birliği)
DIN	: Deutsches Institut für Normung e. V. (Federal Almanya Cumhuriyeti Resmî Standart Enstitüsü)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
HSC	: High Speed Camera (Yüksek Hızlı Kamera)



DENEYSEL VERİLER VE SONLU ELEMANLAR METODU KULLANARAK LASTİK ŞOK EMİCİNİN DARBE DAVRANIŞININ ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, bir şok sönümleyicinin darbe davranışını incelemek için bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deney düzeneğinin oluşturulması ile birlikte, hali hazırda titreşim ve darbe sönümleyici olarak kullanılan kauçuk malzemeden bir otomobil radyatör takozuna darbe testleri uygulanmıştır.

Tüm darbe anı bir yüksek hızlı kamera (YHK) tarafından kayıt altına alınmış ve belirli boyutlar yine YHK'ya ait yazılım yardımı ile ölçümlendirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Bu çalışmalara paralel olarak, eksplisit (açık) ve geçici (transient) dinamik sonlu elemanlar modelleri (Finite Element Model – FEM) ile analizler sırasıyla Abaqus ve Ansys programlarında sürdürülmüştür. Analizler yine aynı kütle ve hızlarda yapılmıştır. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında uyumluluk yakalanmıştır. Abaqus programında yapılan eksplisit analiz sonuçları, deneyler sonuçları ile daha iyi uyumluluğa sahip olmuş ve daha hızlı sonuç vermiştir.

Bu çalışma ile, yüksek birim uzama hızlarında ve miktarlarında gerçekleşen ve hala elastik deformasyon sergileyen malzemelere yapılan darbe deneylerinin modelleme yöntemine bir temel oluşturulması amaçlanmıştır. Bu çalışma amaçlarına, uygun tasarlanmış ve imal edilmiş yetkin bir deney düzeneği ve doğrusal olmayan analizler yapabilen bir sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus programının etkin kullanımı ile ulaşmıştır. Bu sayede, yapılan sonlu elemanlar analizlerinin daha gerçekçi sonuçlar vermesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Darbe Sonlu Elemanlar Modeli, Darbe Sönümleme, Deneysel Darbe Davranışı, Ekspilisit Analiz, Lastik Şok Emici.

ANALYSE OF IMPACT RESPONSE OF A RUBBER SHOCK ABSORBER USING EXPERIMENTAL DATA AND FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

In this study, an experimental set-up which suits standard impact testing was designed and manufactured in order to investigate the impact behaviour of a shock absorber. After the construction of the experimental set-up, certain samples of rubber shock absorbers which were already used as an automobile radiator vibration and shock isolator were subjected to impact tests.

The whole impact was recorded by a high speed camera (HSC), and certain dimensions were measured via the software of same HSC. The measured data were collected and analysed accordingly. Meanwhile, explicit and transient dynamic finite element models were prepared in Abaqus and Ansys softwares respectively. Analyses were carried out for same impact loads and speeds as it was applied in experiments. The numerical results showed high correlations with experimental data. Explicit results of Abaqus revealed a better and quicker compliance with experiments.

The aim of this study was to develop a modelling method in order to assess the deformation of rubber like materials which still show elastic behaviour under high strains and high strain rates when subjected to impact loadings. The study achieved its aim by a well-designed-manufactured and capable experimental set-up and a proper use of a nonlinear finite element analysis software, Abaqus. Therefore, it was made possible that FEM analyses yield more realistic results.

Keywords: Experimental Impact Behaviour, Explicite Analysis, Finite Element Modelling Of Rubber Impact, Impact Absorption, Rubber Shock Absorber.

GİRİŞ

Lastiklerin, hem yaysı hem de sönümleyici olması nedeni ile geniş bir uygulama alanı vardır. Araba lastiklerinden darbe sönümleyicilere, kaplamalardan borulara, sızdırmazlık elemanları olarak kullanılan keçelerden diyaframlara ve ayakkabı tabanlarına kadar farklı ürün gruplarında ana imalat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanının çokluğu, yine sönümleme kabiliyeti, kullanım kolaylığı ve göreceli olarak düşük maliyetleri gibi avantajlar ile daha da artmaktadır.

Bu denli yaygın kullanımına karşın, metaller gibi yaygın kullanılan diğer elemanlarının aksine, tasarım aşamasında kütletipleri ve büyüklüklerine karşı lastiğin davranışının tam olarak modellenenbilmesi oldukça güçtür. Kurulum denklemleri temel alınarak oluşturulan birçok tasarım doğrulama ve analiz yöntemleri yine metaller ve bazı polimerlerin aksine, lastik malzeme-elastomer söz konusu olduğunda pek çalışmamakta ve analizlerin sonuçları gerçek veriler ile uyum göstermemektedir. Lineer ve lineer olmayan davranışlar olarak da adlandırılan, mekanik ve termal yüklere verilen doğrusal ve doğrusal olmayan tepkiler, lastik malzemeler için genelde lineer olmayan tepkiler olarak sınıflanmaktadır. Lineer olmama durumu sadece malzemeye bağlı değil ayrıca yüklemenin hızına ve diğer ön şartlara bağlı olarak da gelişmektedir. Özellikle darbe yükleri gibi şekil değiştirme hızlarının çok yüksek olduğu ve yine lastik malzemelerin kullanıldığı sistemlerde lineer olmama durumu daha da artmaktadır. Bazı darbe sönümleme uygulamaları Şekil 1.1’de gösterilmiştir [1-4].

Tezin konusu olan bu çalışma, sanayide de aktif olarak kullanılan ve kullanımı daha da çok artan lastik şok emicilerin darbe davranışlarının modellenmesi üzerine kurulmuştur. Burada genel bir kurulum denklemleri yerine, deneysel verilerden türetilen bünyesel denklemlerin oluşturulması ve bu deneyler ile gerçek deney sonuçlarının kıyaslanması için gerekli çalışmaların yapılması amaçlanmıştır.

Darbe, titreşim mekaniğinde, iki veya daha cismin biribiri ile çarpıştığında, çok kısa bir zamanda uygulanan bir şok yük olarak tanımlanmakta olup, yalın bir etki olarak

titreşim sistemlerinde değerlendirilmekte ve ona göre modellenmesi gerekmektedir. Darbenin, mekanizmaların çalışmasını ve fonksiyonlarının devamlılığını sürekli kılmak için, yine sistem içinde sönümlenmesi gerekmektedir. Darbe sönümleme, şok absorbsiyonu veya yastıklama aslında titreşim sistemleri altındaki, neredeyse aynı kavramları anlatan benzer terimlerdir. Mühendislik uygulamalarında ve sanayide darbe sönümleme mekanizmaları genel olarak iki farklı alanda yaygın olarak kullanılmakta olup; birisi otomobillerdeki süspansiyon sistemlerindeki gibi, amortisör görevi görmesi, diğeri ise kaza gibi anlık darbenin olduğu olaylarda hasarın şiddetinin azaltılması amacıyla. İki durum arasındaki temel fark ise, birisinin dalgalı / sürekli / tekrar eden, diğeri ise anlık ve yüksek şiddetli olmasıdır. Polistiren veya diğeri plastik köpük malzemeler, ince duvarlı (thin walled) plastik veya metal yapılar, sac metal vb. malzemeler kalıcı deforme olmalarına veya kırılmalarına izin vererek şok yüklerin neden olduğu darbe yüklerini sönümlerler. Bunlardan farklı olarak; yay, piston ve hidrolik sıvıdan (hidrolik sıvının hareket anında dar kanallardan geçmesi prensibine dayanan) oluşan şok emiciler ise darbe anında yay hareketi ve hızlı hidrolik sıvı akışı neticesinde darbe enerjisinin önemli bir kısmını ısıya dönüştürerek sönümlemeyi sağlamaktadırlar.

Yaysı davranış ile sönümleyici özellikleri aynı anda gösterebildiği için, lastik ve lastik davranışları birçok araştırmada konu edinilmiş, birçok darbe sönümleme sistemlerinde kullanılmaya çalışılmıştır. Lastik tampon ve yaylar, şok absorblayıcılara ve deforme edilebilir şok emici köpüklere göre oldukça ucuzdur. Ayrıca kırılıncaya veya bozuluncaya kadar yüksek süneklik gösterebildiği halde, lastik, geri tepme diye adlandırılan bir etkiye sahiptir [5]. Darbe anında emilen yüksek miktarda enerji ısı olarak açığa çıkmak yerine depolanmaktadır. Bu kalıntı enerji ise bir geri sıçrama ortaya çıkarır, kütlede veya makinenin kendisinde bir hasara yol açabilir. Bu yüzden, lastik takoz ve sönümleyicilerin bu geri sıçramayı sönümleyecek veya yayacak şekilde sofistike (optimum) bir tasarıma sahip olması çok önemlidir.

Lastik ürünler genellikle sadece kalıplama metotları ile üretilebilmektedir. Bu yüzden, lastiğin viskoelastik yapısından kaynaklanan lineer olmayan davranışlardan dolayı modellenmesinin güçlüğüne yanı sıra farklı kalıplara olan ihtiyaç neticesinde tasarım doğrulama maliyetleri de oldukça yükselmektedir. Farklı tasarlanmış örnek

hazırlama ve bu örneklere uygulanacak testler önemli bir miktarda zaman alacağı ve yatırım gerektireceği için geçerli bir Sonlu Elemanlar Modelinin ortaya çıkarılmasına daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

Tüm bunların yanında, ilgili deformasyon hızlarında daha iyi bir şok absorbsiyon sağlayacak yeni malzeme devreye alma çalışmaları birçok araştırmada ve sanayi uygulamalarında sürdürülmektedir. Yine de, malzeme tasarımı, şok sönümleyici imalatı ve ürün tasarımı aslında farklı çalışma disiplinlerinin araştırma ve geliştirme konusu olmaktadır. Bu durum da tasarım, imalat ve marketten gelen farklı isteklere aynı anda cevap verebilecek malzemelerin tasarlanmasına ve üretilmesine ihtiyaç duymakta ve bu farklı disiplinlerin ancak bir arada, ortak bir uyum içinde çalışmalarını gerektirmekte olduğu için oldukça zor bir çalışma alanı ortaya koymaktadır. İyi çalışan bir malzeme ve tasarım simulasyonu, tasarım, kalıp, malzeme ve üretim zamanı ve maliyetlerini düşüreceği için, uygun bir sonlu elemanlar modelinin oluşturması çok önemli hale gelmektedir. Tasarımı optimize ederek, kolaylıkla fark edilemeyecek, darbe yükleri altında yığılma, tekrarlı yüklerden dolayı oluşacak ısı yayılım ve bunun sonucu olan ve polimerlerin ve özellikle elastomerlerin, önemli karakteristik bir özelliği olan yapay yaşlanma geçerli bir FEM sayesinde kolaylıkla fark edilebilir ve geliştirilebilir. Bu çalışmada, bu yüzden, deneylerden elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırmalar yaparak oluşturulan uygun bir FEM devreye alabilmek için, geniş farklılıkta boylara sahip numunelere test yapabilen, çok farklı hız ve momentum kapasitelerinde, modüler ve geliştirilebilir bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu sayede, farklı ve karmaşık şekillere sahip elastomerler, polimerler ve diğer malzemeler simule edilebilir hale gelip, kendilerinin sanal malzeme davranışları elde edilebilir oldu. Aynı çalışmaları tersinir olarak da yaparak; ilk önce bir model tasarlanıp ve oluşturulmuş bir FEM altında simule edilmesi ile toplanan malzeme özellikleri gereksinimleri bu özelliklere uygun bir malzeme araştırılması için araştırmacılardan da talep edilebilir.

Bu tezde, iki çalışma paralel olarak sürdürülmüştür. Bir yandan deney tasarımı ve neticesinde, deney düzeneği tasarlanmış ve tasarıma göre deney düzeneği imal ettirilmiş, deneyler yine bu deney düzeneğinde yapılmıştır. Bir diğer yandan, EPDM (etilen propilen dien monomer (M sınıfı)) kauçuk malzemeden numune radyatör

takozu için aynı darbe testi sonlu elemanlarda modellenmiş, sonuçlar arasında tam bir uyumluluk arandı. Bu özel test düzeneği ASTM DIN3763 standardına uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarlanmış test düzeneği imal edilmiş, bir lastik parça imalatçısından numune lastik parçalar temin edilmiştir. Darbe testi incelemesi bir Yüksek Hızlı Kamera (HSC- High Speed Camera) 8000 fps'de (saniyede 8000 görüntü) çalıştırılmıştır. Yakalanan görüntüler yine HSC'ye ait yazılım programı ile toplanmış, belirli noktalar arası değişimler ölçümlendirilmiş ve toplanan veriler analiz edilmiştir. Oluşturulan görüntü zamanı ile yükseklik verilerinde oluşturulan grafikte, noktalara en iyi uyumluluk gösteren eğriler (eğim çizgisi) yaratılmıştır. Bu eğrilerin yaratılmasında, ortalama karekök değeri R^2 0,998'den daha büyük olan derece polinomsal denklemler tercih edilmiştir. Bu veriler ışığında oluşturulan zamana bağlı yükseklik eğim çizgileri gelecek hesaplamalar için temel alındı.

Bu alanda yoğunlaşan benzer ve ilgili çalışmalar vibrasyon sönümleyici parçalarda kuvvet-deformasyon tepkisine incelerken [6], quasi-statik analiz ile deneysel verilerin doğrulanması ile darbe davranışını çalışmıştır [7]. Çekme yönündeki şok dalgaları altında yüksek birim uzama hızlarına maruz kalmış lateks ve nitril kauçuğun davranışı [8] incelenmiştir. Hem deneysel hem de sonlu eleman modeli olarak 1m/s hızlarına kadar değişen darbe hızları altında lastikle güçlendirilmiş plastik malzemelerin özellikleri ve karakteristiklerine birim uzama değişiminin etkisi [9] çalışılmıştır. Göreceli olarak daha yüksek hızlarda (150 m/s'e kadar) lastik diyaframlara yapılan darbe testleri sürdürülmüş, HSC tarafından görüntülenmiş ve kaydedilirken, quasi-statik ve yüksek hız tepkilerinin ikisine göre de simüle edilmiştir [10]. Kauçuk malzemenin hiperelastik yapısının deformasyonu ve hacimsel değişimindeki dalgalanmalar [11] incelenmiştir. Düşük birim uzama hızlarında yapılan çekme germe testleri ile elde edilen gerilme-birim uzama ilişkilerinin eksterpolasyonu ile yüksek birim uzama hızlarında uzamanın bir fonksiyonu olarak gerilmenin hesaplanmasını amaçlayan bir model ortaya koymaya çalışılmıştır [12]. Bu model sonlu elemanlar analizinde simülasyonun doğruluğunu arttırmak için kullanılmaktadır. DSGZ (Duan, Saigal, Grief, Zimmerman) modeli, gerilmeyi birim uzamanın, birim uzama hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak veren tek eksenli gerilme – birim uzama bünyesel modeli, araştırmalarda kullanılmaktadır [13]. DSGZ denklemindeki dokuz malzeme katsayısını hesaplamak için, üç adet farklı birim uzama hızlarında ve sıcaklıklarda oluşturulmuş basma

gerilmesi-birim uzama eğrisine ihtiyaç vardır. Malzeme katsayılarını elde etmek ve mekanik davranışı çalışmak için, farklı koşullar altında elde edilmiş germe testlerinin yanında basma testlerinin de yürütülmesi gerekmektedir. Darbe modellemesi Abaqus/Ekspilisit altyapısı kullanılarak icra edilmiş, burada DSGZ modelinin işletilmiş hali kullanıcı tarafından belirlenmiş bir altprogram çalıştırılmıştır.

Sonlu elemanlar metodlarının uygulandığı bu tez çalışmasında, analizler, kauçuk malzemesinin doğrusal olmayan malzeme modellerini temel alarak sürdürülmektedir. Lineer elastik model, ancak, küçük deformasyonların gerçekleştiği ve elastik bölgede gerilme ile birim uzama arasında lineer bir ilişkinin geçerli olduğu şartlar altında, analizlerden doğru sonuçlar vermektedir [14], [15]. Malzemenin izotropik olması, elastiklik davranışının lineer olması, sabit bir Young Modülü's'e E 'ye, Poisson Oranı ν 'ye ve özkütle ρ 'ya sahip olması bu lineer ilişki için gerekliliklerdir [14]. Bu tez boyunca sürdürülen analizlerde ise kauçuk malzemenin darbe yüklerine maruz kalması olayı, doğrusal olmayan bir elastik davranış ortaya çıkardığı kabul edilmiş, analizler sonucunda alınan sonuçların gerçek deney ile karşılaştırılmaları sonucu bu kabullenme kendisini doğrulamıştır. Malzemeyi hiperelastik olarak kabul eden birçok çalışmadan da anlaşılabileceği gibi, doğru sonlu elemanlar analiz programının Abaqus olacağı anlaşılmıştır. Her ne kadar Ansys programı sonuçlar verse de, sonuçların yakınsaması ile ilgili temel sorunlar Ansys ile aşılamamıştır. Doğrusal olmayan malzeme davranışı 1940'lı yıllardan beri çalışma konusu olmuş, Mooney, Rivlin ve Saunders [16, 17] büyük elastik deformasyonları çalışmışken, sonra gelen Blatz ve Ko elastomerler için yeni bir birim uzama enerji fonksiyonunu geliştirmiştir [15] - [21]. Hiperelastik malzemeler lineer olmayan davranış gösterirler ki, lineer elastik malzemelerde veya lineer elastik birim uzama miktarlarında olduğu gibi, deformasyon gerilme miktarı ile doğru orantılı değildir.

1. DENEY DÜZENEĞİ MEKANİK TASARIMI

Test numunesi bulunabilirliği ve kullanım alanına göre seçilmiştir. Bu çalışmada gelecekteki araştırmalar için temel oluşturacak bir yapı oluşturulmaya çalışılmıştır. Temel bir numune için geçerli bir model geliştirildikten sonra, yaşlandırılmış kauçuk malzemelerden yeni tasarlanmakta olan malzemelere kadar aynı darbe testi düzeneği veya amaca göre biraz daha geliştirilmiş hali kullanılarak testlerin yapılmaya devam edilmesi hedeflenmektedir. Bu yüzden, test düzeneği tasarımında, mobiliteye sahip olabilmesi, modüler olması, test standartları ile tam bir uyum içinde olması, rijitliği, basitliği ve çok kez yapılacak testlere karşı sağlamlığını koruyabilecek olması tasarım kriteri olarak alınmıştır. Öte yandan, numune için ise, pazarda bulunabilirlik, basit bir tasarım-malzeme ve darbe sönümleme için hali hazırda kullanılıyor olması seçim için aranan özellikler olmuştur. Bazı darbe sönümleme uygulamaları Şekil 1.1’de gösterilmiştir [1-4]. Bu deney düzeneği ile birlikte pek çok farklı sönümleme uygulamalarının darbe deneyleri gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır.

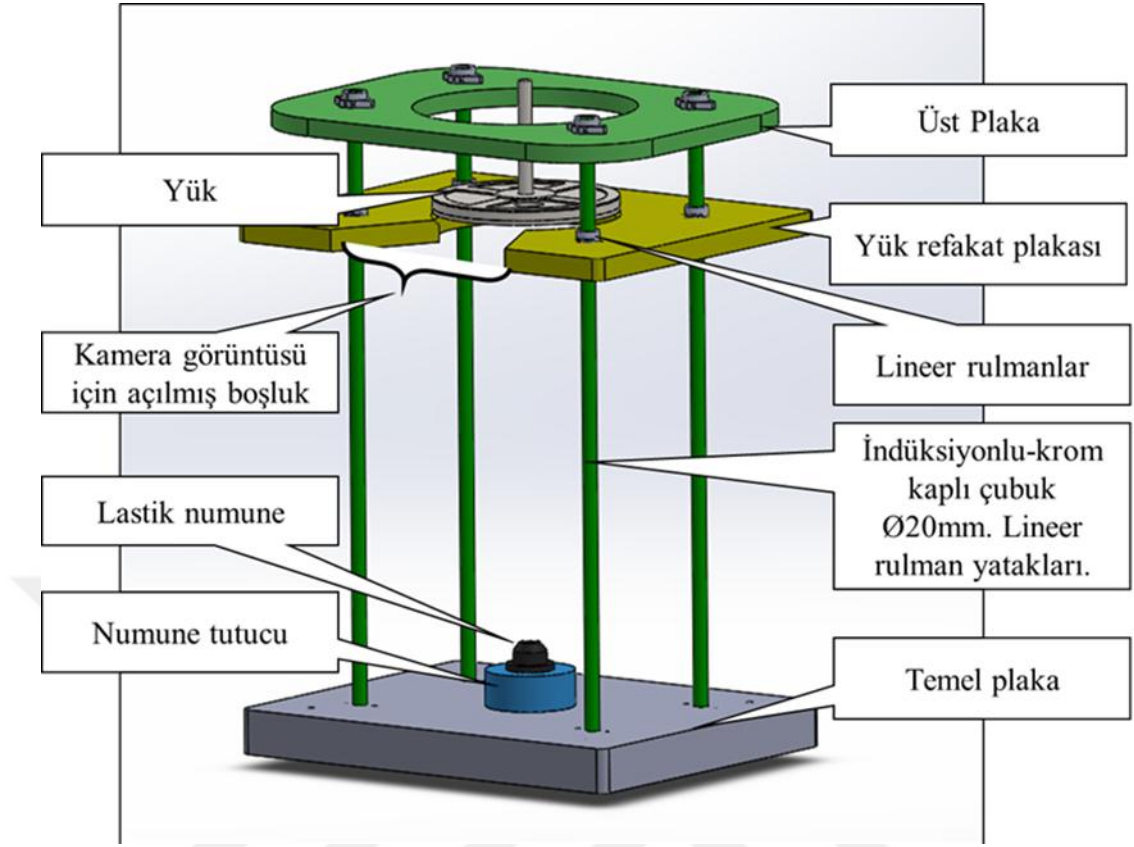


Şekil 1.1. Kullanılan farklı şok emici uygulamaları

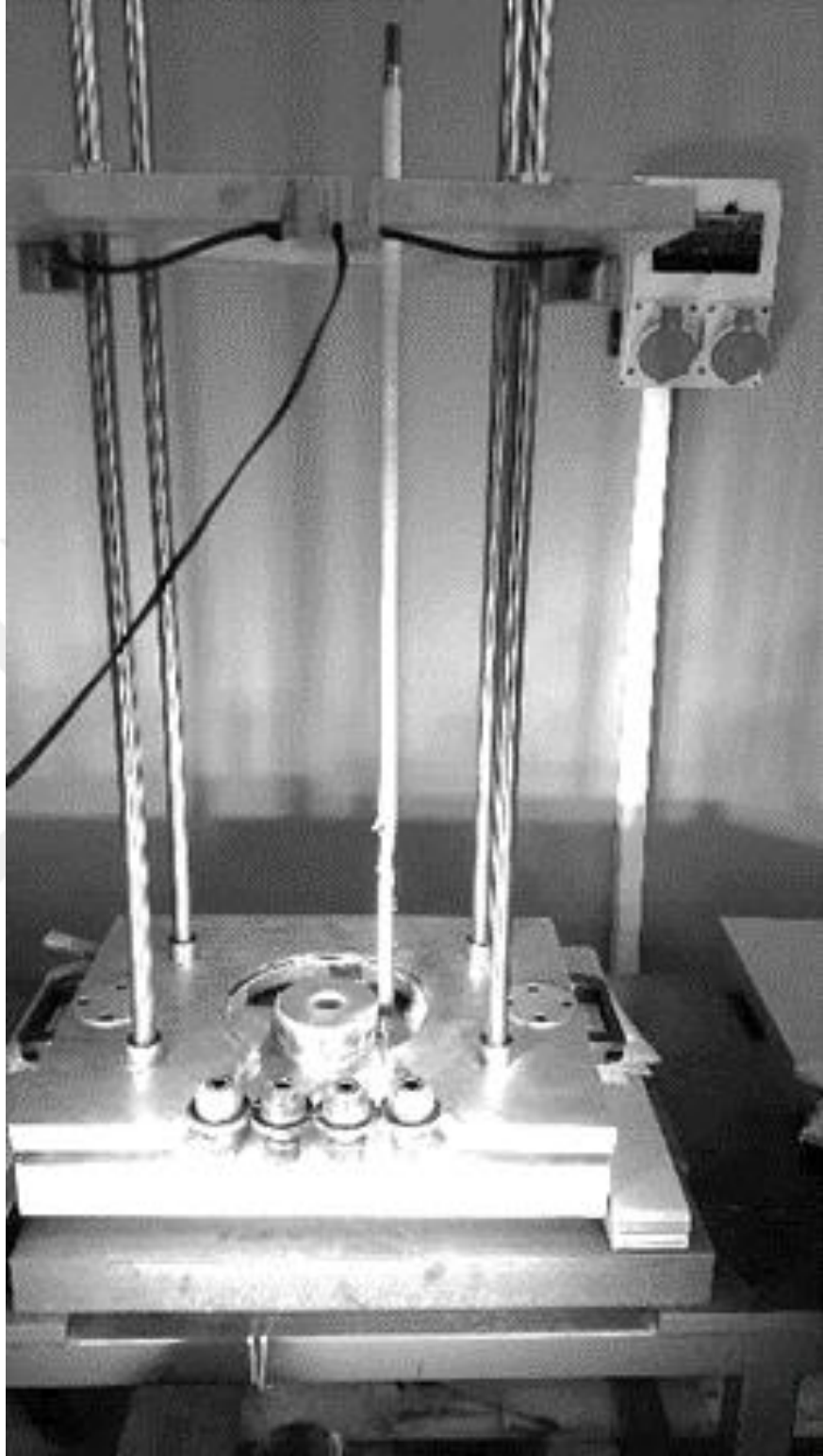
Test düzeneğinde belirli hızlara, önceden hesaplanmış yüksekliklerden serbest düşme neticesinde ulaşılmaya çalışılmıştır. Genel olarak tüm sürtünmeler önemsiz olarak varsayılmış ve bu varsayım testler sonucunda yapılan ölçümlerce de doğrulanmıştır.

Test düzeneği 3 paralel plakaya sahiptir. En altta 50 mm kalınlığında alüminyum bir plaka tüm mekanizmaya temel oluşturmakta ve rijit bir davranış sergilemektedir.

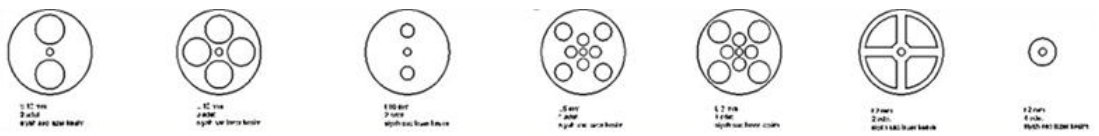
Ortada, ağırlığı üstü noktada tutmaya yarayan ve serbest düşme esnasında zemine paralelliği sağlayan ve 25mm kalınlığında alüminyum malzemedan yapılan refakatçi plaka bulunmaktadır. Bu plaka malzeme darbe dayanımı yüksek olan bir alümiyum çeşidinden imal edilmiştir. Yine bu refakatçi plaka HSC tarafından tüm darbe anının verimli görüntülerinin alınmasına izin vermesi için ortasında V şeklinde bir açıklığa sahiptir. En üstte ise kestamid malzemedan 25mm kalınlığında üst plaka bulunmakta olup; amacı, lineer rulmanların ilerlediği millerin birbirine paralelliklerini ve zemine dikliklerini sağlamak ve refakatçi plakayı ve dolayısı ile darbe kütlelerini istenen serbest düşürme mesafesinde tutmaktır. Mekanizmada 4 adet birbirine paralel ve yukarıda belirtildiği gibi zemine dik 20 mm çapında krom kaplanmış indüksiyonlu miller bulunmakta ve lineer rulmanlara yataklık yapmaktadırlar. 2 adet üst plakaya monte edilmiş elektro mıknatıs ile refakatçi plakaya monte edilmiş çelik plakalar arasında yaratılan kontrollü manyetik çekim sayesinde kütleler istenen seviyede tutulmakta ve istendiği anda bırakılabilmektedir. Manuel bir switch ile kumanda edilen bu mıknatıs sayesinde HSC ile düşme arasında eş zamanlılık kolaylıkla sağlanmaktadır. Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.6’te test düzeneğine ait resim, foto ve teknik resimler bulunmaktadır. Numune malzemenin geometrisine uyacak şekilde işlenmiş bir çelik numune tutucu blok ile numune darbeye hazır halde tutulmaktadır. Çok farklı kütlede testleri yapabilmek için kütleler, hemen hemen aynı çaplarda fakat farklı kalınlık ve boşaltmalar ile imal edilmişlerdir (Şekil 1.4). Kütlelerin büyüklük ve miktarları Şekil 1.5’te gösterilmektedir.



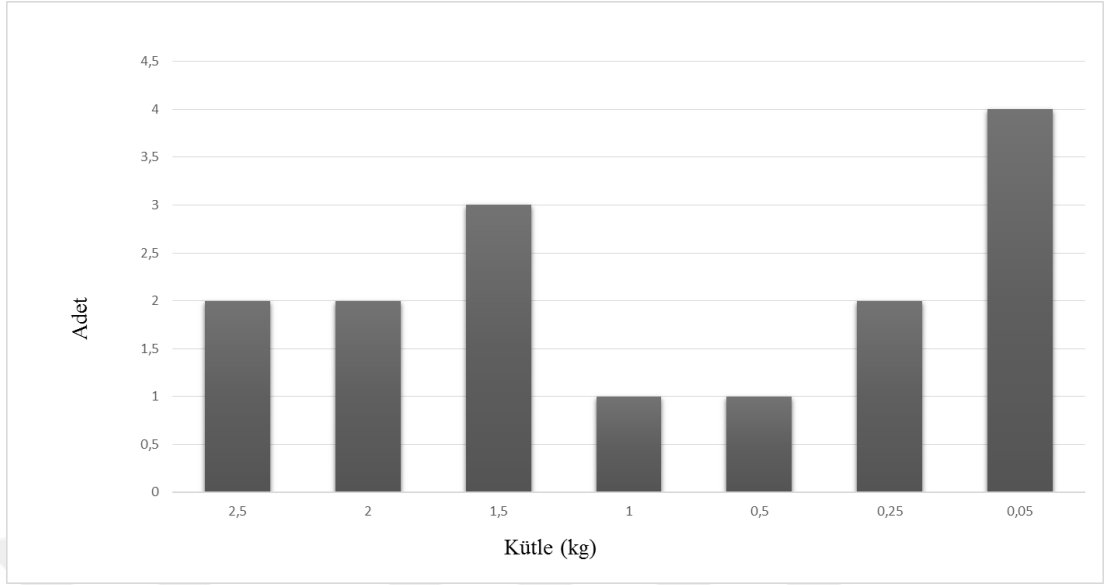
Şekil 1.2. Deney düzeneğinin mekanik tasarımı



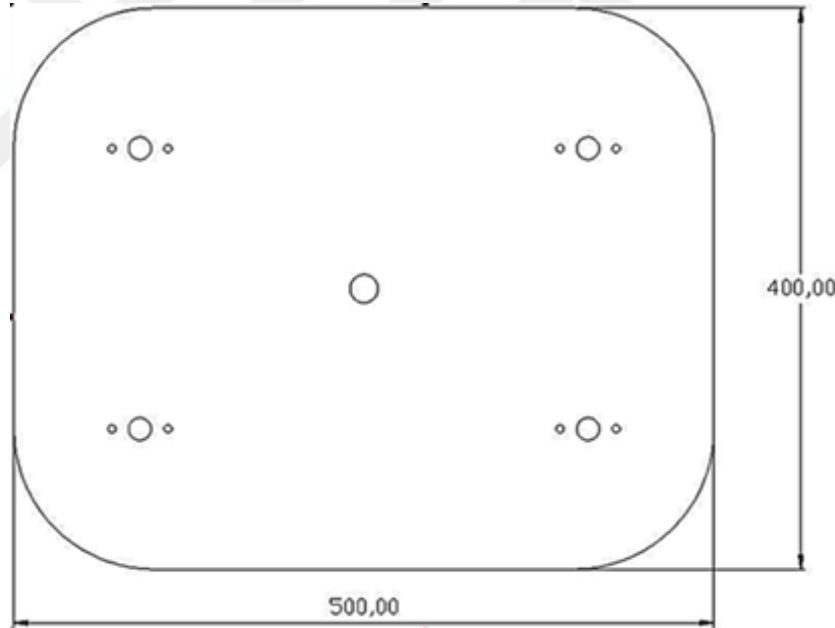
Şekil 1.3. Deney düzeneği genel fotoğrafı



Şekil 1.4. Testler için farklı kütleler



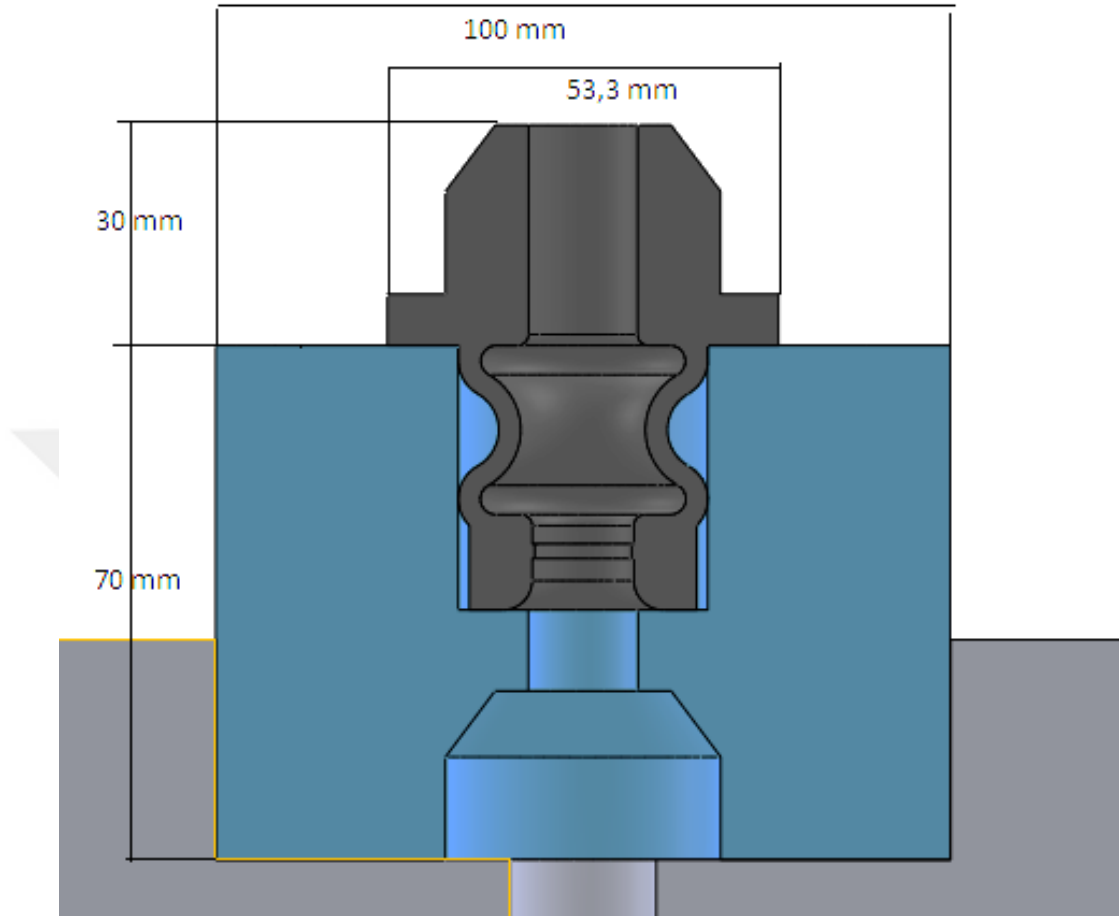
Şekil 1.5. Test kütleleri ve adetleri dağılımı



Şekil 1.6. Temel plaka – Alüminyum

Numune, bir otomobil radyatörünün titreşim ve darbe yüklerinden korunmasını sağlamaya çalışan bir radyatör takozu olup, EPDM (Etilen Propilen Dien Polimer) kauçuğundan imal edilmiş SAE J200 M3BA malzeme kodunda bir parçadır. Test düzeneğinde aracılığıyla serbest düşme ile elde edilmiş belirli momentumlarda darbe yüklerine maruz kalan bir lastik numunedir. Numunenin 3 boyutlu kesit görüntüsü Şekil 1.7'deki gibidir. Yüksek hızlı kameranın konumunu, düşme yüksekliğini

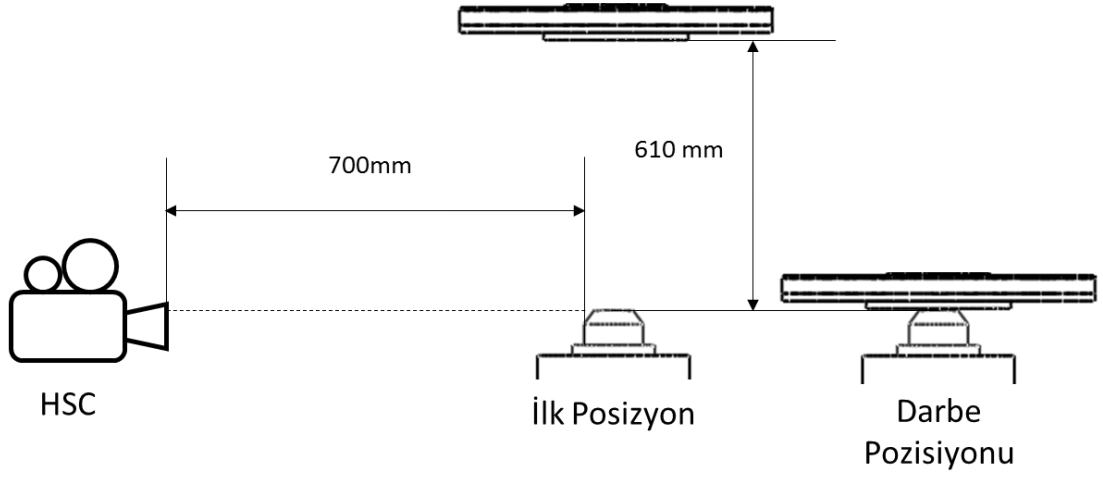
gösteren skeç resim Şekil 1.8'deki gibidir. Şekil 1.9'de de deney düzeneğinin genel görünümü mevcuttur.



Şekil 1.7. Test numunesi kesit

Mekanizma tasarımında oluşturulan temel tasarım kriterleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Tablo 2.3'te elde edilen en yüksek darbe yüklerine göre, temel plaka, 5800N'dan çok daha yüksek yüklere (güvenlik faktörü ilavesi ile) dayanabilmeli.
- Yine temel plaka darbe sırasında oluşan yüklerde rijitliğini koruyabilmeli. Bir diğer deyişle, darbe anındaki numunedeki deformasyon miktarı (Δh_{numune}), deney düzeneğinin deformasyon miktarından ($\Delta h_{\text{düzenek}}$) çok çok yüksek olmalı ($\Delta h_{\text{numune}} > \Delta h_{\text{düzenek}} \times 100$).
- Kayar mekanizmalardaki sürtünme çok düşük olmalı.
- Çarpma geometrisinde paralellik sağlanmalı.



Şekil 1.8. Testlerde Yüksek Hızlı Kamera (HSC) konumu ve kütlenin serbest düşüş yüksekliğini gösteren şematik çizim



Şekil 1.9. Deney Düzeneği Genel Görünüm

2. DENEYLER

Çarpma hızı, deneyde, DIN ASTM D3763-02 standardı – yük ve yer değiştirme sensörleri kullanarak plastiklerin yüksek hızda yırtılma özelliklerini belirlemek için Test Metodu'na göre uyarlanmıştır. Standartta göre belirlenen hızlar 2.5, 25, 125, 200, ve 250 m/dk hızlarında olmalıdır. Deney ile de istenen bu hızlara ulaşmak için farklı yükseklikler belirlenmiş ve çarpmanın ilk başladığı anda bu hızlara ulaşacak şekilde serbest düşmenin başlangıç yükseklikleri ayarlanmıştır. Aşağıdaki tablolar, Tablo 2.1'de ve Tablo 2.2'de, darbe deneyi için teorik hesaplamalar paylaşılmıştır.

Tablo 2.3'te çarpmaya kadar olan farklı yüksekliklerden, DIN ASTM 3763'te belirtilen farklı hızları yakalamak için yapılan serbest düşmeler belli varsayımlara göre incelenmiştir. Darbe test düzeneği mekanizmasının tasarım kriterlerini oluşturmak için farklı sönümlenme mesafelerine ve kütlelerine göre teorik ivme ve kuvvetler elde edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 2.1. Standart çarpma hızları ve ilgili düşme yükseklik ve zamanları-1

		V: Darbe anında ağırlığın hızı (Darbe hızı)		Düşme için yapılan varsayımlar: 1. Yerçekimi ivmesi (g): 9,81 m/s ² 2. Rulmanlardaki sürtünme ve hava sürtünmesi yok sayılmıştır			
Miktar	Birim						
200	m/dak	ASTM D3763-02 10.4.1'den	Tekli testler için				
2,5	m/dak	ASTM D3763-02 10.4.2	Çoklu testler için				
25	m/dak						
125	m/dak						
200	m/dak						
250	m/dak						
Çarpma Hızı V _{Darbe}		Çarpma Hızı V _{Darbe}		Düşme Yükseklik (h)		Çarpmaya kadar geçen zaman (t _{düşme})	
Büyüklülük	Birim	Büyüklülük	Birim	Büyüklülük	Birim	Büyüklülük	Birim
2,5	m/dak	0,04	m/s	0,009	cm	0,004	s
25	m/dak	0,42	m/s	0,885	cm	0,042	s
125	m/dak	2,08	m/s	22,122	cm	0,212	s
200	m/dak	3,33	m/s	56,632	cm	0,340	s
250	m/dak	4,17	m/s	88,487	cm	0,425	s

Tablo 2.2. Standart çarpma hızları ve ilgili düşme yükseklik ve zamanları-2

Çarpma Hızı V_{Darbe}		Çarpma Hızı V_{Darbe}		Durma zamanı: 5mm --> t_{durma} (zaman) & a (ivme)				Durma zamanı:10mm --> t_{durma} (zaman) & a (ivme)			
				5	mm			10	mm		
Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim
				$t:2h/v$ (lineer)		$a: V^2/2h$		$t:2h/v$ (lineer)		$a: V^2/2h$	
200	m/dk	3,33	m/s	0,003	s	1111,1	m/s^2	0,006	s	555,6	m/s^2
2,5	m/dk	0,04	m/s	0,240	s	0,2	m/s^2	0,480	s	0,1	m/s^2
25	m/dk	0,42	m/s	0,024	s	17,4	m/s^2	0,048	s	8,7	m/s^2
125	m/dk	2,08	m/s	0,005	s	434,0	m/s^2	0,010	s	217,0	m/s^2
200	m/dk	3,33	m/s	0,003	s	1111,1	m/s^2	0,006	s	555,6	m/s^2
250	m/dk	4,17	m/s	0,002	s	1736,1	m/s^2	0,005	s	868,1	m/s^2

Tablo 2.3. Standart darbe hızları ve kütleleri için tahmini darbe kuvveti ve ivmesi

Durma zamanı:15mm --> t_{durma} (zaman) & a (ivme)				(Maks.) İlk kurs sırasında üretilen kuvvet: 5kg		(Maks.) İlk kurs sırasında üretilen kuvvet: 10kg	
15	mm			5	kg	10	kg
Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim	Büyüklik	Birim
$t:2h/v$ (lineer)		$a: V^2/2h$		$F: ma$		$F: ma$	
0,009	s	370,4	m/s^2	1851,9	N	3703,7	N
0,720	s	0,1	m/s^2	0,3	N	0,6	N
0,072	s	5,8	m/s^2	28,9	N	57,9	N
0,014	s	144,7	m/s^2	723,4	N	1446,8	N
0,009	s	370,4	m/s^2	1851,9	N	3703,7	N
0,007	s	578,7	m/s^2	2893,5	N	5787,0	N

1,0 kg, 2,5 kg, 5,0 kg ve 10,0 kg'lık kütlelerle 61 cm ve 25 cm yükseklikten serbest düşmeler gerçekleştirilmiştir. Altta Tablo 2.4'te de bu deneylerin matris halde gösterimi mevcuttur.

Tablo 2.4. Deneyler Matrisi

		KÜTLE			
		1,0 kg	2,5 kg	5,0 kg	10,0 kg
DÜŞME	25 cm	#1.1.	#1.2.	#1.3.	#1.4.
YÜKSEKLİĞİ	61 cm	#2.1.	#2.2.	#2.3.	#2.4.

Darbe aralığı ve HSC kaydı zamanı çok dar olduğu için, aynı anda veya çok küçük faz farkı ile düşmenin ve HSC kaydının başlatılması ayrıca önemli idi. HSC kontrolü, kendi programı üzerinden, bilgisayardan yapılırken, düşme testi için üst seviyede tutmaya yarayan elektromıknatısların kontrolü bir anahtar ile manuel olarak yapılmıştır. İki adet elektromıknatıs kütle refakat plakasını ve dolayısı ile kütleleri taşımak için mekanizmanın sağında ve solunda birer adet olacak şekilde kullanılmıştır. Her iki elektromıknatıs da aynı özelliklerde olup, her biri tek başına kullanıldığında 65 kg'lık kütleleri taşıyabilecek kapasitede ve 12 volt potansiyel fark altında 9,7 W güç çekecek karakteristiklere sahiptir. Deneylerdeki yüksek hızlı kameranın kayıt hızı 8000 fps olarak seçilmiştir. Kameranın bu kayıt hızındaki görüntü çözünürlüğü 512x128 piksel idi. Bu yüzden de kayıt alanı olarak, tüm serbest düşme ve çarpma olayında, ancak, parçaya odaklanma yapılabilmektedir. Darbe görüntüleri HSC ile elde edildikten sonra, yine HSC'ye ait yazılım (Photron Fastcam Viewer PFV ver.3541) ile kayıt altına alındı ve yine aynı yazılım yardımı ile analiz edilmiştir. Bu çalışmadaki asıl amaç, alınan numunenin davranışlarını inceleyerek tüm geometrisi için analizler çıkarmak yerine, bir viskoelastik malzemenin genel olarak davranışlarını incelemek ve uyumlu ve geçerli bir FEM oluşturmaktır. Bu yüzden dikey olarak tek eksenli bir sıkışma ölçümleri HSC görüntülerinden elde edilmiş, Excel yardımı ile analiz edilmiştir. Tablo 2.5'te örnek bir test için temel deneysel sonuçları ve analizleri sunulmaktadır. Analizlerde, numune sıkıştırılma miktarının zamana bağlı değişimi sayesinde zamana göre hız, ivme ve erk değişimleri türetilenmiştir. Darbe anından önceki serbest düşme, olması gerektiği gibi, 2. dereceden bir polinoma sahip eğilim çizgisi ile temsil edilebilirken, darbe başlangıcından itibaren 4. derece veya üstü bir polinoma sahip eğilim çizgisi ile temsil edilmiştir. Doğru eğilim çizgisinin bulunabilmesi, hızların ve ivmenin, dolayısıyla kuvvet ve enerjinin, belirlenebilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu yüzden de ortalama karekök değeri 0,998'den büyük olacak bir eğilim çizgisi kaçınıcı derece polinomda sağlanabiliyorsa o dereceden bir eğilim çizgisi seçilmiştir.

Tablo 2.5. Örnek bir test için deneysel sonuçlar

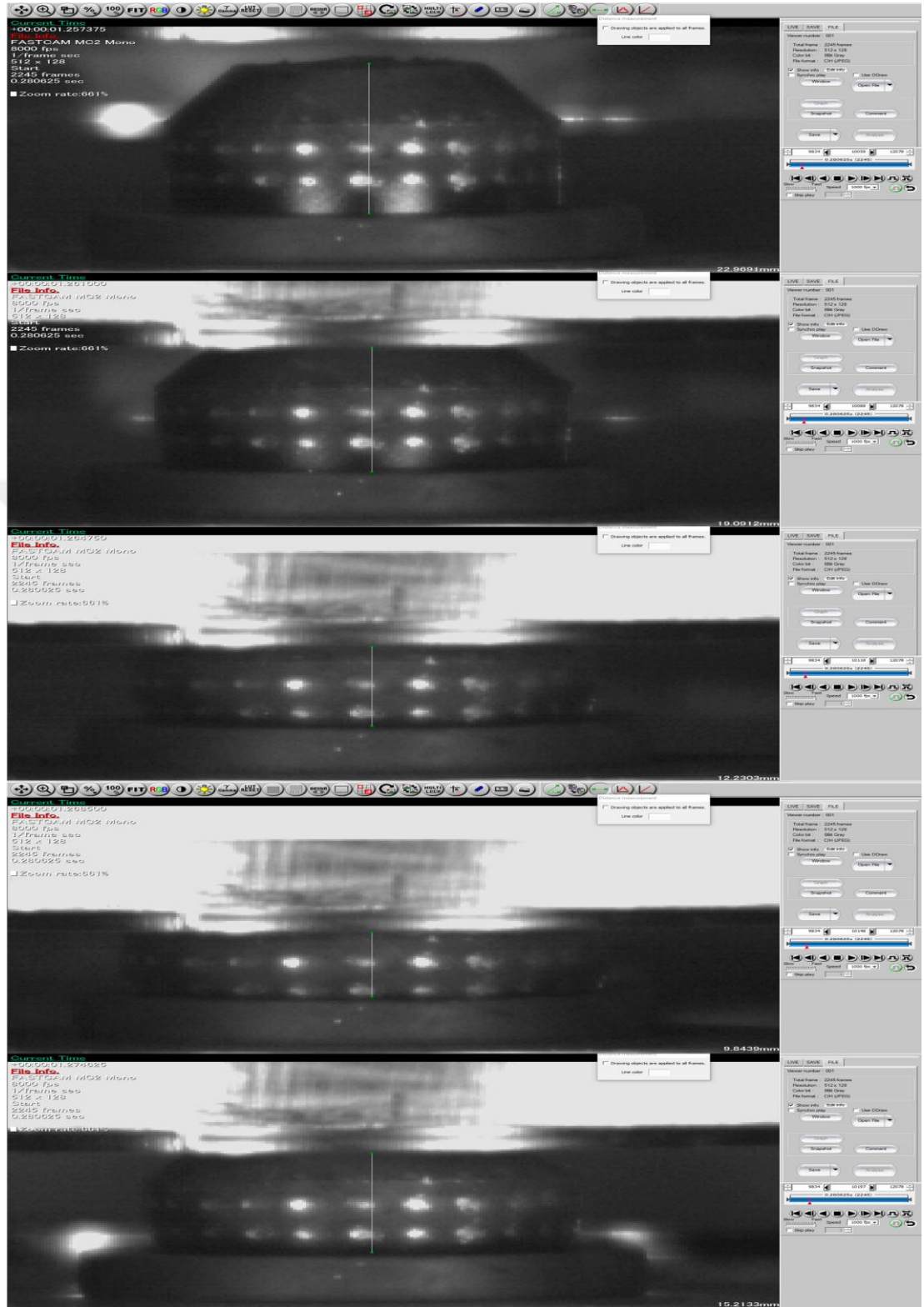
[illegible]

Tablo 2.4’te belirtilen deneylere ait, HSC tarafından alınan görüntülerin örnek ölçümlendirilmesi aşamaları aşağıdaki şekillerdeki (Şekil 2.1 - Şekil 2.8) gibidir. Aynı şekillerde malzemenin toplam deformasyon aralığının yakın aralıklarla bölünmüş zamanlarda alınan farklı görüntüleri mevcut olup, bu görseller ile toplam şekil değiştirmenin nasıl meydana geldiği anlatılmıştır. Alttaki şekillerde örnekler birkaç görsel ile aktarılsa da, 15 ms gibi kısa bir darbe süresince ortalama alınan ve analiz edilen görüntü adedi 100-150 arasında olmuştur.



Şekil 2.1. 25 cm yükseklikten 1,0 kg kütleinin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 9,01 ms)

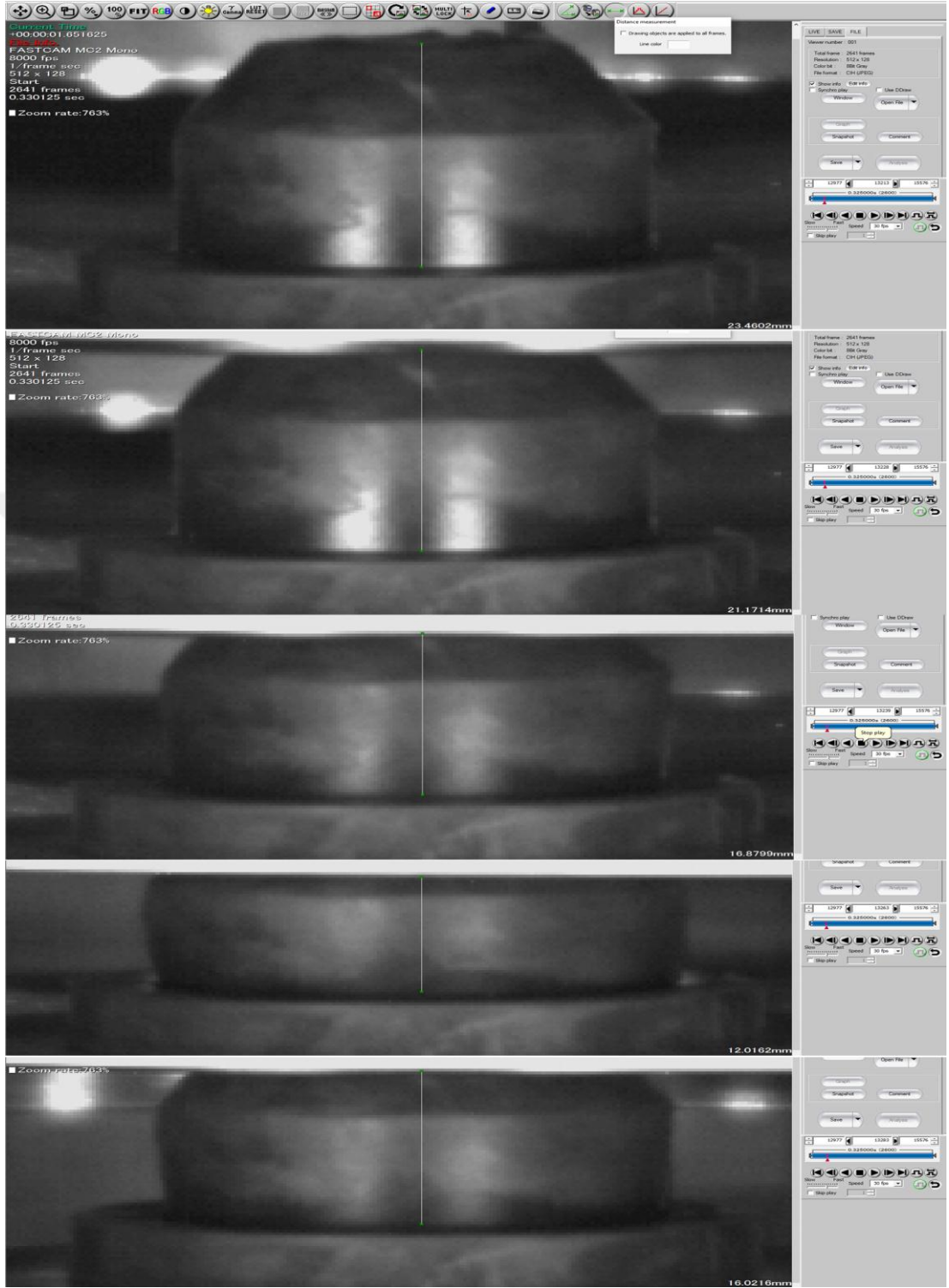




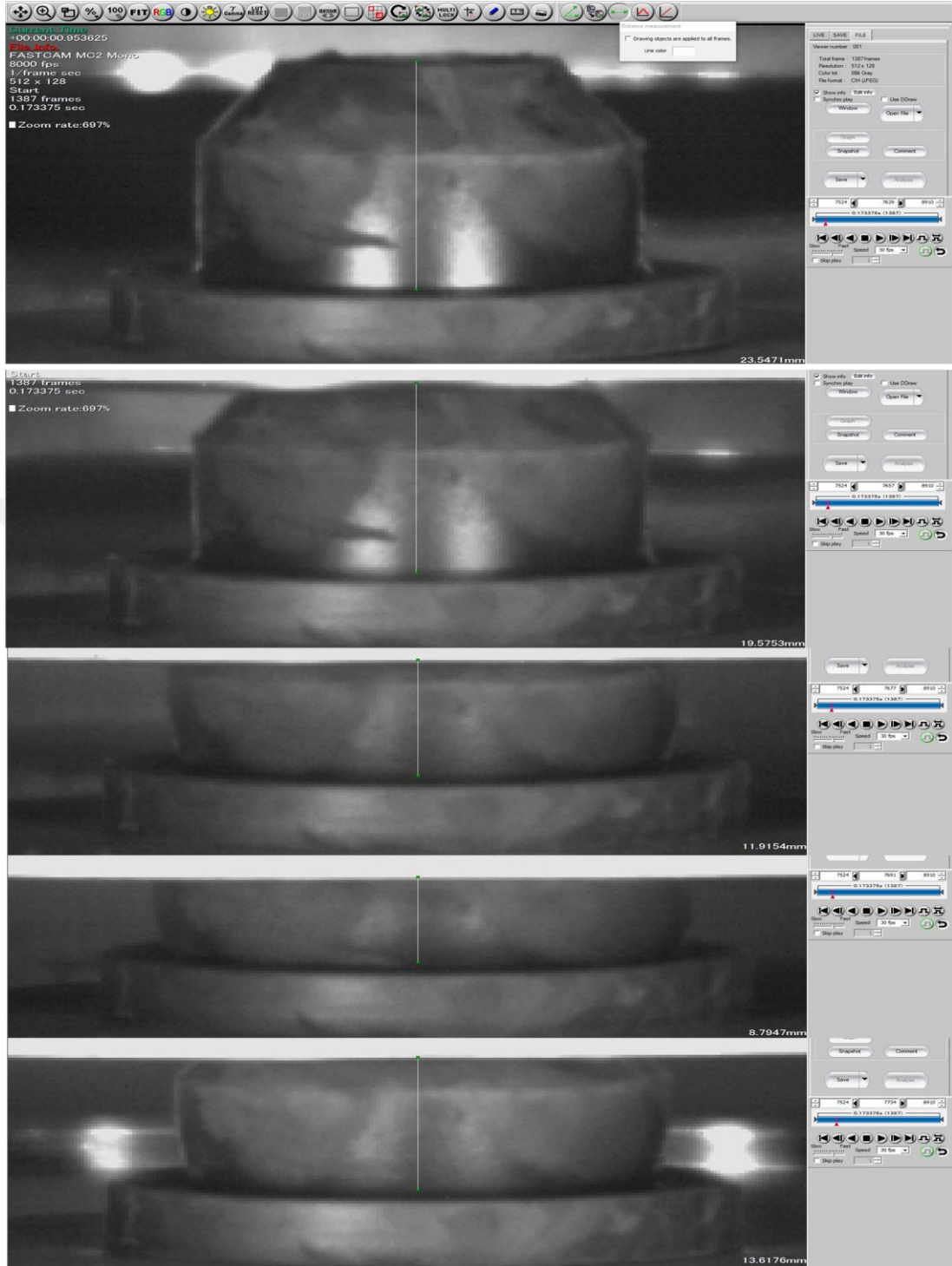
Şekil 2.3. 25 cm yükseklikten 5,0 kg kütleinin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 18,0ms)



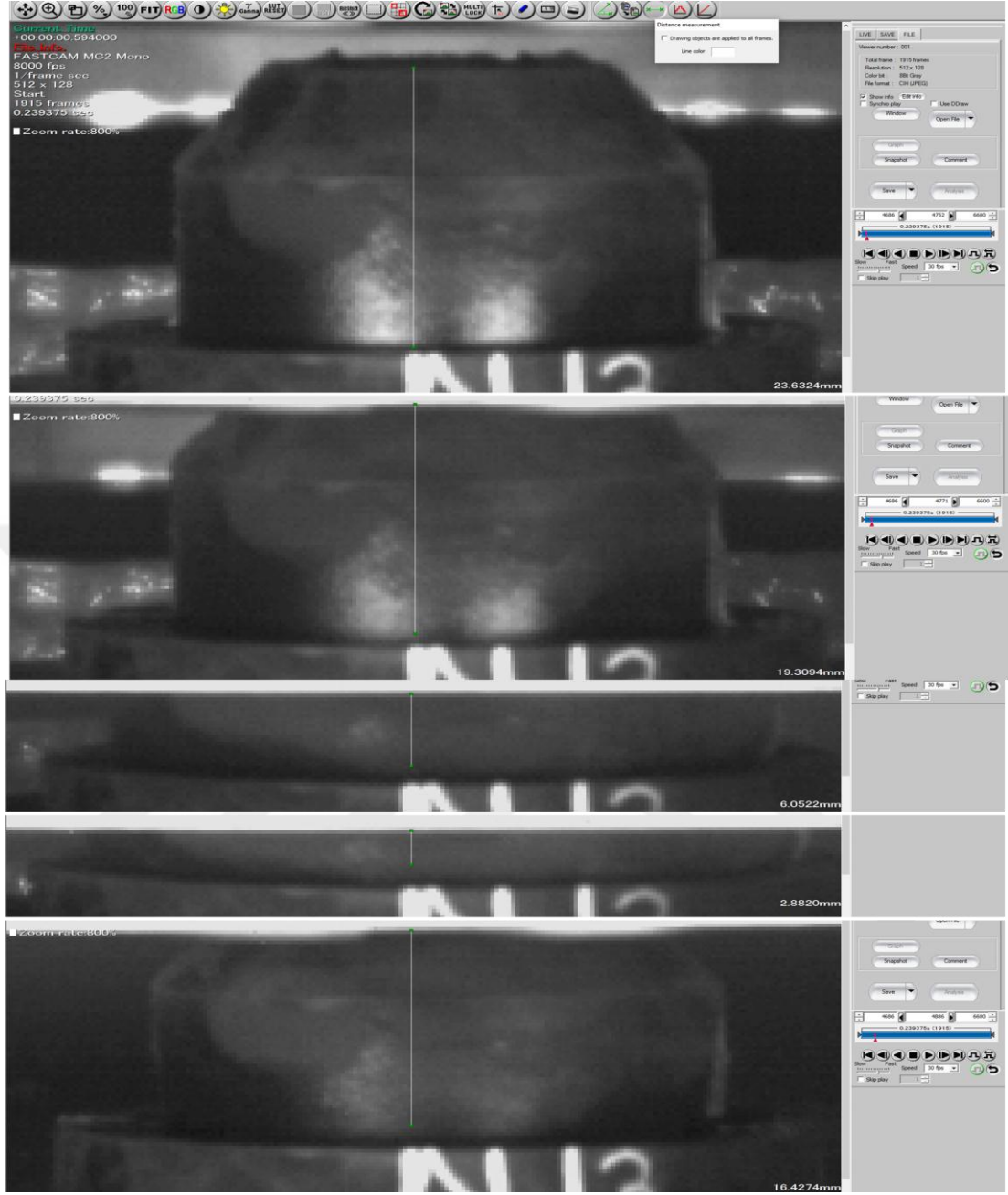
Şekil 2.4. 25 cm yükseklikten 10,0 kg kütleinin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 20,0 ms)



Şekil 2.5. 6 1cm yükseklikten 1,0 kg kütleinin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 10,0ms)

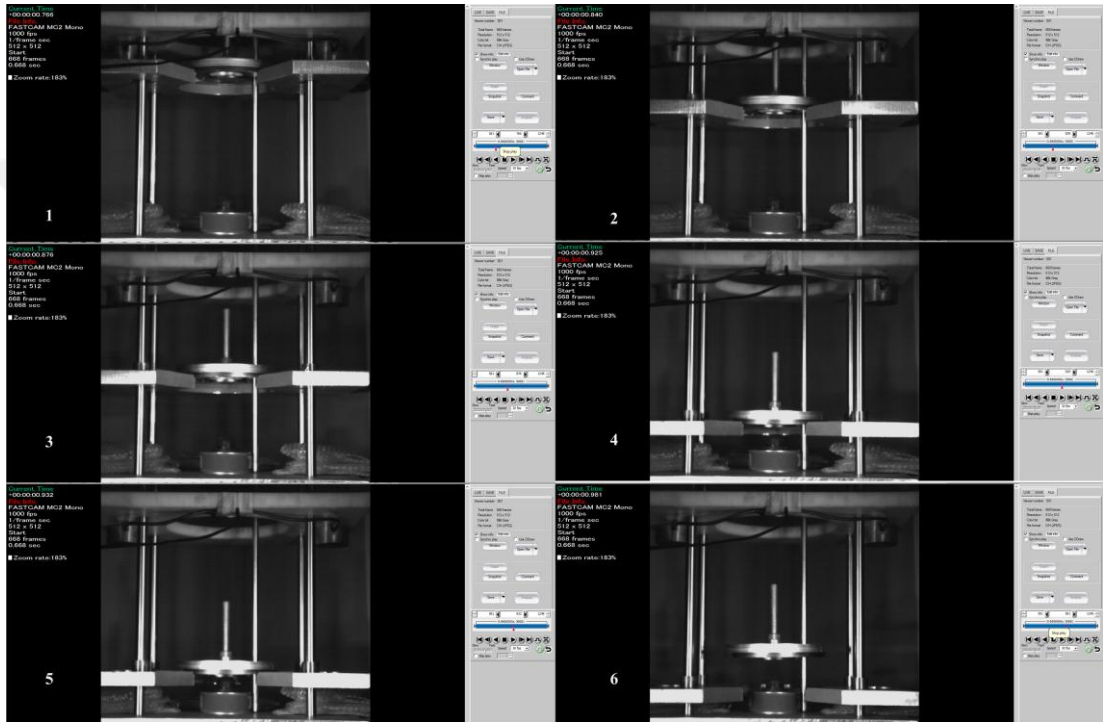


Şekil 2.6. 61cm yükseklikten 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 12,0 ms)



Şekil 2.7. 61cm yükseklikten 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi sonucu gerçekleşen darbe testi (Toplam 17,5ms)

Deneylerde, tüm serbest düşme, kameranın darbe alanına daha iyi odaklanmasını ve daha fazla veri ve görüntü alınabilmesini sağlamak için kayıt altına alınmamıştır. Ancak aşağıdaki Şekil 2.9’da serbest düşme adım fotoğraflarında gösterildiği gibi bir serbest düşme deneyi gerçekleştirilmiş, HSC ile kayıt altına alınmıştır. Tablo 2.6 ve Tablo 2.7’de gösterildiği gibi, sırasıyla 25cm ve 61cm’den serbest düşmelerdeki, sürtünme kayıplarının yok sayılabilir düzeyde olup olmadığını doğrulamak için ayrıca analizler gerçekleştirilmiştir.



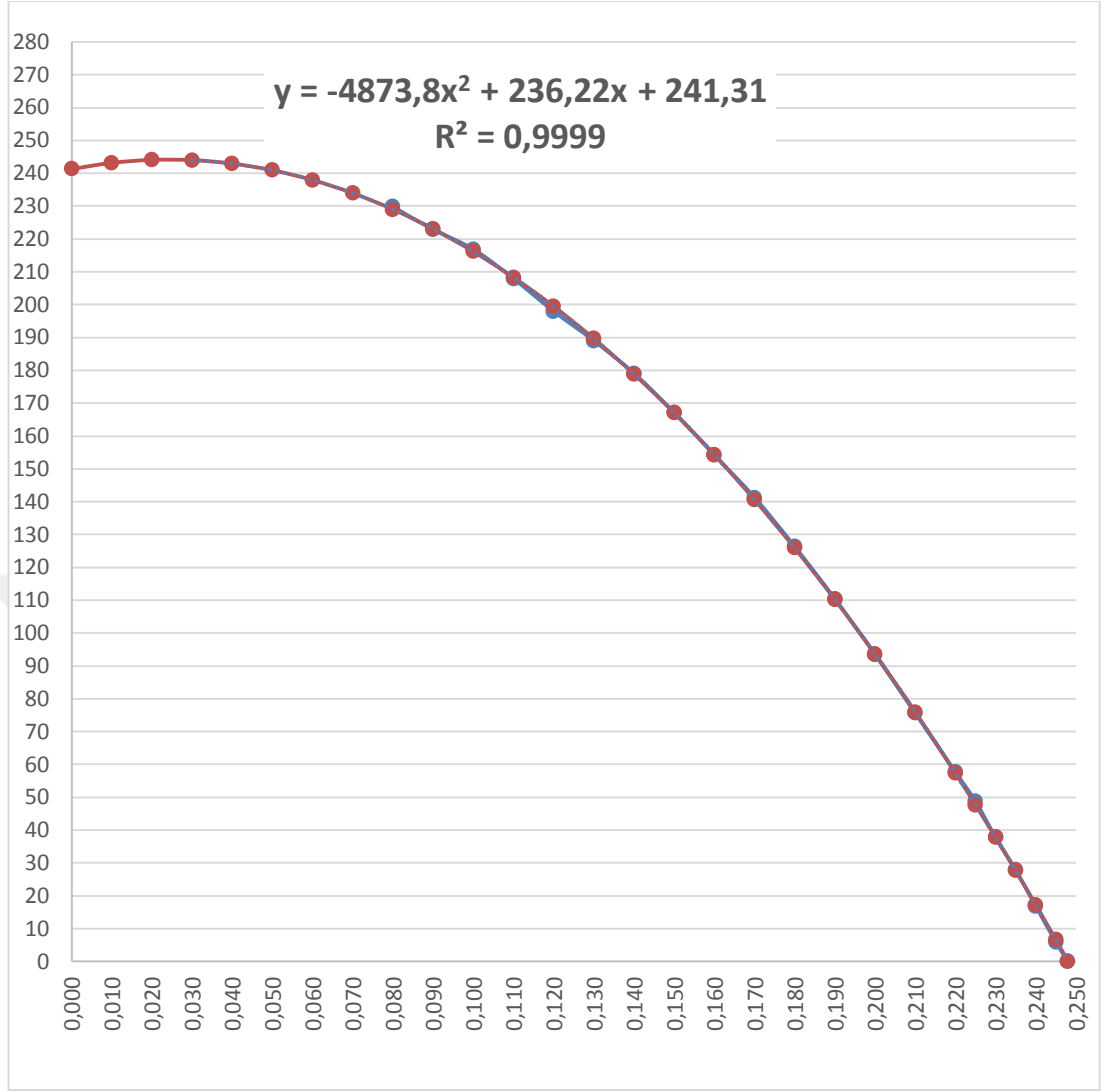
Şekil 2.9. 25 cm yükseklikten serbest düşme

Tablo 2.6. 25 cm'den serbest düşme analizi

Deney Adı		25 cm 5 kg serbest dusme					
Kamera Çekim Hızı (fps)		1000					
y = -4873,8x ² + 236,22x + 241,31		R ² = 0,9999 (mm)					
v=-9746x+236,22		(mm/s)					
a=-9746		(mm/s ²)					
Deneysel Veriler							
			y	Dy/Dt	(dy/dt)	(d ² y/dt ²)	
Peryot	Kare#	Zaman (s)	y (yüksekl ik) (mm)	y1 (mm) (eğilim çizgisi)	v1 (m/s)	v (m/s)	a (m/s ²)
t0	685	-	249,7	241,3		0,236	-9,746
t1	695	0,01	248,7	243,2	-0,099	0,139	-9,746
t2	705	0,02	248,7	244,1	0,000	0,041	-9,746
t3	715	0,03	247,7	244,0	-0,100	-0,056	-9,746
t4	725	0,04	245,7	242,9	-0,199	-0,154	-9,746
t5	735	0,05	242,8	240,9	-0,298	-0,251	-9,746
t6	745	0,06	237,8	237,9	-0,499	-0,349	-9,746
t7	755	0,07	234,8	234,0	-0,297	-0,446	-9,746
t8	765	0,08	229,8	229,0	-0,498	-0,543	-9,746
t9	775	0,09	222,9	223,1	-0,696	-0,641	-9,746
t10	785	0,10	216,9	216,2	-0,597	-0,738	-9,746
t11	795	0,11	207,9	208,3	-0,896	-0,836	-9,746
t12	805	0,12	198,0	199,5	-0,994	-0,933	-9,746
t13	815	0,13	189,0	189,6	-0,896	-1,031	-9,746
t14	825	0,14	179,1	178,8	-0,995	-1,128	-9,746
t15	835	0,15	167,1	167,1	-1,194	-1,226	-9,746
t16	845	0,16	154,2	154,3	-1,293	-1,323	-9,746
t17	855	0,17	141,3	140,6	-1,293	-1,421	-9,746
t18	865	0,18	126,4	125,9	-1,493	-1,518	-9,746
t19	875	0,19	110,4	110,2	-1,592	-1,616	-9,746
t20	885	0,20	93,5	93,6	-1,693	-1,713	-9,746
t21	895	0,21	75,6	76,0	-1,790	-1,810	-9,746
t22	905	0,22	57,7	57,4	-1,790	-1,908	-9,746
t23	910	0,23	48,8	47,7	-1,790	-1,957	-9,746
t24	915	0,23	37,8	37,8	-2,188	-2,005	-9,746
t25	920	0,24	27,9	27,7	-1,990	-2,054	-9,746
t26	925	0,24	16,9	17,3	-2,192	-2,103	-9,746
t27	930	0,25	6,0	6,6	-2,188	-2,152	-9,746
t28	933	0,25	0,0	0,1	-1,987	-2,181	-9,746

Tablo 2.7. 61 cm'den serbest düşme analizi

Deney Adı		d17 61 cm 5 kg N13 ters					
Kamera Çekim Hızı (fps)		8000					
t ₀ (Çarpma başlangıç karesi)		4760					
y = -1.242.305.588,40308x ⁴ + 35.585.208,32404x ³ - 15.730,78714x ² - 4.224,09873x + 24,60693		(mm)					
R ² = 0,99670							
Deneysel Veriler							
Peryot	Kare#	Zaman (s)	y	y	Dy/Dt	(dy/dt)	(d ² y/dt ²)
			y	y1 (mm)			
			(yükseklik)	(eğilim	v1 (m/s)	v (m/s)	a (m/s ²)
			(mm)	çizgisi)			
t0	4760	-	23,6	23,6	-2,47	-4,22	-1412,0
t1	4761	0,00013	23,6	23,3	-2,64	-4,23	-1309,7
t2	4762	0,00025	23,3	22,9	-2,80	-4,23	-1210,2
t3	4763	0,00038	22,7	22,6	-2,95	-4,22	-1113,5
t4	4764	0,00050	22,4	22,2	-3,08	-4,21	-1019,5
t5	4765	0,00063	21,8	21,8	-3,20	-4,20	-928,4
t6	4766	0,00075	21,3	21,4	-3,31	-4,19	-839,9
t7	4767	0,00088	21,0	21,0	-3,41	-4,17	-754,1
t8	4768	0,00100	20,4	20,6	-3,50	-4,15	-670,9
t9	4769	0,00113	20,1	20,1	-3,58	-4,13	-590,4
t10	4770	0,00125	19,5	19,7	-3,65	-4,11	-512,4
t11	4771	0,00138	18,9	19,2	-3,71	-4,08	-437,0
t12	4772	0,00150	18,6	18,7	-3,76	-4,05	-364,0
t13	4773	0,00163	18,1	18,3	-3,80	-4,01	-293,6
t14	4774	0,00175	17,5	17,8	-3,83	-3,98	-225,5
t15	4775	0,00188	17,2	17,3	-3,85	-3,94	-159,9
t16	4776	0,00200	16,6	16,8	-3,87	-3,90	-96,7
t17	4777	0,00213	16,0	16,3	-3,88	-3,86	-35,8
t18	4778	0,00225	15,7	15,8	-3,88	-3,81	22,8
t19	4779	0,00238	15,1	15,4	-3,87	-3,76	79,1
t20	4780	0,00250	14,9	14,9	-3,86	-3,71	133,2
t21	4781	0,00263	14,3	14,4	-3,84	-3,66	185,1
t22	4782	0,00275	14,0	13,9	-3,81	-3,61	234,8
t23	4783	0,00288	13,4	13,4	-3,78	-3,55	282,4
t24	4784	0,00300	13,1	13,0	-3,74	-3,49	327,8
t25	4785	0,00313	12,5	12,5	-3,70	-3,43	371,2
t26	4786	0,00325	12,2	12,1	-3,65	-3,37	412,6
t27	4787	0,00338	11,6	11,6	-3,60	-3,31	451,9
t28	4788	0,00350	11,4	11,2	-3,54	-3,24	489,3



Şekil 2.10. 25 cm'den serbest düşme eğrisi (eğilim çizgisi)

Yükün serbest düşüşü sırasında alınan HSC kayıtlarına göre, zamana bağlı yükseklik eğrisi Şekil 2.10'da verilmiştir. $9,81 \text{ m/s}^2$ 'lik yerçekimi ivmesini bu grafik ile doğrulanmıştır. Dolayısı ile kameranın çekim hızının kalibreli olduğu tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalar görüntü işleme tekniklerini de kullanarak daha detaylı veri toplamaya ve deneylerden elde edilen verilerin daha kapsamlı hale gelmesi için, Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC- Digital Image Correlation) teknikleri uygulanması hedeflenmektedir.

3. HİPERELASTİSİTE TEORİSİ

Gerilme ile Birim Uzama Arasındaki İlişkiler için Bünye Denklemleri (Constitutive Equations) [14]:

Katı mekaniği, mekanik ve termal yüklere maruz kalan katı malzemelerin davranışlarını tahmin edebilmek için kullanılan fiziksel kanunların, matematiksel tekniklerin ve bilgisayar algoritmalarının bir toplamıdır. Bunun için, katıların mekanik ve termal yüklere karşı verdikleri cevapları kapsayacak korunum denklemlerinin (governing equations) oluşturulması amaç edinilir.

Bunun yanında katı mekaniği birçok çeşitli hasar mekanizmasını modellemek için kullanılabilir. Hasarın veya arızanın, ne zaman, nasıl ve ne büyüklükte olacağının tahmin edilebilmesi oldukça güçtür. Ancak hasarın fiziği, ancak uygun bir yakınsamalı bünye denklemleri kullanarak modellenenebilir. Bu matematiksel ilişkiler deneysel verilere göre kalibre edilmek zorunda ve her zaman da kusursuz olarak hasar mekanizmalarını karakterize etmez. Fakat yine de, aşağıdaki herbir amaç için çok iyi oluşturulmuş prosedürler de mevcuttur:

- Bir çatlak içeren, kırılğan veya sünek bir katıda, kırılmaya neden olan kritik kuvvetleri öngörmek
- Tekrar eden yüklere maruz kalan bir parçanın yorulma ömrünü bulmak
- Bir parçadaki gerilme-korozyon çatlağının gelişme hızını tahmin etmek
- Bir parçanın sürünme ömrünü belirlemek
- Doğrudan kırılmaya veya yorulma sonucu kırılmaya karşı parçanın dayanabileceği en yüksek çatlak uzunluğunu tahmin etmek
- Temaslı yükler altında yüzeyin aşınma hızını öngörebilmek
- Bir parçanın darbeli bir yük altında nasıl bir deformasyona maruz kalabileceği ve nasıl bir hasara uğrayacağını tahmin edebilmek

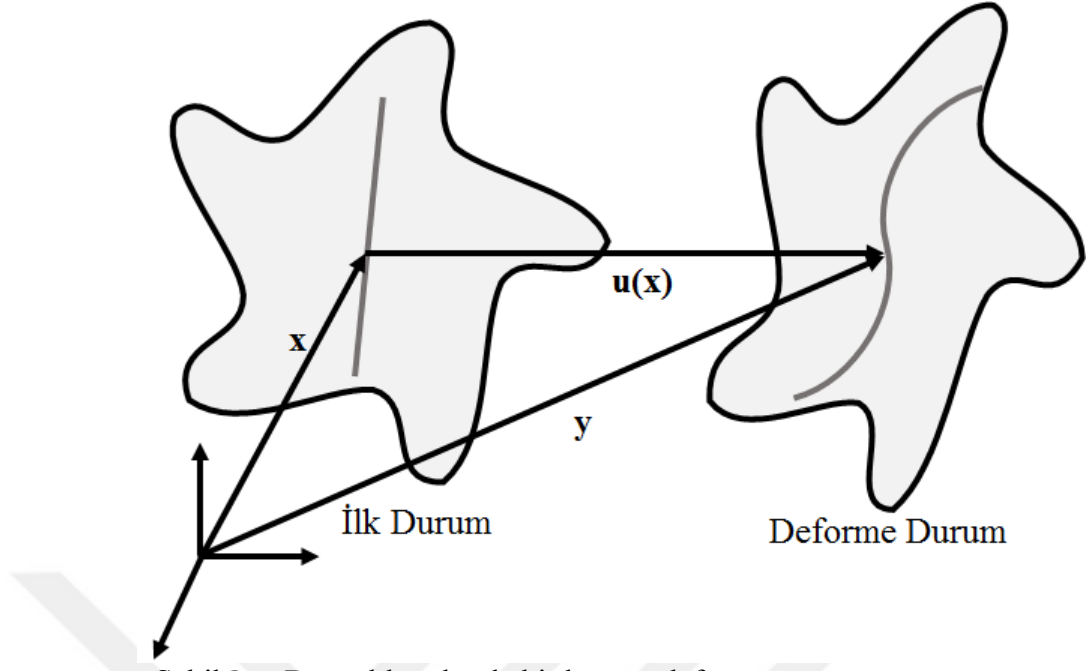
Ayrıca katı mekaniği yine sadece yapısal ve makine mühendisliği tasarımlarından başka giderek artan bir şekilde farklı uygulamaların araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Bazı uygulamalar yine aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kompozit bir malzemenin bileşenleri bazında özelliklerinin (elastik modülüs, akma gerilmesi, gerilme-birim uzama eğrisi, kırılma tokluğu v.b.) hesaplanabilmesi
- Mikroyapının (tanecik yapısı, dokuması, dispersiyon vb.) metallerin modülüs, akma gerilmesi ve pekleşmesi üzerine etkilerinin öngörülmesi
- Kırılmayı, yorulmayı, plastisiteyi ve aşınmayı da içerecek şekilde malzemelerin hasarlanma fiziğinin modellenmesi ve hasar korumalı malzemeleri tasarlamak için modellerin kullanılması
- Malzemelere uygulanan döküm, katılaştırma, alaşımların ısıt işlemleri ve ince film ve yüzey kaplamaları da içeren işlemlerin modellenmesi

Katı mekaniği tüm deforme edilebilir katılar için aşağıdaki korunum denklemlerine ihtiyaç duyar ve kullanmaya çalışır. Bu denklemleri oluşturmak için, yük altındaki bir katı parçasında meydana gelen yerdeğiştirme ve deformasyon Şekil 3.1'deki gibi incelenir [14]. Yerdeğiştirme vektörü $u(x, t)$ bir katıdaki tüm noktalar için hareketi açıklar. Yer değıştirme vektörü de

$$y = x + u(x, t) \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 3.1. Dış yükler altında bir katının deformasyonu

Hız alanı da buna bağlı

$$v_i(x_k, t) = \frac{\partial y_i}{\partial t} = \frac{\partial u_i(x_k, t)}{\partial t} \quad (4.2)$$

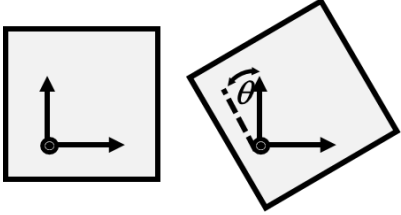
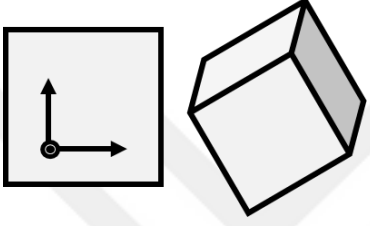
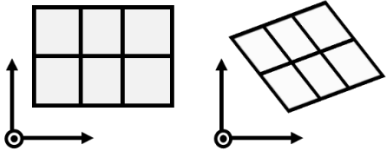
olarak tanımlanır.

Bu ifadelerle bağlı olarak da bazı deformasyonlar aşağıdaki Tablo 3.1'deki gibidir [14].

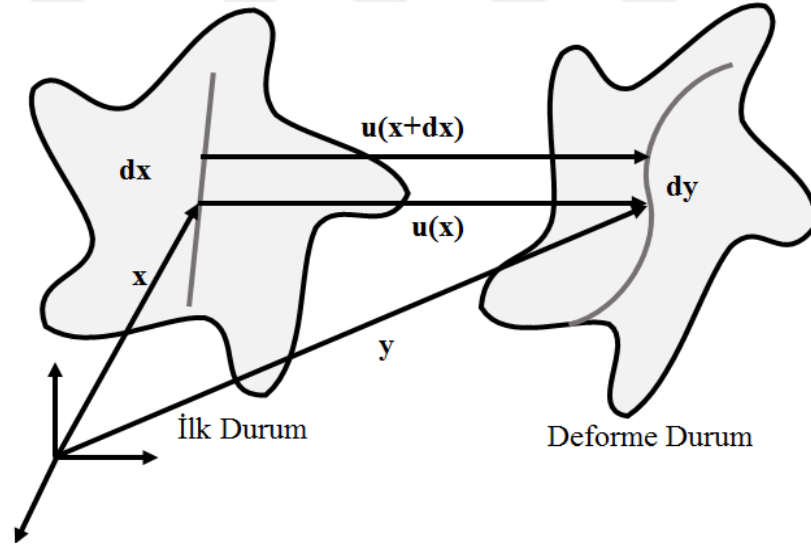
Tablo 3.1. Bazı basit deformasyon örnekleri

	Hacim korunumlu tek eksenli uzama: $y_1 = \lambda x_1$ $y_2 = x_2 / \sqrt{\lambda}$ $y_3 = x_3 / \sqrt{\lambda}$
	Basit kayma: $y_1 = x_1 + \tan \theta x_2$ $y_2 = x_2$ $y_3 = x_3$

Tablo 3.1. (Devam) Bazı basit deformasyon örnekleri

	Sayfa düzlemine dik eksen etrafında θ kadar rijit rotasyon: $y_1 = x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta$ $y_2 = x_1 \sin \theta + x_2 \cos \theta$ $y_3 = x_3$
	Genel olarak bir orijin etrafında rijit rotasyon: $y = R \cdot x \text{ veya } y_i = R_{ij}x_j,$ Burada R, $R \cdot R^T = R^T \cdot R = I, \det(R) > 0 \quad (\text{yani } R \text{ düzgün bir ortogonal matris olmalı}),$ I bir birim tensör'dür. $\delta_{jk} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$
	Genel homojen deformasyon: $y_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3 + c_1$ $y_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + A_{23}x_3 + c_2$ $y_3 = A_{31}x_1 + A_{32}x_2 + A_{33}x_3 + c_3$ veya $y = A \cdot x + c \quad y_i = A_{ij}x_j + c_i$ A_{ij} sabittir. Homojen deformasyonun fiziksel önemi katı model içindeki tüm düz çizgilerin, deformasyondan sonra yine düz çizgi olarak kalmasıdır. Sonuç olarak, katı içinde tüm düz noktalar, aynı şekil değişimini gösterir. Yukarıda listelenmiş tüm deformasyonlar, homojen denklemlerin birer örneğidir.

Deformasyon gradyanları ve yerdeğiştirme gradyanları kavramı ise homojen deformasyon kavramının kabul edilemeyeceği durumlarda, bir katı haciminde sonsuz küçük değerdeki çizgisel elemanların şeklindeki değişimin miktarını belirlemek için tanıtılmıştır. şekil 3.2’de deforme olmamış orijinal konfigürasyondaki düz bir çizginin deforme olduktan sonraki hali mevcuttur [14]. Deforme edilmiş haldeki durumda çizgi pürüzsüz bir eğri haline geldiği görölmektedir. Yine de, bu durumda bile, dx uzunluğundaki bir çizgi parçasına odaklandığımızda, deforme olmuş konfigürasyondaki dy uzunluğundaki çizgi parçası da hala neredeyse bir düz çizgi olarak kalmaktadır. Bu yüzden katı ne kadar karmaşık deformasyona maruz kalmış olsa bile, sonuz küçüklükteki çizgi parçaları deformasyon nedeni ile çok çok küçük miktarlarda uzatılmış ve döndürölmüş olacaktır.



şekil 3.2. Sonsuz küçüklükteki çizgi elemanlarının bir katıdaki deformasyonu

Burada dx ve dy sonsuz küçüklükteki çizgi parçaları arasında alttaki gibi basit bir ilişki kurulabilir

$$dy = F \cdot dx \quad \text{veya} \quad dy_i = F_{ik} dx_k \quad (4.3)$$

Matriks denklemi hali de aşağıdaki gibi oluşur

$$\begin{bmatrix} dy_1 \\ dy_2 \\ dy_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & 1 + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & 1 + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

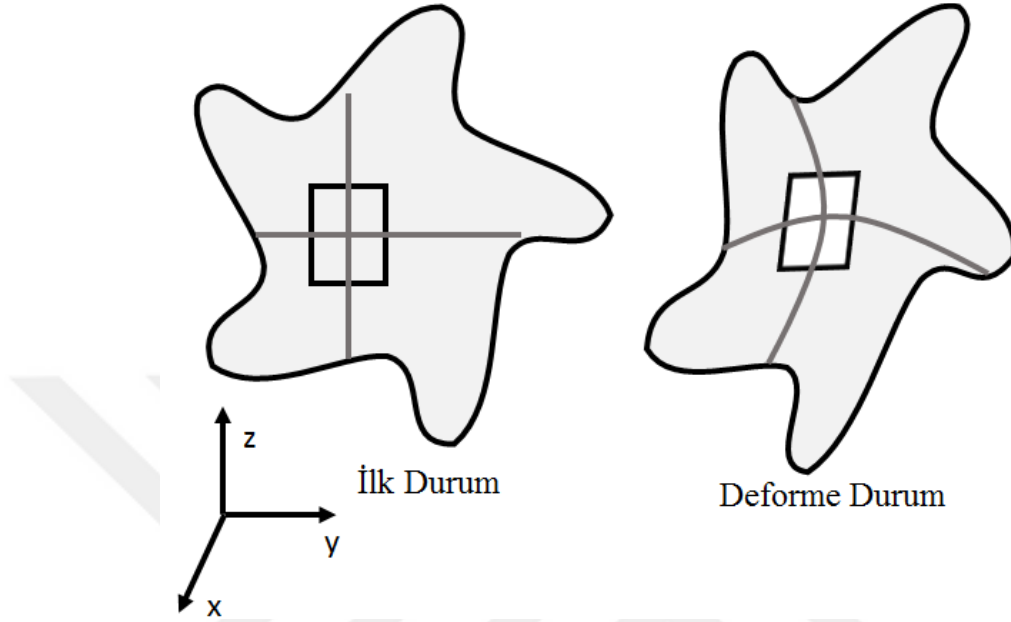
Yukarıdaki denklemler ve geliştirilmiş halleri sonlu elemanlarda özellikle lineer davranış sergileyen malzemeler için kullanılabilir ve sonuç alınabilir olsa da lineer olmayan davranış gösteren malzemeler veya yüksek hızdaki yükler için ise geçerli sonuçlar verememektedir. Yine bu denklemler, tüm deforme edilebilir katılarda uygulanabilse de, yine de, deformasyon ölçümleri sadece iç kuvvetlere bağlı değilse çözülememektedir. Bu sebeple, malzemeler için bünyesel modeller (constitutive model) kullanılmaktadır.

Bir malzeme için bünyesel modeller, gerilme ve birim uzamaya bağlı bir denklemler seti olarak adlandırılabilir. Ancak burada sadece gerilme ve birim uzamaya değil, bunların türevleri olan, birim uzama geçmişi, birim uzama hızına ve diğer ilgili çokluklara da bağlı olarak hazırlanan denklemler ile modelleme yapılabilmektedir. Korunum denklemlerinden farklı olarak, bu bünye denklemleri genel olarak, temel fizik kanunları uygulanarak hesaplanamamaktadır. Bunun yerine, bu tez çalışmasında da olduğu gibi, bünyesel denklemler deneysel ölçümlerle örtüşürülmekte ve ikisi arasında bir uyum aranmaktadır.

Tüm bünyesel modellerde temel alınacak şekilde, bazı temel varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanıp, gerilme-birim uzama ilişkilerini geliştirirken kullanılabilirler:

- Katıdan alınan çok küçük bir numune üniform (tek biçimli) özelliklere sahip olacaktır.
- Bir katı deforme edildiğinde, başlangıçta düz olan çizgiler, süreksiz bir eğime sahip pürüzsüz eğriler haline, Şekil 3.3'te olduğu gibi, deforme olurlar [14].
- Bu demek oluyor ki, çok kısa çizgi parçacıkları (eğrilik yarıçapından çok daha küçük) deformasyon tarafından sadece gerdirilmiş ve döndürülmüş olacaktır. Dolayısıyla, yeteri kadar küçük bir hacim elemanı deformasyon gradyanı tarafından karakterize olabilecektir.

- Katının bir noktasındaki gerilmeler sadece o nokta etrafında yok denecek kadar küçük hacim elemanın şeklindeki değişimlere bağlıdır. Bu yüzden, gerilme, deformasyonun gradyanı veya buradan türetilen birim uzamanın bir fonksiyonudur.



Şekil 3.3. Katıdaki iç bir malzeme elemanın deformasyonu

Önceki varsayımlar kabul edilirse, malzemeye ait uygun bir numune uniform birim uzamayı gösteren bir deneyin yapılması sayesinde, gerilme ve birim uzama arasındaki ilişki ölçümlenebilir. Yukarıdaki varsayımlara göre, gerilme uniform olmalı ve numuneye etki eden kuvvetler yardımıyla hesaplanabilmeli.

Elbette şu da bilinmeli ki, burada bahsedilen uniformluk, atomik veya mikroyapı ölçekleri kadar çok küçük ölçeklerde değil, ancak istatistiksel olarak bir uniformluktur. Yani malzemeden iki adet aynı boyutlarda numuneler kesilirse, her iki numune de aynı şekilde davranacaktır. Sürekli ortamlar modeli de; bu sebeple, ortalama gerilme ve deformasyonu, malzemenin mikroyapısal özelliklerinden büyük ancak parçanın boyutları ile kıyaslandığında küçük boyutlarda geçerli olarak tanımlamaktadır.

Bu çalışmada da olduğu gibi, yeni bir malzeme için gerilme birim uzama arasında bir ilişki ortaya koyulması gerektiğinde yerine getirilmesi gereken gereklilikler detayları ile aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Öncelikli olarak termodinamik yasalarına uymalı

- Termodinamiğin ilk kanunu, gerilmeler tarafından yapılan iş, bir katı içinde bir yeniden kazanılabilen bir iç enerji olarak depolanmalı ve ısı olarak yayılmalı der.
- Termodinamiğin ikinci kanunu, eğer bir malzeme örneği aynı birim uzama ve iç enerji ile deformasyon döngüsü başlatmaya maruz kalırsa (sabit sıcaklıkta veya çevresi ile ısıl değişim yoksa), yapılan toplam iş ya pozitif ya da sıfırdır der.
- Termodinamiğin ikinci yasası ise, bir malzeme numunesi eş birim uzama ve iç enerji ile başlayan ve biten deformasyon döngülerine (sabit sıcaklıkta veya dış ortam ile ısı alışverişi olmadan) maruz kalırsa, toplam yapılan iş ya pozitif olur ya da sıfırdır.
- Nesnellik koşullarını yerine getirmeli. Nesnellik (objectivity) de veya malzeme çerçeveden kayıtsızlık (material frame indifference) da, gerilmeyi deformasyon ölçümü ile ilişkilendiren tensör-değerli fonksiyonların, koordinasyon sistemi için temel ve merkez değişimleri altında doğru bir şekilde dönüştürmek zorunda olduğu koşuldur.

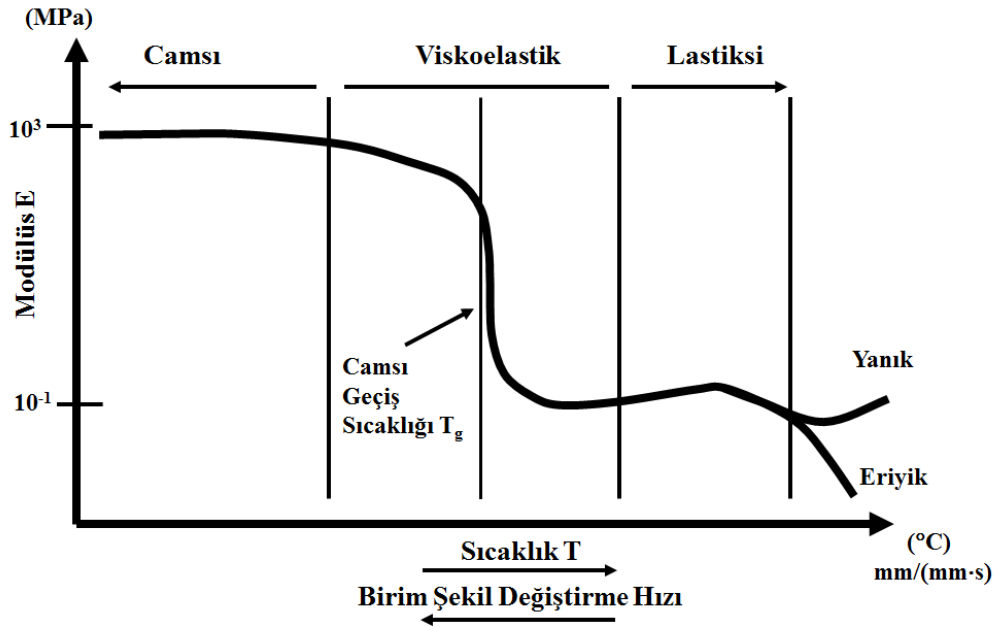
Bünyesel denklem çözümlerinde ve yine bu çalışmada kullanılan durum ise, lastik parçanın darbe yükleri altında gösterdiği hiperelastik davranışın incelenmesi ve bu davranışa uygun geçerli bir modellemenin oluşturulmasıydı. Bunun için aşağıda hiperelastisite kavramı açıklanmaya çalışılacaktır.

Hiperelastik bünyesel ilişkiler, yüksek miktarda birim uzamalara maruz kaldığında elastik olarak cevap veren malzemelerin modellenmesinde kullanılır. Bu ilişkiler, hem yüksek miktardaki birim uzamalar hem de lineer olmayan malzeme davranışları için geçerlidir. Teorinin ana uygulama alanları, büyük ve geri dönüşebilir şekil değişimlerine (süngerler gibi) maruz kalan polimerik malzemenin lastiksi davranışını modellemek ve polimerik köpükleri modellemektir.

Genel olarak tipik bir polimerin cevabı, sıcaklığa, birim uzama geçmişine ve yükleme hızına sıkı sıkıya bağlıdır. Aşağıda bu davranış, viskoelastisite teorisinin sunumunda daha detaylı incelenmektedir. Polimerlerin “camsı”, “viskoelastik” ve “lastiksi” diye adlandırılacak birçok farklı mekanik davranış rejimlerinin olduğu bilinmektedir. Bu farklı rejimler katıya sinüzoidal olarak değişen kayma gerilmelerinin uygulanmasıyla ve ortaya çıkan kayma birim uzamalarının

büyükliğünün ölçülmesiyle belli polimerler için tanımlanabilmektedir. Tipik sonuçlar, Şekil 3.4'te gösterilmiştir [14], [22]. Burada modülü (gerilmenin birim uzamaya bölünmesi) sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Şekil değiştirme hızının modülüse etkisi de sıcaklığın etkisi ile ters paralellik göstermekte olup aynı grafik üzerinde gösterilmektedir.

Kritik sıcaklıkta, camsı geçiş sıcaklığı, polimerik malzemenin mekanik cevaplarında dramatik bir değişim gözlenmektedir. Bu sıcaklığın altında, malzeme camsı olarak davranır ve daha bükülmez bir davranış sergiler. Camsı geçiş sıcaklığına yaklaşıldığında, gerilmeler sıkı sıkıya birim uzama hızına bağlı olur. Camsı geçiş sıcaklığında ise, modülüde dramatik bir düşüş gözlenir. Bu sıcaklığın üstünde, polimerin lastiksi davranış sergilediği bir rejime geçilir ki, burada malzeme tarafından verilen cevap elastik olurken, gerilme birim uzama hızına veya birim uzama geçmişine sıkı sıkıya bağlı olmayıp, modülüs de sıcaklıkla beraber artma eğilimi gösterir. Tüm polimerler, bu benzer eğilimleri gösterirler, fakat her bir rejimin uzaması ve bu rejimler içindeki detaylı davranışları katının moleküler yapısına bağlıdır. Yoğun olarak çapraz bağlara sahip polimerler (özellikle elastomerler) ideal lastiksi davranışı göstermeye daha yatkındırlar. Hiperelastik bünyesel denklemler ile işte bu lastiksi davranışa yaklaşılmaya çalışılır.



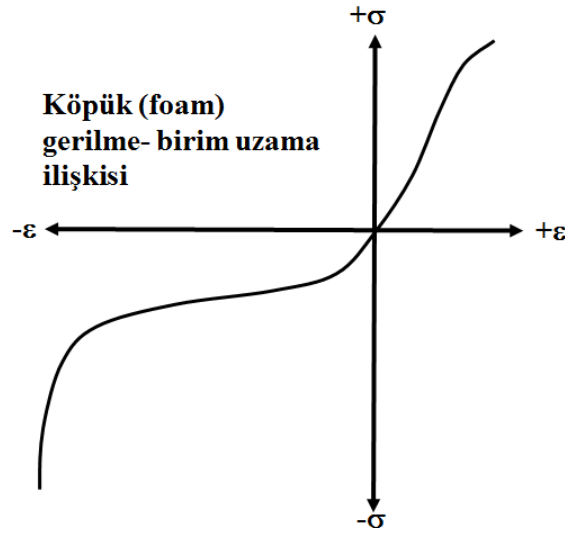
Şekil 3.4. Sıcaklık ve birim değiştirme fonksiyonu olarak tipik bir polimerin modülüsünün değişimi

Lastik katısının davranış özellikleri aşağıdaki içermektedir:

- Malzeme ideal olarak elastik olmaya çok yakındır, yani; (1) sabit sıcaklıkta veya adyabatik olarak deforme edildiğinde, gerilme sadece mevcut birim uzamanın bir fonksiyonu ve birim uzama geçmişi ve yükleme hızından bağımsızdır ve (2) davranış geri dönüşebilir, bu sayede, adyabatik veya eş sıcaklık koşulları altında birim uzamanın kapalı çevrimi sırasında yapılan herhangi net bir iş yoktur.
- Malzeme hacim değişimlerine sıkı sıkıya direnç gösterir. Kütle modülüs (hacim değişiminin gerilmenin hidrostatik bileşenine oranı) metallerinki veya kovalent bağlı katılardaki ile kıyaslanabilir düzeydedir.
- Malzeme kaymaya çok uyumludur: kayma modülüsü çoğu metalin 10.000'de 1'i kadardır.
- Malzeme izotropiktir: gerilme-birim uzama tepkileri malzemede yönden bağımsızdır.
- Kayma modülüsü sıcaklığa bağlıdır: malzeme ısıtıldığında, metallerin tam tersine, daha katı hale gelir.
- Uzatıldığında, malzeme ısı açığa çıkartır.

Polimerik köpükler (sünger gibi), bu yukarıdaki özelliklerin bazılarını da aşağıdaki gibi paylaşmaktadır:

- Geri dönüşebilir olmaya yakındır ve çok az hız ve geçmiş bağımlılığı vardır.
- Lastiklere kıyasla, çoğu köpük yüksek miktarda sıkıştırılabilir; kütle ve kayma modülleri karşılaştırılabilir düzeydedir.
- Köpükler karmaşık gerçek gerilme ve gerçek birim uzama cevaplarına sahip olup, genel olarak da Şekil 3.5'dekine benzerdir [14]. Hücre duvarlarındaki bükülmelerden dolayı, basma yükleri altında köpüğün sonlu birim uzama cevabı germeye göre oldukça farklıdır.
- Köpükler hücre yapılarına bağlı olarak anizotropik de olabilirler. Rastgele bir hücre dizilimi var ise izotropiktir.



Şekil 3.5. Bir köpük malzemenin gerilme-
birim uzama eğrisi

Sonlu elastiklik için gerilme-birim uzama ilişkilerindeki literatürü takip etmek oldukça zordur. Bu durumda, bir parça, tüm makalelerin farklı bir notasyon kullanmasından, bir parça da aynı gerilme-birim uzama ilişkisini yazmak için birçok farklı yolun mevcut olmasıdır. Onun için basılmış yayınlar üzerine yapılan genelleme sonucunda ortak payda aşağıdaki maddelerdeki gibi olup, hiperelastik modeller bu maddeler şeklinde sıralanabilir:

- Gerilme-birim uzama ilişkisini katının kendisinin birim uzama enerji yoğunluğunu W deformasyon gradyant tensörünün bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa: $W=W(F)$ olarak ifade edilir. Bu da malzemenin mükemmel bir elastik malzeme olduğunu garantiler ve sadece skalar fonksiyonlar ile çalışması gerektiği anlamına gelir. Birim uzama enerji yoğunluğunun genel şekli deney tarafından yönlendirilir ve birim uzama enerji yoğunluğu için kullanılan formül her zaman belli bir malzemeyi tanımlamak için ayarlanabilen malzeme özelliklerini içerir.
- Deforme olmamış malzemeni izotropik olduğu varsayılır, yani, malzemenin davranışı yüke göre malzemenin başlangıç yöneliminden bağımsızdır.
- Birim uzama cinsinden gerilme formülleri de birim uzama enerji yoğunluğu formüllerinin türevi ile hesaplanabilmektedir.

Sonlu elastisitede kullanılan deformasyon ölçümleri Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, bir katı yerdeğiştirme alanı $u_i(x_k)$ 'na maruz kalırsa:

- Deformasyon gradyanı ve Jacobian'ı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.5)$$

- Sol Cauchy-Green deformasyon tensörü

$$B = F \cdot F^T \quad B_{ij} = F_{ik} F_{jk} \quad (4.5)$$

- B'nin değişmeyenleri

$$I_1 = \text{trace}(B) = B_{kk} \quad (4.7)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} (I_1^2 - B \cdot \cdot B) = \frac{1}{2} (I_1^2 - B_{ik} \cdot \cdot B_{ki}) \quad (4.8)$$

$$I_3 = \det B = J^2 \quad (4.9)$$

- B'nin tüm değişmezlerinin bir alternatif seti olan $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ 'nin saf hacim değişimleri sırasında sabit kalmaktadırlar)

$$\bar{I}_1 = \frac{I_1}{J^{2/3}} = \frac{B_{kk}}{J^{2/3}} \quad (4.10)$$

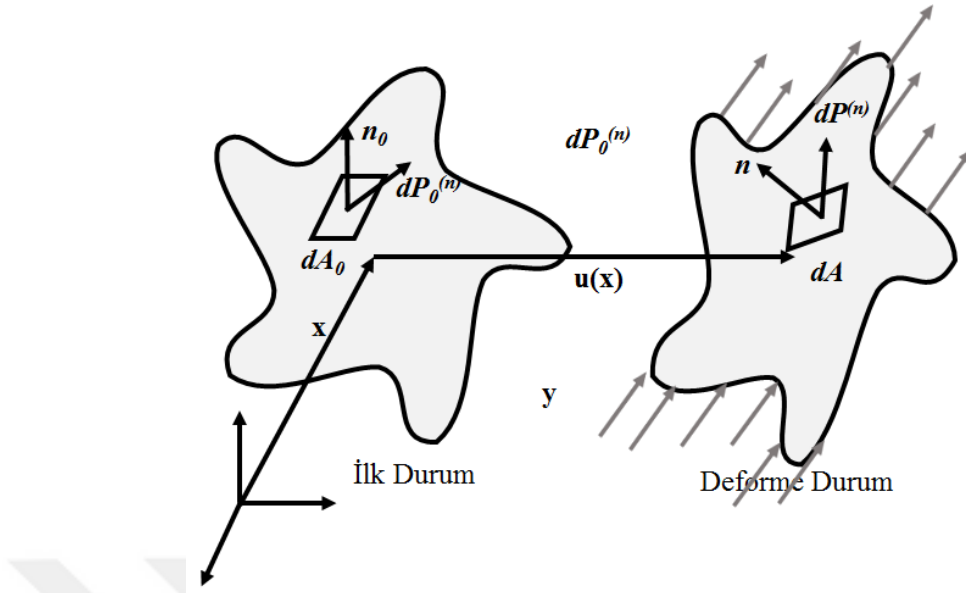
$$\bar{I}_2 = \frac{I_2}{J^{2/3}} = \frac{1}{2} \left(\bar{I}_1^2 - \frac{B}{J^{4/3}} \right) \quad (4.11)$$

$$J = \sqrt{\det B} \quad (4.12)$$

- Temel uzamalar ve temel uzama yönleri

e_1, e_2, e_3 B'nin üç özdeğeri tanımlıyor. Temel uzamalar

$$\lambda_1 = \sqrt{e_1}, \quad \lambda_2 = \sqrt{e_2}, \quad \lambda_3 = \sqrt{e_3} \quad (4.13)$$



Şekil 3.6. Dış kuvvetlere maruz kalan bir deforme edilebilen katının deformasyonu

Aşağıda, literatürde bulunan ve bu çalışmanın analiz aşamasında kullanılan birim uzama enerji yoğunluğu özel formları ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır.

Birim Uzama Enerji Yoğunluğu Spesifik Formları

- Genelleştirilmiş neo-Hookean katısı (Generalized neo-Hookean solid)

$$\bar{U} = \frac{\mu_1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{K_1}{2} (J - 1)^2 \quad (4.14)$$

Burda μ_1 ve K_1 malzeme özellikleridir. (küçük deformasyonlar için μ_1 ve K_1 kayma ve kütle modülüsüdür). Basit istatiksel mekanik işlemler $\mu_1 = NkT$ 'yi tahmin edebilir, ki N birim hacimdeki polimer zincirlerinin sayısını gösterirken, k da Boltzmann sabiti, T de sıcaklığı gösterir. Bu çok düşük sıkıştırılabilirliğe sahip lastikler için, lastik elastisite modeli olup, $K_1 \gg \mu_1$ ise kullanılabilir. Gerilme ile birim uzama arasındaki ilişki de aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{ij} = \frac{\mu_1}{J^{5/3}} \left(B_{ij} - \frac{1}{3} B_{kk} \delta_{ij} \right) + K_1 (J - 1) \delta_{ij} \quad (4.15)$$

Neo-Hookean Modelinin basit bir fonksiyona sahip olmasından tercih edilebilirliği artmış ve kauçuk malzemenin vulkanizasyon sonrası çapraz bağlanmadaki artışını

modele katarak malzemeyi uzun zincirler halinde üç boyutlu ağ yapısı ile modellemiştir [15]

- Genellenmiş Mooney-Rivlin katısı

$$\bar{U} = \frac{\mu_1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{\mu_2}{2} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{K_1}{2} (J - 1)^2 \quad (4.16)$$

Burada, μ_1 , μ_2 ve K_1 malzeme özellikleridir. Küçük deformasyonlar için, kayma modülü ve kütle modülü $\mu = \mu_1 + \mu_2$ ve $K = K_1$ şeklindedir. Bu lastik elastisite modeli, $K_1 \gg \mu_1$ zaman kullanılmalıdır. Gerilme-birim uzama denklemi de aşağıdaki gibidir. [10]

$$\sigma_{ij} = \frac{\mu_1}{J^{5/3}} \left(B_{ij} - \frac{1}{3} B_{kk} \delta_{ij} \right) + \frac{\mu_2}{J^{7/3}} \left(B_{kk} B_{ij} - \frac{1}{3} [B_{kk}]^2 \delta_{ij} - B_{ik} B_{kj} + \frac{1}{3} B_{kn} B_{nk} \delta_{ij} \right) + K_1 (J - 1) \delta_{ij} \quad (4.17)$$

Bu malzeme modeli, birim uzama enerji fonksiyonunu sunmuştur. Birçok malzeme modeline öncülük eden Mooney-Rivlin modelinin çokça tercih edilmesinin sebebi elastomer malzeme davranışını birim uzama enerji metodu ile iyi yakınsamalar elde edebilmesidir [15].

- Genellenmiş polinomik lastik elastisite potansiyeli

$$\bar{U} = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{2} (J - 1)^{2i} \quad (4.18)$$

Burada C_{ij} ve K_i malzeme özellikleridir. Küçük birim uzamalar için, kayma modülü ve kütle modülü $\mu = 2(C_{01} + C_{10})$, $K = 2K_1$ 'dir. Bu model birçok sonlu eleman kodlarında uygulanır. Hem neo-Hookean katısı hem Mooney-Rivlin katısı kanunun özel durumlarıdır ($N=1$ ve uygun C_{ij} seçimi ile birlikte). $N > 2$ değeri deneysel verilere böylesine büyük miktarda malzeme özelliklerini uydurmaya çalışmak zor olduğu için nadiren kullanılmaktadır.

- Ogden model

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{K_1}{2} (J - 1)^2 \quad (4.19)$$

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i / J^{1/3} \quad (4.20)$$

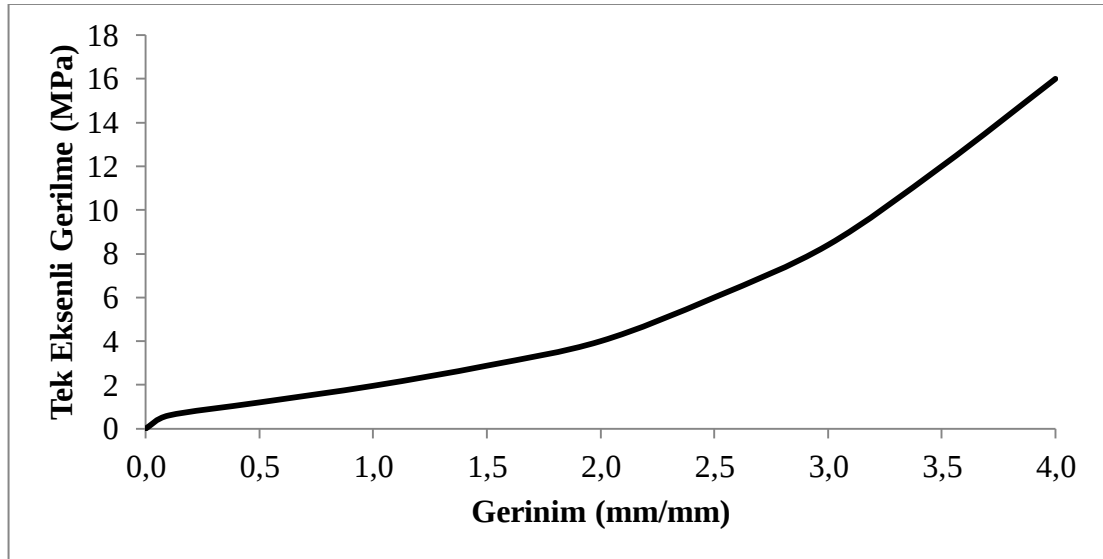
ve μ_i, α_i, K malzeme özellikleridir. Küçük birim uzamalar için, kayma modülüsü ve kütle modülüsü,

$$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (4.21)$$

$$K = K_1 \quad (4.22)$$

gibidir. Bu bir lastik elastik modelidir ve $K_1 \gg \mu_i$ olması ile kullanılır. Ogden modeli, yüksek deformasyonlarda hala elastik kalabilen ve sıkıştırılmaz oldukları kabul edilen malzemeler için kullanılmakta olup [14], [15], mevcut tez çalışmalarında, darbe yüklerinin yüksek deformasyon sağlaması ve malzemenin elastikliğini kaybetmemesi nedeni ile gerçek sonuçlara daha çok yakınsama yapması beklenmiştir.

Abaqus modelinin ortaya çıkması için, tek eksenli, iki eksenli veya düzlemsel gerilim birim uzama verileri kullanılmaktadır. Şekil 3.7’de de Abaqus modelinde kullanılan elastomerik malzemenin tek eksenli gerilme-gerinim diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Numune malzemesine ait tek eksenli gerilme ile gerinim diyagramı

- Arruda-Boyce 8 zincir modeli

$$\bar{U} = \mu \left\{ \frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\beta^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{1}{1050\beta^4} (\bar{I}_1^3 - 2) + \dots \right\} + \frac{K_1}{2} (J - 1)^2 \quad (4.23)$$

Burada da μ, β, K malzeme özellikleridir.

- Ogden-Storakers hiperelastik köpük

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right) \quad (4.24)$$

Burada, μ_i, α_i, K malzeme özellikleridir. Küçük birim uzamalar için kayma modülüsü ve kütle modülüsü,

$$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (4.39) \text{ ve } K = \sum_{i=1}^N 2\mu_i \left(\beta_i + \frac{1}{3} \right) \quad (4.25)$$

gibidir. Bu köpük modeli, çok yüksek sıkıştırılabilir malzemeleri modelleyebilir. Kayma ve sıkıştırma cevapları ikiye katlamıştır [10].

- Blatz-Ko köpük lastik

$$U(I_1, I_2, I_3) = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I_1}{I_2} + 2\sqrt{I_3} \right) \quad (4.26)$$

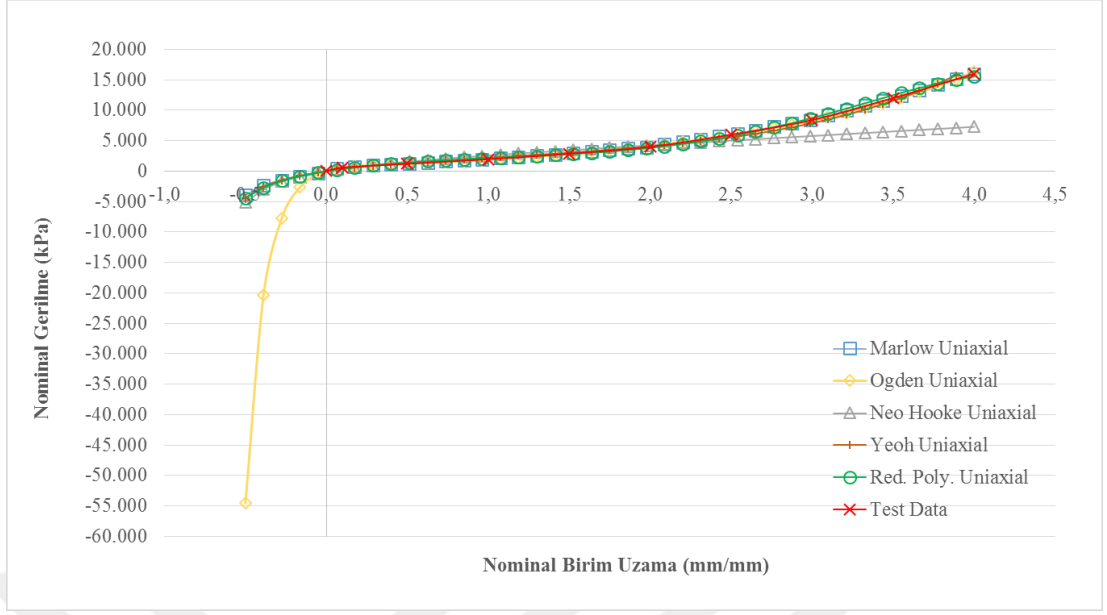
Burada da, μ sonsuz derecede küçük birim uzamalarda kayma modülüsüne karşılık gelen malzeme parametresidir. Poisson oranı, böyle bir malzeme için, 0,25'dir.

Tüm birim uzama enerji yoğunluğu spesifik formlarının özet tablosu Tablo 3.2'deki gibidir [10].

Tablo 3.2. Hiperelastik bünyesel denklemler ile bulunan $\sigma(S)$ - $\varepsilon(\lambda)$ ilişkileri

	Tek Eksenli Gerilme	Çok Eksenli Gerilme	Saf Kayma Gerilmesi
Invariants	$I_1 / L_1 = \lambda$ $I_2 / L_2 = I_3 / L_3 = \lambda^{-1/2}$ $I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}$	$I_1 / L_1 = I_2 / L_2 = \lambda$ $I_3 / L_3 = \lambda^{-2}$ $I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4}$	$I_1 / L_1 = \lambda \quad I_2 / L_2 = 1$ $I_3 / L_3 = \lambda^{-1}$ $I_1 = 1 + \lambda^2 + \lambda^{-2}$
Neo-Hookean	$S_1 = \mu_1(\lambda - \lambda^{-2})$ $S_2 = S_3 = 0$	$S_1 = S_2 = \mu_1(\lambda - \lambda^{-5})$ $S_3 = 0$	$S_1 = \mu_1(\lambda - \lambda^{-3})$ $S_2 = \mu_1(\lambda^{-1} - \lambda^{-3})$ $S_3 = 0$
Mooney-Rivlin	$S_1 = \mu_1(\lambda - \lambda^{-2})$ $+ \mu_2(1 - \lambda^{-3})$ $S_2 = S_3 = 0$	$S_1 = S_2 = \mu_1(\lambda - \lambda^{-5})$ $+ \mu_2(\lambda^3 - \lambda^{-3})$ $S_3 = 0$	$S_1 = (\mu_1 + \mu_2)(\lambda - \lambda^{-3})$ $S_2 = \mu_1(1 - \lambda^{-1}) + \mu_2(\lambda^2 - 1)$ $S_3 = 0$
Arruda-Boyce	$S_1 = C(\lambda - \lambda^{-2})$ $S_2 = S_3 = 0$	$S_1 = S_2 = C(\lambda - \lambda^{-5})$ $S_3 = 0$	$S_1 = C(\lambda - \lambda^{-3})$ $S_2 = C(1 - \lambda^{-2})$
		$C = \mu \left(1 + \frac{I_1}{5\beta^2} + \frac{33I_1^2}{525\beta^4} \right)$	
Ogden	$S_1 = \sum_n \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-\alpha_n/2}) / \lambda$ $S_2 = S_3 = 0$	$S_1 = S_2 = \sum_n \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-2\alpha_n}) / \lambda$ $S_3 = 0$	$S_1 = \sum_n \mu_n (\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-\alpha_n}) / \lambda$ $S_2 = \sum_n \mu_n (1 - \lambda^{-\alpha_n})$

Yukarıdaki hiperelastik bünyesel denklemlerine göre test verilerinin kullanılması ile oluşturulan her bir model için tek eksenli gerilme – birim uzama eğrileri Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



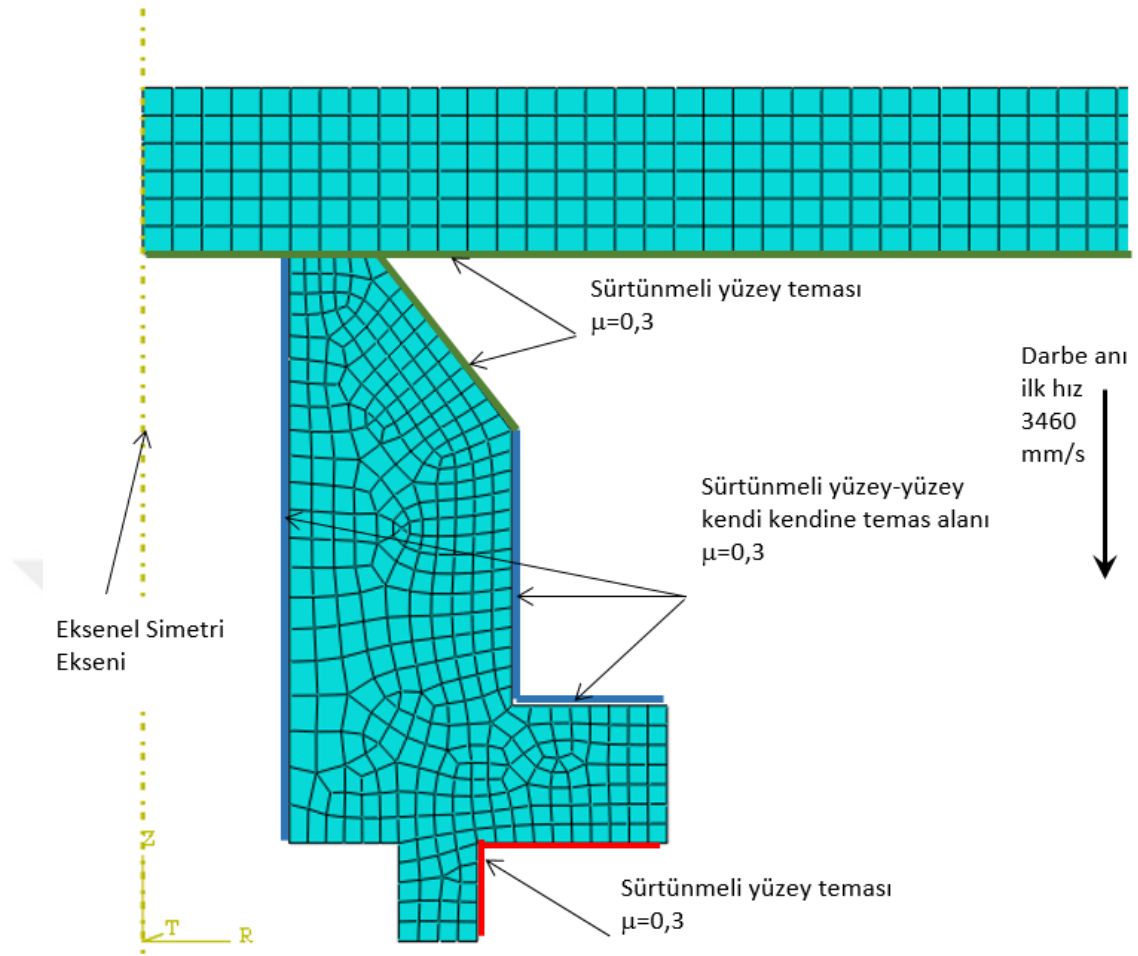
Şekil 3.8. Malzeme Modelleri Tek Eksenli Gerilim - Birim Uzama Eğrileri

Bu çalışma boyunca sürdürülen analizler, lastik malzemesinin hiperelastik malzeme davranışının farklı hiperelastik malzeme modelleriyle incelenmesi ve yapılan karşılaştırmalar ile en uygun davranışı bulma üzerine kurulmuştur.

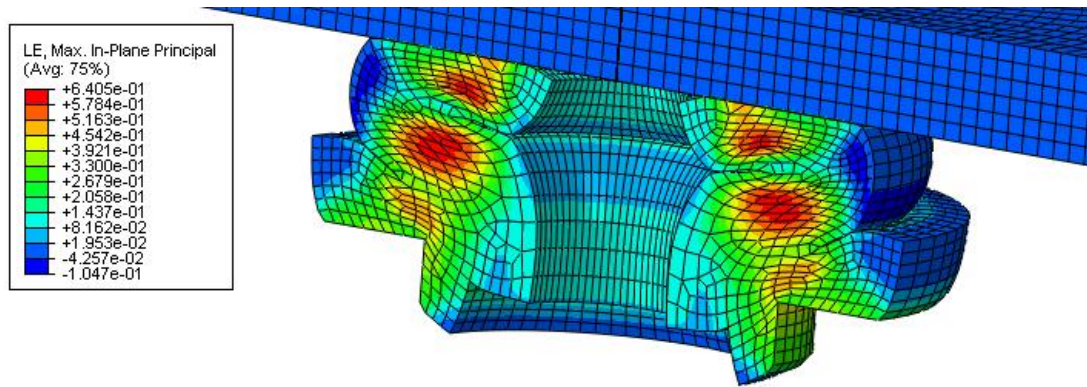
4. SONLU ELEMENLAR MODELİ

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ilk olarak numune lastik takozun katı modelinin kullanılması ile sürdürülmüştür. Malzeme deformasyonu çok yüksek olduğu ve iki yüzeyde kendi kendine temas (self-contact) olduğu için lineer olmama problemi oldukça yüksekti. Bu da her bir artımda çözüme yaklaşmak için çok fazla miktarda iterasyon yapılmasını zorunlu kılmıştır. Anlamlı bir üç boyutlu model 300.000'den fazla düğüm noktası (nod) ihtiyacı vardır. İlk olarak çalışılan üç boyutlu analizin çözümü için 24 saatten fazla bir zaman gereksinim duyulduğu için, modelin simetrik hali, eksenel simetrik olarak değerlendirilmiştir. Üç boyutlu modeldeki düğüm sayısı, eksenel simetrik modelden yirmi kattan daha fazla idi.

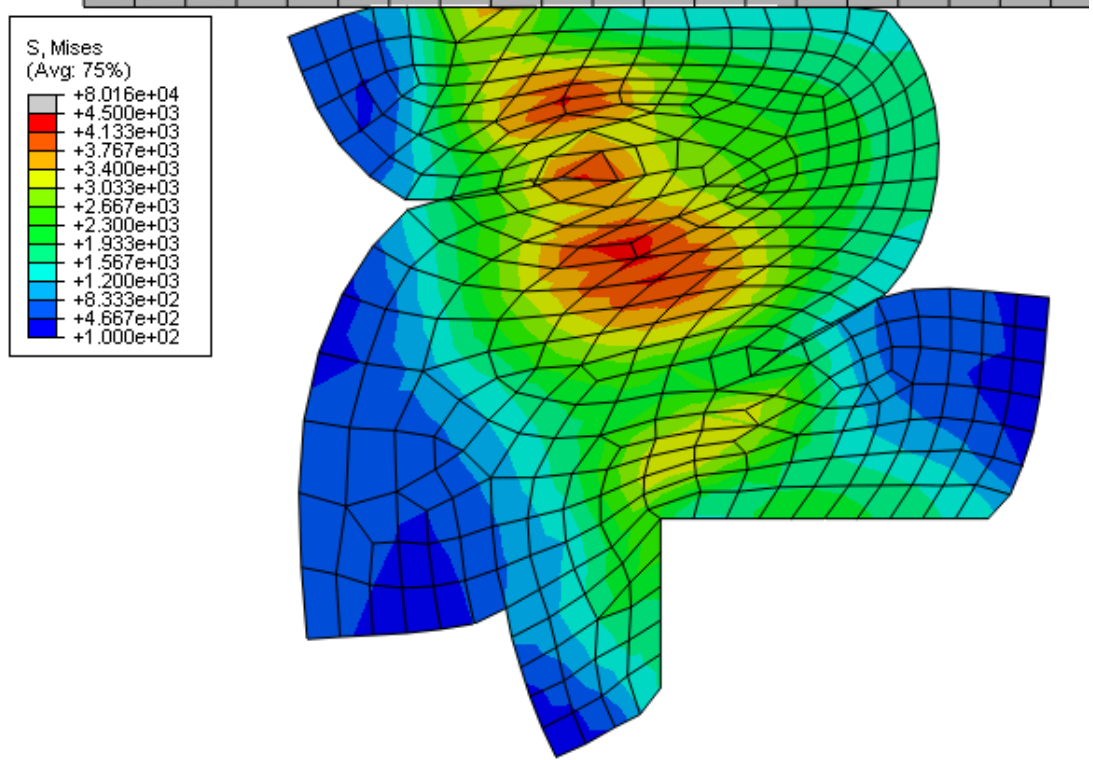
Şekil 4.1'de belirtilen sınır koşullarının ve iki boyutlu eksenel simetrik ağlamanın kullanılmasıyla ekspilisit dinamik analizler sürdürülmüştür. Her bir kütle ve yükseklik ikilisi için 6 farklı malzeme modelinde Abaqus sonlu elemanlar analiz programı çalıştırılmıştır.



Şekil 4.1. Eksenel simetrik modele uygulanan sınır koşulları



Şekil 4.2. Numunenin deforme olmuş halindeki gerinimin Abaqus modelinde logaritmik ölçeklendirmede gösterimi (3 kg'lık kütleinin 25 cm'den serbest düşmesi ile elde edilen)



Şekil 4.3. En yüksek deformasyon seviyesindeki von Mises eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 aksenal simetrik modelden elde edilen nümerik sonuçlar von Mises gerilmesi ve logaritmik gerinim dağılımını gösteriyor. Bu illüstrasyonlar sönümleyici geometrisi ve malzemesinin tasarımında yardımcı olmaktadır. Bu kesit çizimlerinin doğruluğu çok iyi tanımlanmış malzeme özelliklerine sıkı sıkıya bağlıdır. Hem deneysel hem de FEM sonuçları için darbe süresince deformasyon değişimleri bir sonraki bölüm olan “

DENEYSEL SONUÇLAR” bölümünde verilmektedir. Ayrıca Abaqus’te yapılan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Girdi Veri Dosyası (Input Data File) Ek-A’da -Örnek Bir Abaqus Input Dosyası- verilmiştir.

Sönümleyici olarak kullanılan kauçuk malzemenin, tek eksenli çekme test deneyi sonuçlarından, hiperelastik malzeme modelleri elde edilmiştir. Abaqus yazılımı içerisinde bulunan ve ekstrapolasyon işlemini yapan alt program ile test datalarının hiperelastik malzeme modelleri verilerine dönüşümü sağlanmıştır. Aşağıdaki tablolarda hesaplanmış olan hiperelastik malzeme modelleri katsayıları Ek-B’de verilmiştir. Ek-B’de ayrıca, tek eksenli, iki eksenli, düzlemsel veya hacimsel çekme veya basma gerilmelerinde analizin kararlılık durumları ve yük limitlerinin ne olduğu

da paylaşılmıştır. Polinomsal hiperelastik malzeme modellerinin malzeme katsayılarının tek eksenli çekme deneyi verilerinden enterpole edilerek bulunma işleminin Abaqus alt programında nasıl yapıldığı Ek-C’de açıklanmıştır.



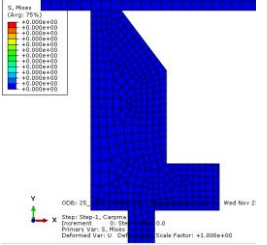
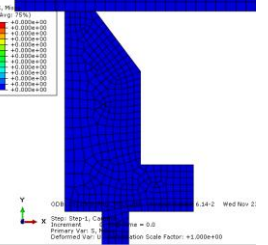
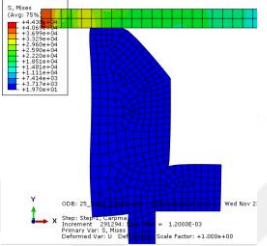
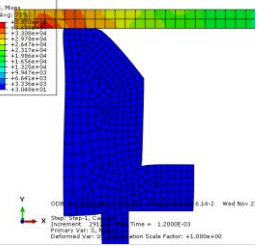
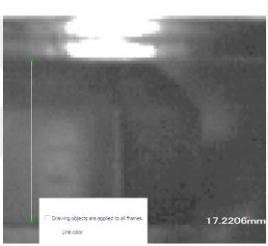
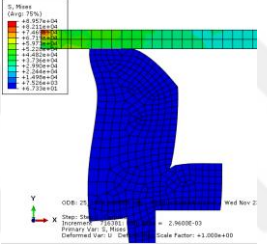
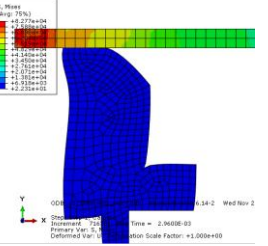
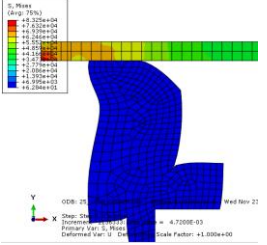
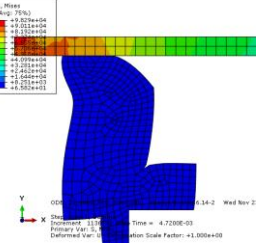
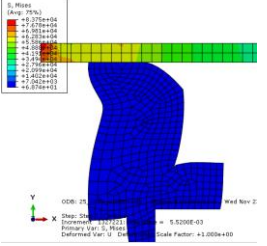
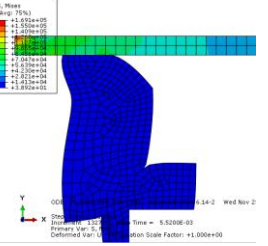
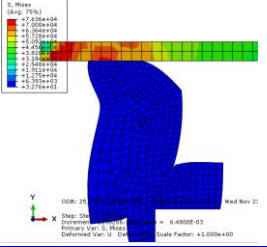
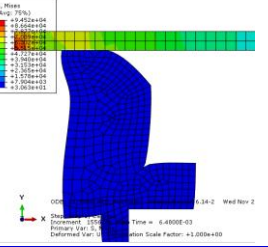
5. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel sonuçlar ve farklı hiperelastik malzeme modellerini kullanarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri bu bölümde paylaşılmaktadır. Gerçekleştirilen deneyler ve analizlerin tamalanma durumları Tablo 5.1’de gösterilmektedir.

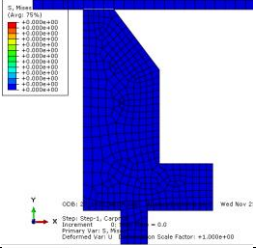
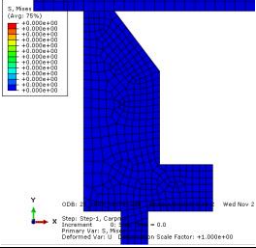
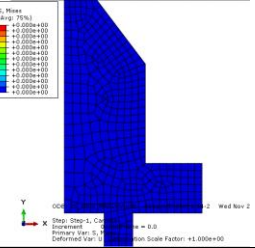
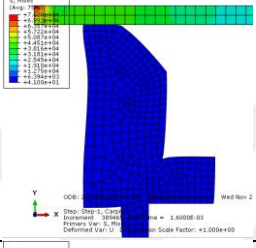
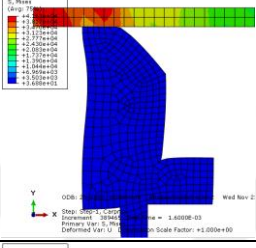
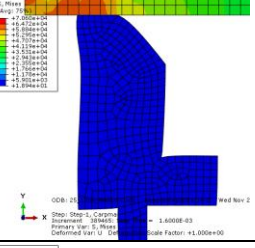
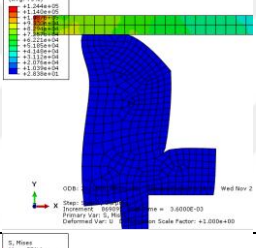
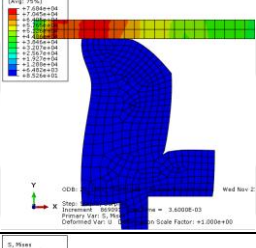
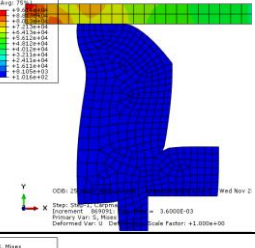
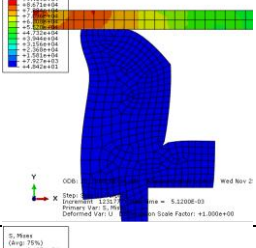
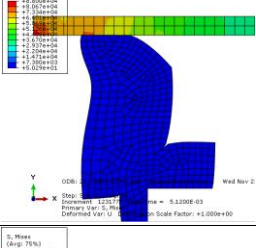
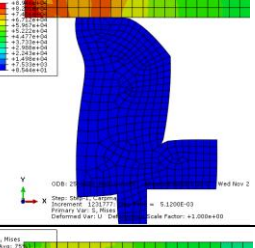
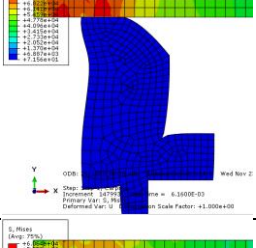
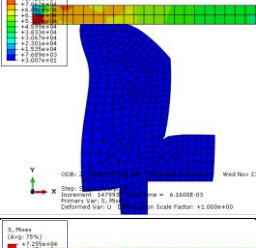
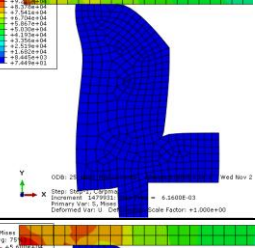
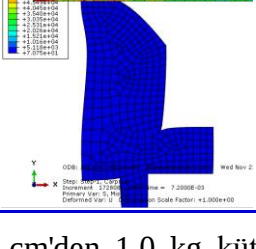
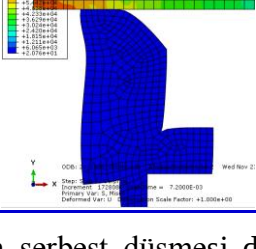
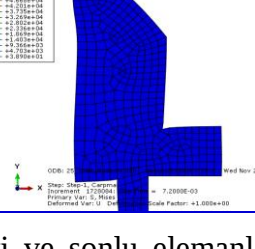
Tablo 5.1. Deney ve analizler özet tablosu

	SERBEST DÜŞEN KÜTLE SERBEST DÜŞME YÜKSEKLİĞİ					
	25 cm 1,0 kg	25 cm 2,5 kg	25 cm 5,0 kg	61 cm 1,0 kg	61 cm 2,5 kg	61 cm 5,0 kg
DENEY	√	√	√	√	√	√
ABAQUS NEO HOOKE	√	√	√	√	√	√
ABAQUS OGDEN	√	√	√	√	√	√
ABAQUS YEOH	√	√	√	√	√	√
ABAQUS MARLOW	√	√	√	√	√	√
ABAQUS RED. POLYN.	√	√	√	√	√	√

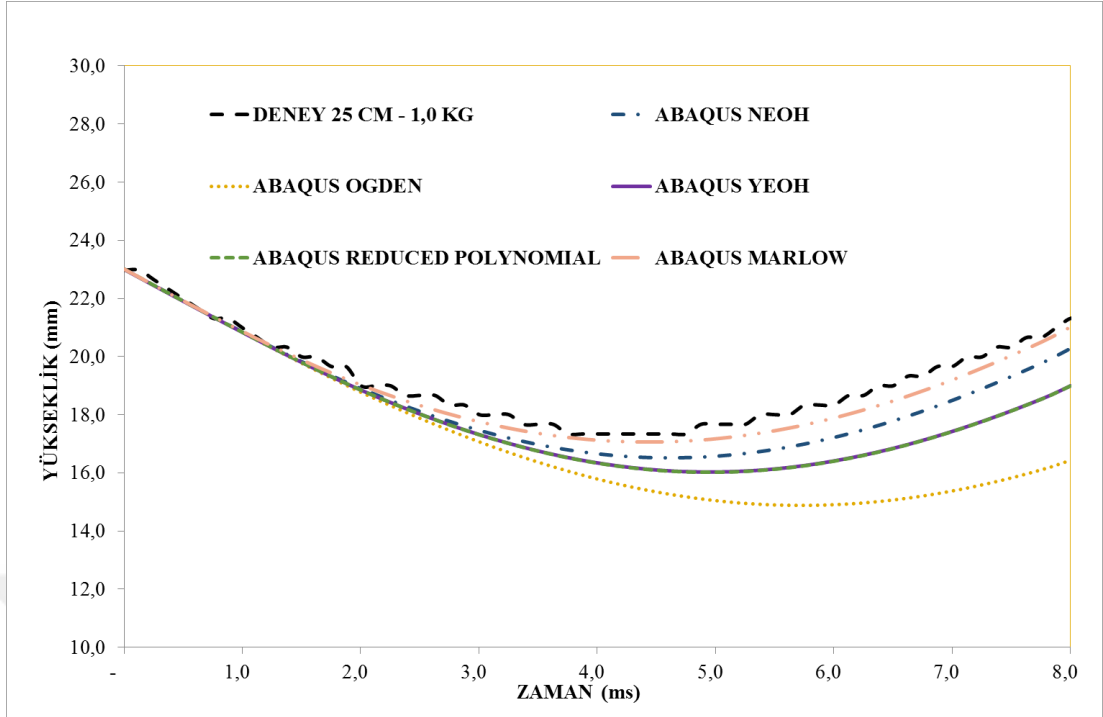
Tamamlanma durumları Tablo 5.1’de verilmiş olan deneyler ve analizlerin sonuçları grafik ve görseller halinde Şekil 5.1’den Şekil 5.18’e kadar paylaşılmıştır. Her bir serbest düşme yüksekliği ve serbest düşen kütle ikilisi için deney ve Abaqus analizleri set olarak aynı tablo ve grafik içinde bu şekillerde gösterilmiş ve sonuçların karşılaştırmalı yorumları şekillerden sonra verilmektedir.

25 CM'DEN 1,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 25 CM - 1,0 KG	OGDEN	REDUCED POLYNOMIAL
1	0,1	 22.9608mm		
2	1,5	 20.0907mm		
3	3,7	 17.2206mm		
4	5,9	 16.1773mm		
5	6,9	 19.4529mm		
6	8,1	 21.0474mm		

Şekil 5.1. 25 cm'den 1,0 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)

25 CM'DEN 1,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (2/2)				
Resim No	Zaman (ms)	NEO HOOKE	YEOH	MARLOW
1	0,1			
2	1,5			
3	3,7			
4	5,9			
5	6,9			
6	8,1			

Şekil 5.2. 25 cm'den 1,0 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



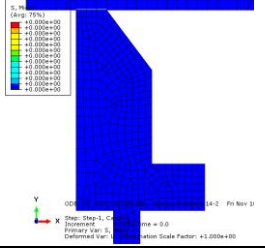
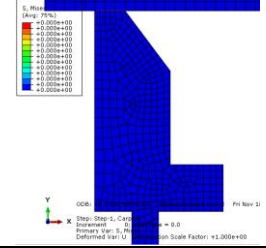
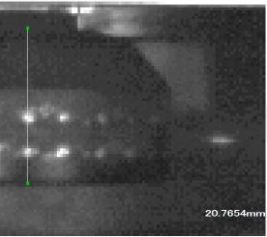
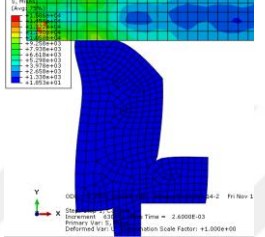
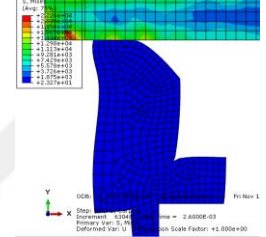
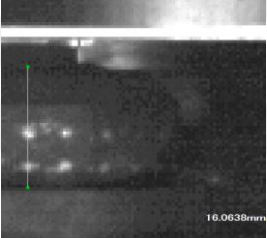
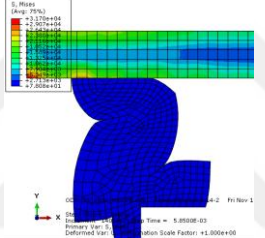
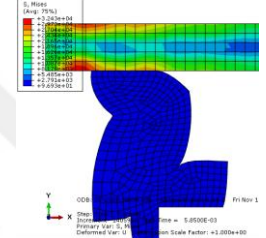
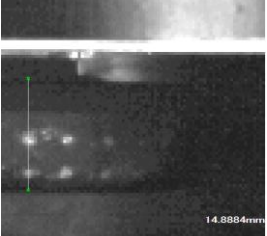
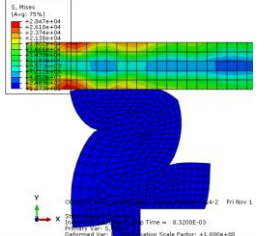
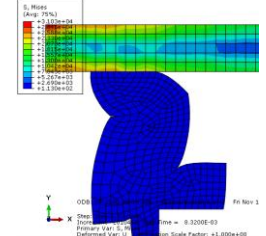
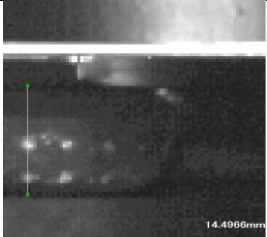
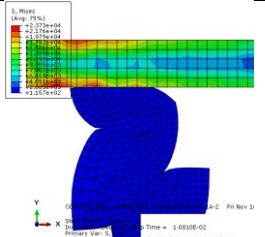
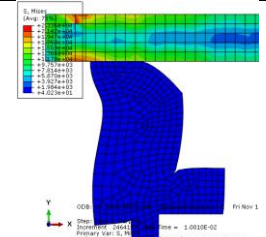
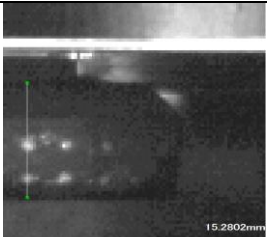
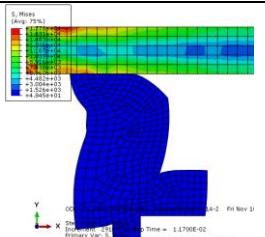
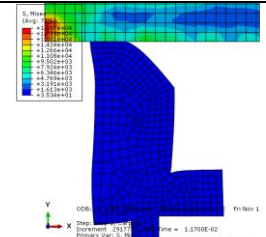
Şekil 5.3. 25 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 25 cm'lik yükseklikten 1,00 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 125 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 2,08 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Şekil 5.3'te ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre en düşük momentumun sağlandığı bu deneyde, elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) Marlow malzeme modeli sonlu elemanlar analizinde görülmüş olup, en kötüsü ise Ogden modelinde görülmektedir. Göreceli olarak düşük hızda ve düşük kütlede yapılan bu deneyde malzemenin sıkıştırılabilirliği daha az etkilediği için hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmış, deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a yakın, 0,90'ın üstünde kalmış olup tüm korelasyonlar Tablo 5.2'de verilmiştir.

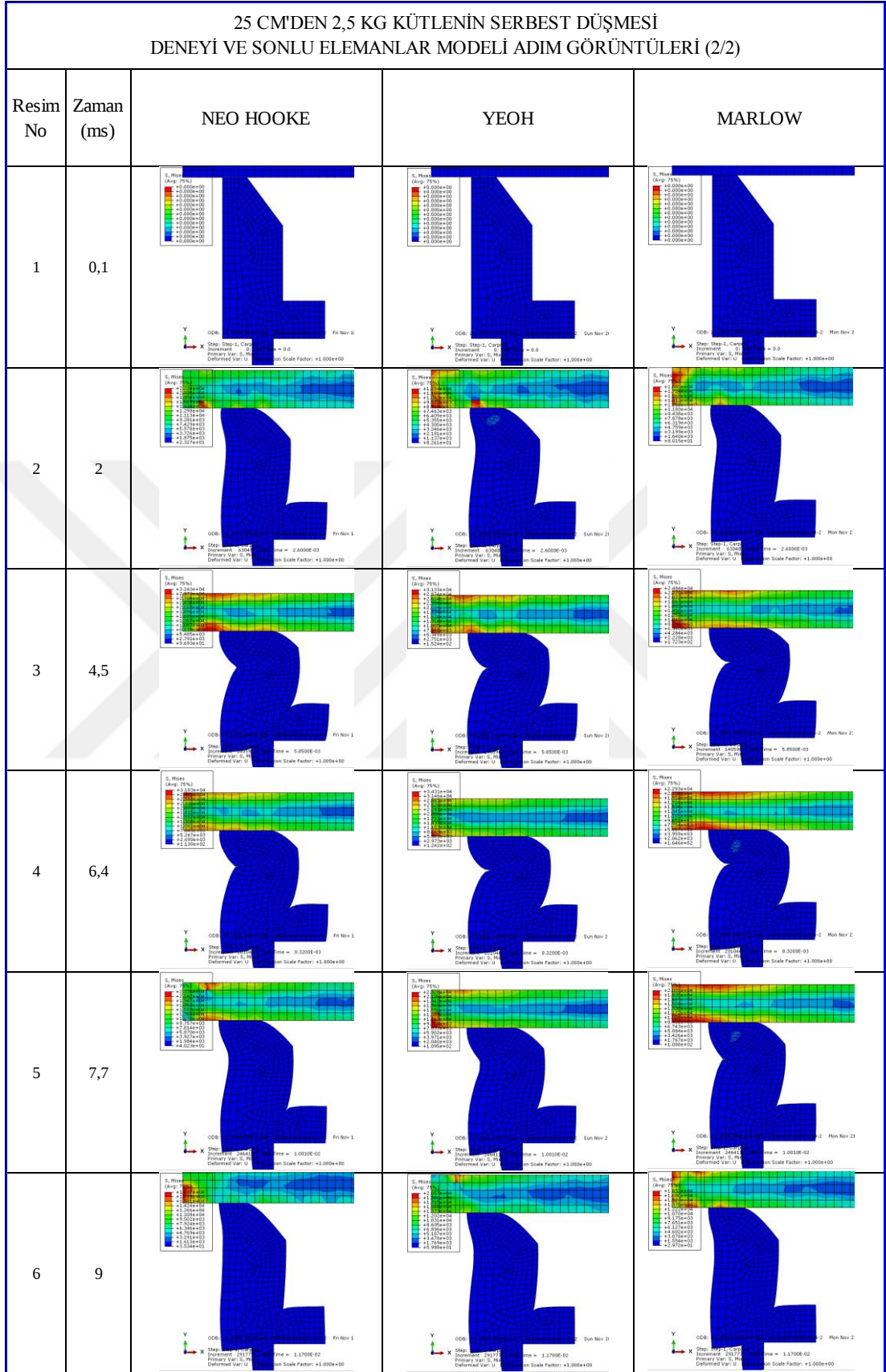
Tablo 5.2. 25cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 25 cm - 1,0 kg (EĞ. ÇİZ. POL4.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 25 cm - 1,0 kg (EĞ. ÇİZ. POL 4.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	98,08%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	75,63%	86,80%	100,00%			
ABAQUS YEOH	91,92%	97,80%	95,25%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	91,92%	97,80%	95,25%	100,00%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	99,75%	99,15%	79,69%	94,29%	94,29%	100,00%

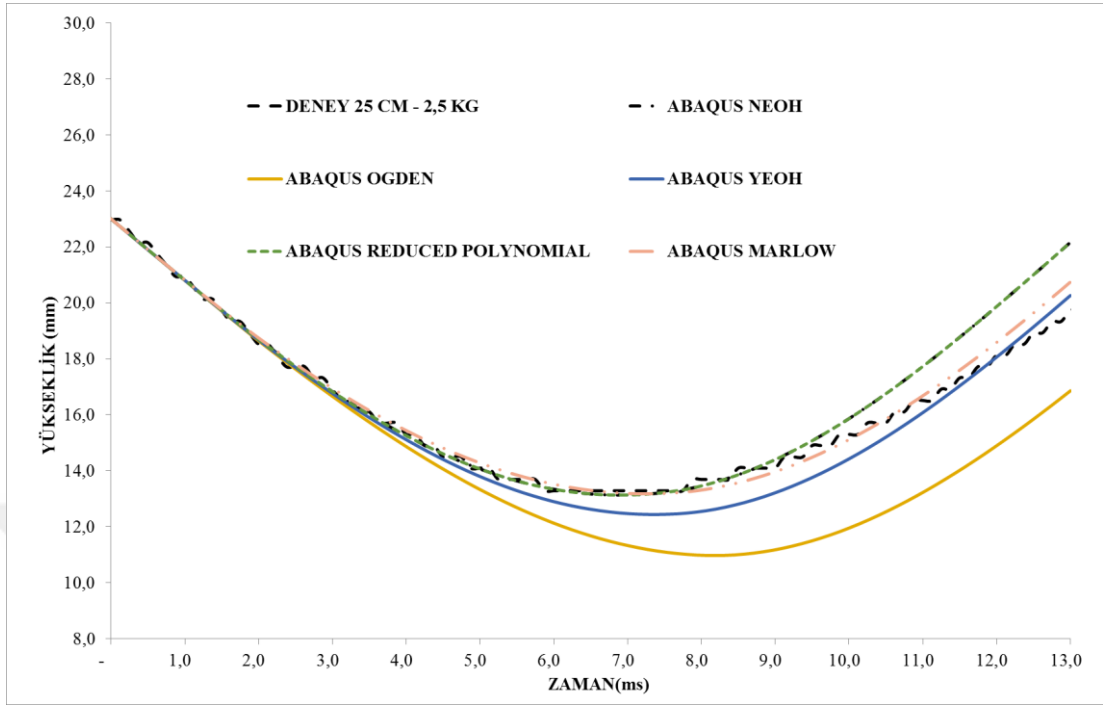
Genel olarak Ogden modeli dışında tüm diğer modellerin deney verilerine yakınsaması uygun olarak kabul edilebilir.

25 CM'DEN 2,5 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 25 CM - 2,5 KG	OGDEN	REDUCED POLYNOMIAL
1	0,1			
2	2,0			
3	4,5			
4	6,4			
5	7,7			
6	9,0			

Şekil 5.4. 25 cm'den 2,5 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)



Şekil 5.5. 25 cm'den 2,5 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



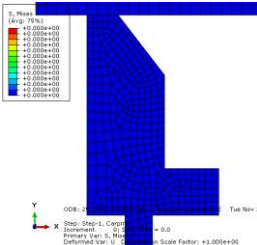
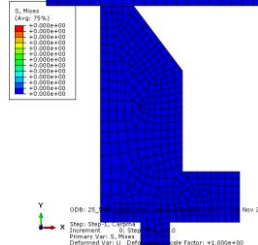
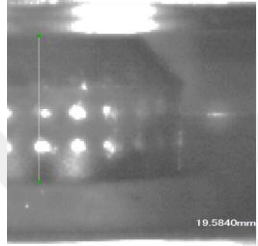
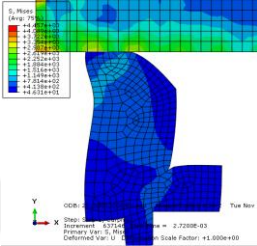
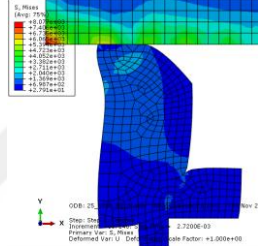
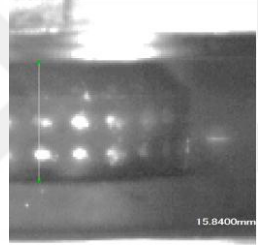
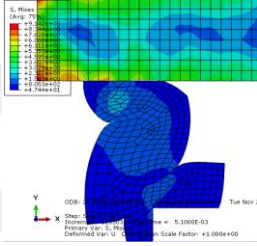
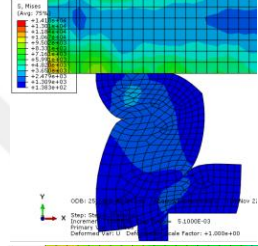
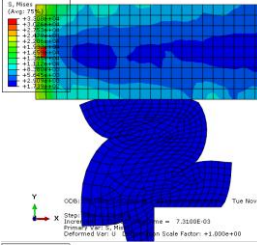
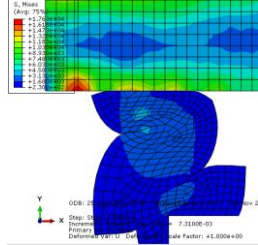
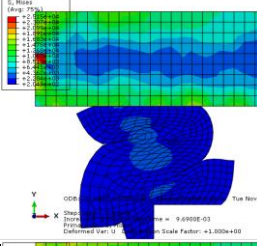
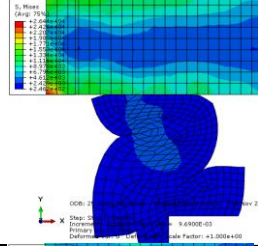
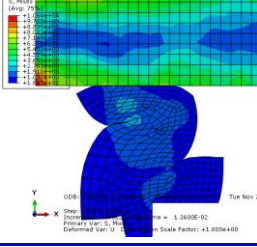
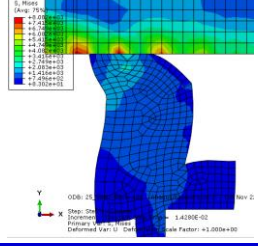
Şekil 5.6. 25 cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 25 cm'lik yükseklikten 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 125 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 5,21 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Şekil 5.6'da ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre ortalama bir momentumun sağlandığı bu deneyde elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) Marlow malzeme modeli sonlu elemanlar analizinde, en kötüsü ise Ogden modelinde görülmektedir. Göreceli olarak düşük hızda ve düşük kütlede yapılan bu deneyde malzemenin sıkıştırılabilirliği daha az etkilediği için hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmıştır. Deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a çok yakın, 0,97'nin üstünde yüksek bir doğruluğu göstermekte olup, tüm korelasyonlar Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. 25cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 25 CM - 2,5 KG (EĞ. ÇİZ. POL5.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 25CM - 2500GR (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	97,17%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	93,32%	83,94%	100,00%			
ABAQUS YEOH	99,53%	97,50%	93,92%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	97,17%	100,00%	83,94%	97,50%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	99,50%	98,48%	92,05%	99,86%	98,48%	100,00%

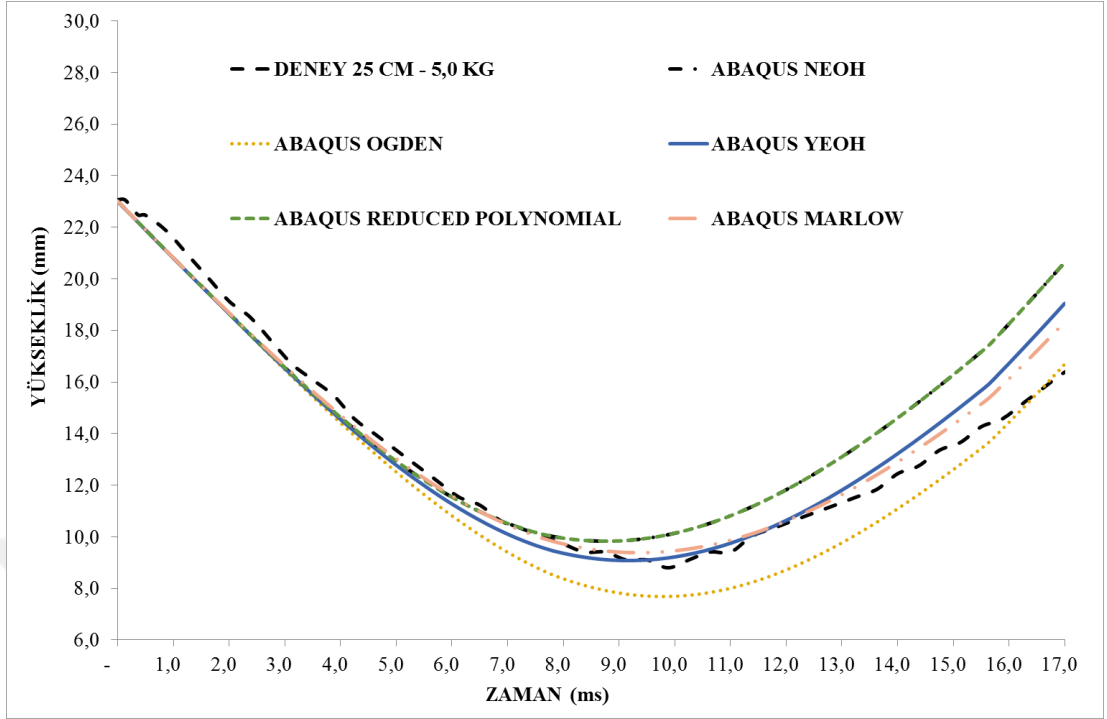
Tüm modellerin deney verilerine yakınsaması uygundur.

25 CM'DEN 5,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 25CM - 5,0 KG	OGDEN	REDUCED POLINOMIAL
1	0,1			
2	1,6			
3	3,0			
4	4,3			
5	5,7			
6	8,4			

Şekil 5.7. 25 cm'den 5,0 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)

25 CM'DEN 5,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (2/2)				
Resim No	Zaman (ms)	NEO HOOKE	YEOH	MARLOW
1	0,1			
2	1,6			
3	3			
4	4,3			
5	5,7			
6	8,4			

Şekil 5.8. 25 cm'den 5,0 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



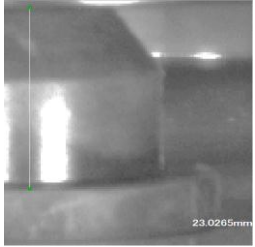
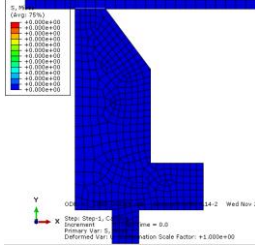
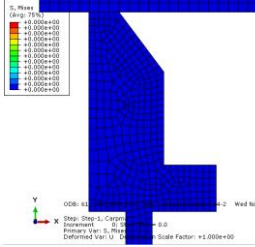
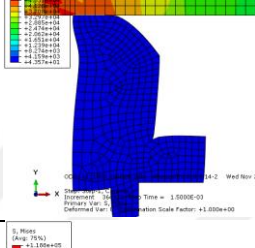
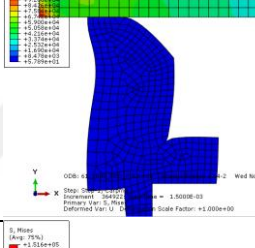
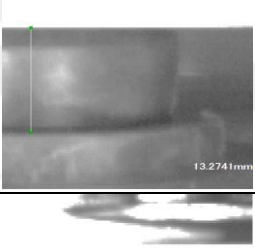
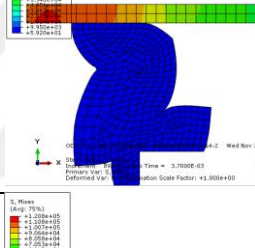
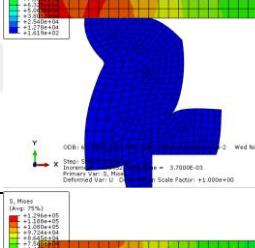
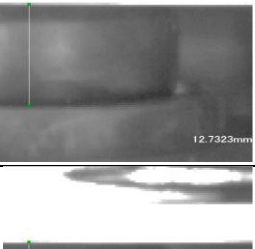
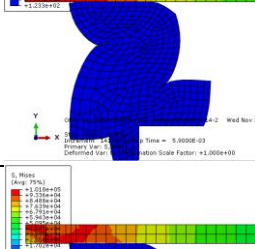
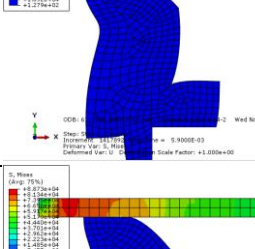
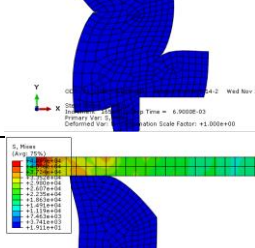
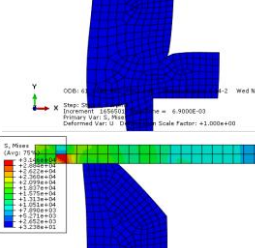
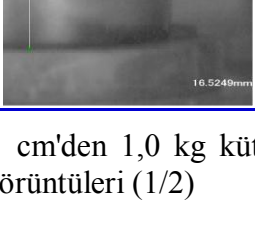
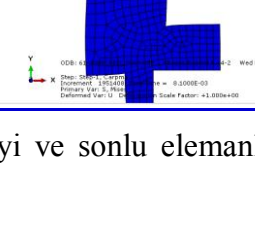
Şekil 5.9. 25 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 25 cm'lik yükseklikten 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 125 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 10,41 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Şekil 5.9'da ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre ortalama bir momentumun sağlandığı bu deneyde elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) yine Marlow malzeme modelli sonlu elemanlar analizinde, en kötüsü ise Neoh ve Reduced Polynomial modellerinde görülmektedir. Göreceli olarak düşük hızda ve yüksek kütlede yapılan bu deneyde malzemenin sıkıştırılabilirliği daha az etkilediği için hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmıştır. Deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a yakın, 0,96'nın üstünde yüksek bir doğruluğu göstermekte olup, tüm korelasyonlar Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. 25 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 25 CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 25 CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	93,58%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	99,74%	94,35%	100,00%			
ABAQUS YEOH	97,60%	98,95%	98,15%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	93,58%	100,00%	94,35%	98,95%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	98,83%	97,71%	99,21%	99,75%	97,71%	100,00%

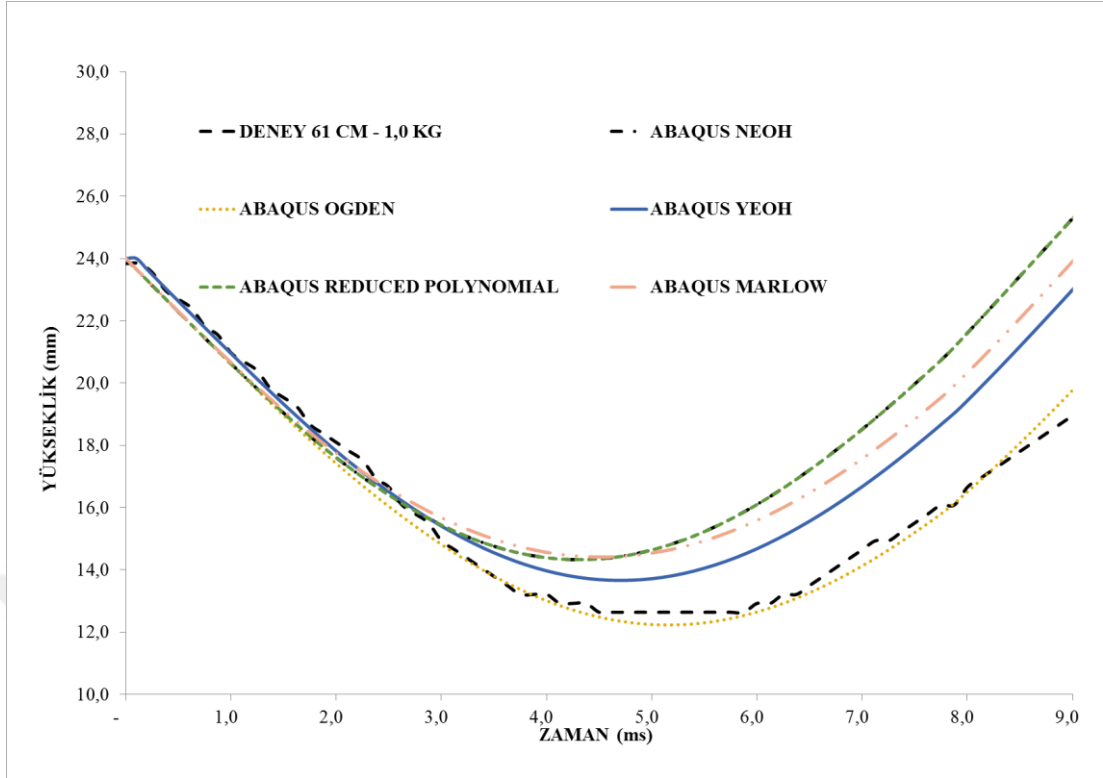
Tüm modellerin deney verilerine yakınsaması uygundur.

61 CM'DEN 1,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 61 CM - 1,0 KG	OGDEN	REDUCED POLYNOMIAL
1	0,1			
2	2,0			
3	4,5			
4	6,4			
5	7,7			
6	9,0			

Şekil 5.10. 61 cm'den 1,0 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)

61 CM'DEN 1,0 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (2/2)				
Resim No	Zaman (ms)	NEO HOOKE	YEOH	MARLOW
1	0,1			
2	2,0			
3	4,5			
4	6,4			
5	7,7			
6	9,0			

Şekil 5.11. 61 cm'den 1,0 kg kütlelinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



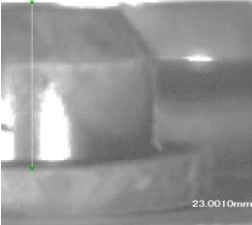
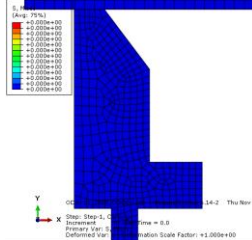
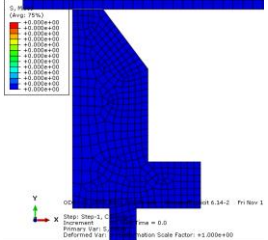
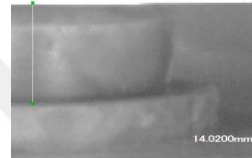
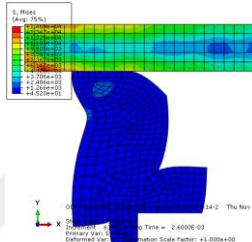
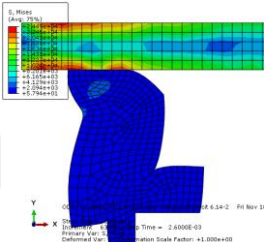
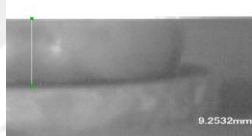
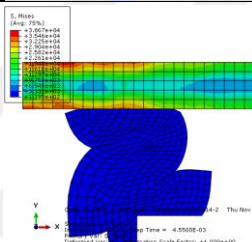
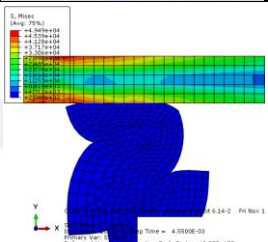
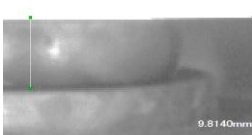
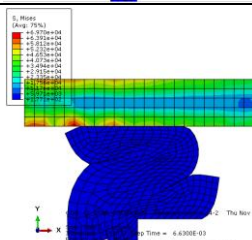
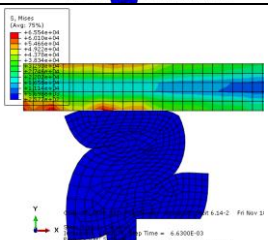
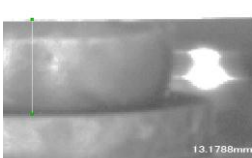
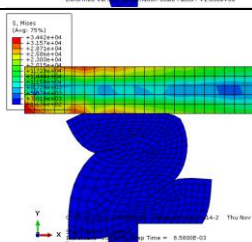
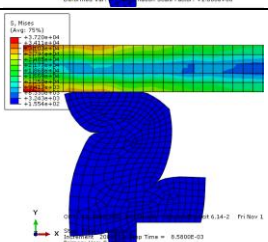
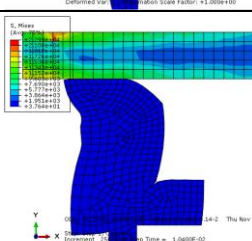
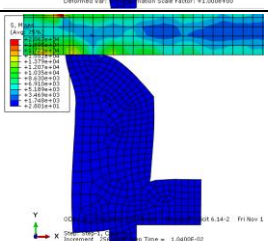
Şekil 5.12. 61 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 61 cm'lik yükseklikten 1,0 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 200 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 3,33 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Şekil 5.12'de ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre ortalama bir momentumun sağlandığı bu deneyde elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) Ogden malzeme modeli sonlu elemanlar analizinde, en kötüsü ise Neoh ve Reduced Polynomial modellerinde görülmektedir. Göreceli olarak yüksek hızda ve düşük kütlede yapılan bu deneyde hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmıştır. Deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a diğer deneylere göre daha az yakın, 0,88'in üstünde ortalama bir doğruluğu göstermekte olup, tüm korelasyonlar Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5. 61 cm-1,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 61 CM - 1,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 61 CM - 1,0 KG(EĞ. ÇİZ. POL 5.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	78,87%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	98,71%	85,87%	100,00%			
ABAQUS YEOH	90,95%	97,14%	95,57%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	78,87%	100,00%	85,87%	97,14%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	85,19%	99,27%	91,29%	99,23%	99,27%	100,00%

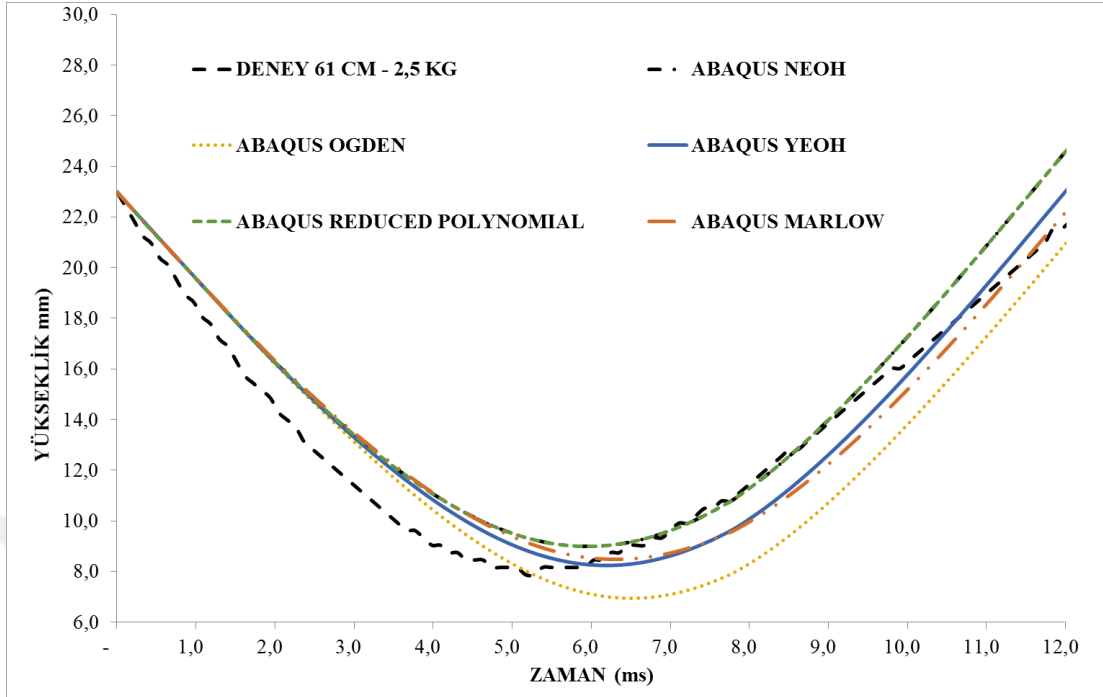
Ogden en iyi yakınsamayı sağlarken, diğerlerine göre Yeoh ve Marlow da kabul edilebilir seviyelerde yakınsama sağlamışlardır.

61 CM'DEN 2,5 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 61 CM - 2,5 KG	OGDEN	REDUCED POLINOMIAL
1	0,1			
2	2,0			
3	3,5			
4	5,1			
5	6,6			
6	8,0			

Şekil 5.13. 61 cm'den 2,5 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)

61 CM'DEN 2,5 KG KÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (2/2)				
Resim No	Zaman (ms)	NEO HOOKE	YEOH	MARLOW
1	0,1			
2	2,0			
3	3,5			
4	5,1			
5	6,6			
6	8,0			

Şekil 5.14. 61 cm'den 2,5 kg kütleinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



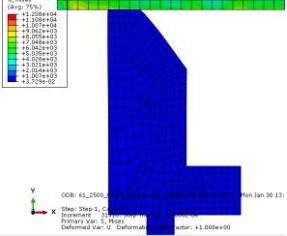
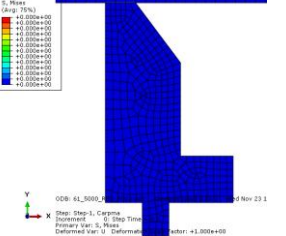
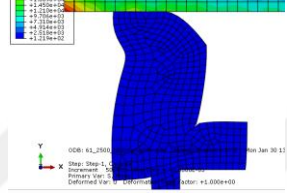
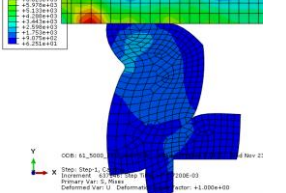
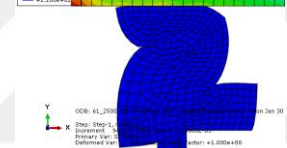
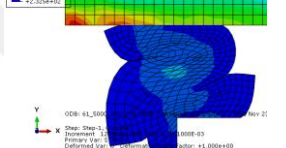
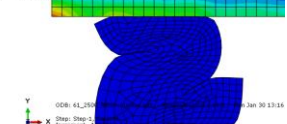
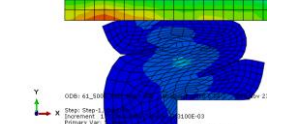
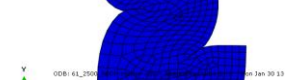
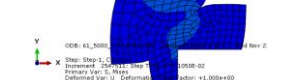
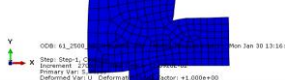
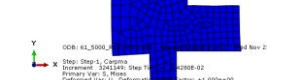
Şekil 5.15. 61 cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 61 cm'lik yükseklikten 2,5 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 200 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 8,33 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Şekil 5.15'te ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre ortalama bir momentumun sağlandığı bu deneyde elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) Ogden malzeme modeli sonlu elemanlar analizinde, en kötüsü ise Neoh ve Reduced Polynomial modellerinde görülmektedir. Göreceli olarak yüksek hızda ve düşük kütlede yapılan bu deneyde malzemenin sıkıştırılabilirliği daha az etkilediği için hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmıştır. Deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a yakın, 0,97'in üstünde ortalama bir doğruluğu göstermekte olup, tüm korelasyonlar Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. 61cm-2,5 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 61 CM - 2,5 GR (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 61 CM - 2,5 GR (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	98,55%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	94,57%	96,56%	100,00%			
ABAQUS YEOH	97,69%	99,40%	98,83%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	98,55%	100,00%	96,56%	99,40%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	96,71%	98,62%	99,51%	99,83%	98,62%	100,00%

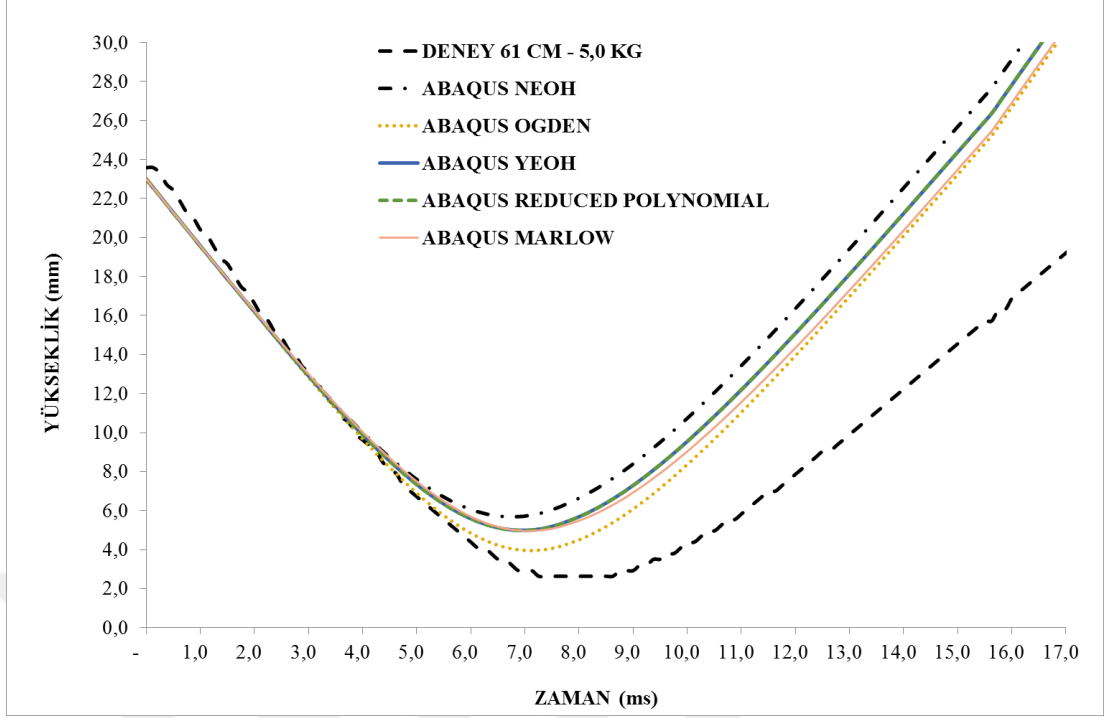
Tüm modeller bu deneyde yüksek yakınsama göstermişlerdir.

61 CM'DEN 5,0 KGKÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (1/2)				
Resim No	Zaman (ms)	DENEY 61 CM - 5,0 KG	OGDEN	REDUCED POLYNOMIAL
1	0,1			
2	1,6			
3	3,0			
4	4,3			
5	6,5			
6	8,4			

Şekil 5.16. 61 cm'den 5,0 kg kütlelinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (1/2)

61 CM'DEN 5,0 KGKÜTLENİN SERBEST DÜŞMESİ DENEYİ VE SONLU ELEMENLAR MODELİ ADIM GÖRÜNTÜLERİ (2/2)				
Resim No	Zaman (ms)	NEO HOOKE	YEOH	MARLOW
1	0,1			
2	1,6			
3	3,0			
4	4,3			
5	6,5			
6	8,4			

Şekil 5.17. 61 cm'den 5,0 kg kütlelinin serbest düşmesi deneyi ve sonlu elemanlar modeli adım görüntüleri (2/2)



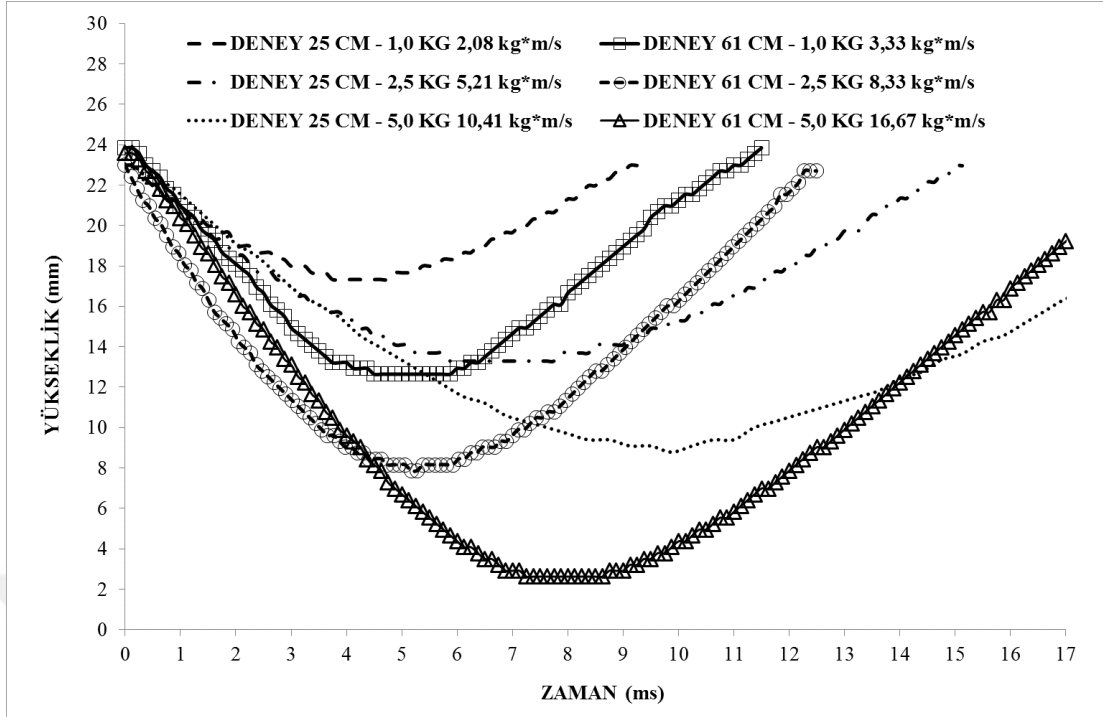
Şekil 5.18. 61 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analizler grafiği

Seçilen 61 cm'lik yükseklikten 5,0 kg kütlenin serbest düşmesi ile ASTM D3763 standardında da belirtilen 200 m/dak'lık hız elde edilmiş ve 16,67 kg*m/s'lik bir momentum ile çarpma gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunenin, uygulanan deney ve analizlerdeki deformasyonlarının belli aralıklarla alınmış görüntüleri Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Şekil 5.18'de ise bu deformasyonların zamana bağlı değişimlerin grafikleri verilmektedir. Diğer deneylere göre yüksek bir momentumun sağlandığı bu deneyde elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi ilgileşim (korelasyon) Ogden malzeme modeli sonlu elemanlar analizinde, en kötüsü ise Neoh ve Reduced Polynomial modellerinde görülmektedir. Göreceli olarak yüksek hızda ve düşük kütlede yapılan bu deneyde malzemenin sıkıştırılabilirliği daha fazla etkilediği için hiperelastik davranışı yakınsanabilir seviyede kalmıştır. Deneylerin ortalama korelasyon faktörleri, tam uyumu gösteren 1,00'a daha uzak, 0,83'ün üstünde zayıf bir doğruluğu göstermekte olup, tüm korelasyonlar Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. 61 cm-5,0 kg serbest düşme darbe deney ve analiz korelasyonları

	DENEY 61CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL. 5.)	ABAQUS NEOH	ABAQUS OGDEN	ABAQUS YEOH	ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	ABAQUS MARLOW
DENEY 61CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL. 5.)	100,00%					
ABAQUS NEOH	79,70%	100,00%				
ABAQUS OGDEN	86,72%	99,14%	100,00%			
ABAQUS YEOH	83,49%	99,77%	99,80%	100,00%		
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	83,49%	99,77%	99,80%	100,00%	100,00%	
ABAQUS MARLOW	85,38%	99,45%	99,95%	99,93%	99,93%	100,00%

En yüksek momentumun ve hızın kullanıldığı be deneyde, malzemelerin sıkıştırılabilirlikleri etkilendiği için genel olarak malzeme modelleri diğer deneylere göre daha düşük bir yakınsama göstermişlerdir. Ogden kabul edilebilir seviyelerde kalırken, Marlow, Reduced Polynomial ve Neoh, malzeme davranışına yakınsamada yeterli seviyede kalmışlardır.



Şekil 5.19. Tüm deneyler yükseklik-zaman grafikleri

Sadece deneylerden elde edilen verilerin yer aldığı grafik yukarıdaki Şekil 5.19'daki gibidir. Şekil 5.19'da verildiği gibi, darbe anındaki momentum ve düşen kütle miktarına bağlı olarak elde edilen darbe sönümlene grafikleri, 5. ve üstü derecelerden parabolik denklemler ile deneysel verilere 0,99 ve üstü R^2 değerleri ile yakınsanabilmektedir. Bu grafiklerin çukur noktalarına göre simetrik olmamaları ve hareketin 5. derece ve üstü parabolik denklemler ile hareketin modellenilebiliyor olması da, lastik numundeki darbe sönümlene davranışının ideal bir yay hareketinden daha karmaşık, doğrusallık içermeyen ve enerji sönümlenmenin meydana geldiği bir olay olduğunu göstermektedir.

Tepe noktasına göre simetrik olmayan bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere, lastik numune, sadece ideal bir yay gibi davranmamakta, malzeme karakteristiğine göre darbe enerjisinin sönümlenmesini de gerçekleştirmektedir. Aşağıdaki Tablo 5.8'de tüm deneylerin gerçek deney verilerine göre uyumluluğu incelenmektedir. Burada en iyi korelasyonlar, tüm malzeme tipleri için, optimum momentum ve hızın yakalandığı, 25 cm ve 61 cm'den 2,5 kg kütle ve 25 cm'den 5,0 kg kütle serbest düşmeleri ile elde edilmiştir. Sırasıyla Marlow, Ogden ve Neoh malzeme modelleri en iyi korelasyonları genel olarak tüm modellerde yakalmışlardır.

Tablo 5.8. Tüm deneyler korelasyon özet tablosu

	DENEY 25CM - 1,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 4.)	DENEY 25 CM - 2,5 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	DENEY 25 CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	DENEY 61 CM - 1,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	DENEY 61 CM - 2,5 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)	DENEY 61CM - 5,0 KG (EĞ. ÇİZ. POL 5.)
DENEY	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
ABAQUS NEOH	★ 98,08%	★ 97,17%	93,58%	78,87%	★ 98,55%	79,70%
ABAQUS OGDEN	75,63%	93,32%	★ 99,74%	★ 98,71%	94,57%	★ 86,72%
ABAQUS YEOH	91,92%	★ 99,53%	97,60%	90,95%	★ 97,69%	83,49%
ABAQUS REDUCED POLYNOMIAL	91,92%	★ 97,17%	93,58%	78,87%	★ 98,55%	83,49%
ABAQUS MARLOW	★ 99,75%	★ 99,50%	★ 98,83%	85,19%	★ 96,71%	★ 85,38%

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, deforme edilebilir bir iş parçasının darbe karakteristiklerini ölçümlemek için, yeni ve özgün bir deney aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu deney düzeneği, daha sonra, özel bir elastomerik sönümleyici malzemenin, darbe yüklerindeki davranışını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Darbe deneyleri DIN 3763 standardına göre uyumluluk gösterecek şekilde, farklı yüksekliklerden, farklı kütlelerin serbest düşürülmesi sonucunda, standarda uygun hızlar yakalanarak sürdürülmüştür. Sonlu elemanlar modeli doğrulamasında 2,5 kg'lık kütlenin 61 cm'den bırakıldığı deney, referans deney olarak alınmıştır. Darbe olayı çok kısa sürelerde tamamlandığı için yüksek frekanslarda örnekleme ihtiyacı duyulmuştur. 10.000 fps'de görüntü kaydedebilen bir yüksek hızlı kamera ile görüntüler üzerinden mesafelerin ölçülmesi ile gerekli örnekleme frekansları elde edilmiştir. Kaydedilmiş mesafeler sonlu elemanlar modelinde malzeme davranışını kalibre etmede kullanılmıştır.

Deneyisel sonuçlar ile farklı malzeme modellerini kullanan sonlu elemanlar analizlerinin sayısal sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, Marlow ve Ogden malzeme modellerini kullanan sonlu elemanlar modelinin deney sonuçlarına en uyumlu sonuçları verdiği görülmüştür. Marlow modeli ortalama %94 üstü bir ortalama korelasyon değeri ile deney sonuçlarına yakınsama sağlarken, Ogden modeli de Marlow modelini yakalayan %90 civarı bir ortalama korelasyon değeri ile deney sonuçlarına yakınsama sağlamıştır. Çarpma momentumlarını düşük orta ve yüksek olarak sınıflandırdığımızda, düşük ve yüksek momentum ile gerçekleştirilen çarpma olaylarının modellenmesinde, malzeme modellerinin gerçek modele yakınsamasının azaldığı, yakınsamanın %95'lerden %85'ler civarında korelasyon değerlerine düştüğü görülmektedir. Burada temel olarak yüksek hızlardan ve kütle artışından kaynaklı büyük deformasyonlarda, malzeme modellerinin kararlılık göstermemesi ile karşılaşılmaktadır. Sabit bir Poison oranının varsayıldığı bu deneyler, yüksek hız ve kütlede sıkıştırılabilirliğin değiştiğini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmanın kapsamı içinde, tüm deneyler için tam bir korelasyon

yakalamak olmadığından dolayı, malzeme modellerinin parametrelerinin en optimuma getirilmesi için, sıkıştırılabilirlik ve benzeri malzeme özelliklerini etkileyen sabitler ile çalışma yapılmamıştır. Ancak tüm ilgili malzeme modelleri için analizler koşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bir amacı da, farklı tüm darbe hız ve kütlelerinde malzeme davranışına en iyi yakınsama yapan bir malzeme modeli bulmaktır. Farklı şekillerde hazırlanmış numuneler hazır olmaksızın, en iyi malzeme modelinde, analizleri istenen şekil geometrileri için sonlu elemanlar modelini koşturmak ve bu sayede darbe sönümleme için optimum tasarımın ortaya çıkmasını mümkün kılmak amaçlanmıştır.

Oluşturulmuş olan deney düzeneği ve analiz yapısının geliştirilmesi ile tasarım doğrulama çalışmalarının daha kesin ve hızlı yapılabilmesi mümkün olabilecektir. Belirtilen bu analiz sistemi için geliştirme noktaları,

- Kamera ile görüntü alma yetkinliğinin arttırılması,
- Alınan görüntülerin görüntü işleme metodları ile daha ileri ve anlamlandırılmış ve sayısal hale getirilmiş bilgiler bütünü haline getirilmesi, karşılaştırmaların niteliğinin arttırılması,
- Test numunelerinin tek eksenli çekme deney verileri dışında, iki eksenli ve düzlemsel çekme deneyi verilerinin temin edilmesi ve malzeme modellerine eklenmesi,
- Analizlerin daha gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için malzeme modeli geliştirme çalışmalarının yapılması

olarak sıralanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] CJAC, Product Overview - Operating Principles of Shock Absorbers, <http://www.c-jac.com/eng/introduce/introduce04.asp>, (Ziyaret tarihi: 28 Mart 2017)
- [2] Cushioning, Molded Expanded Polystyrene (Styrofoam) Cushioning, https://en.wikipedia.org/wiki/Cushioning#/media/File:Expanded_polystyrene_foam_dunnage.jpg, (Ziyaret tarihi: 01 Mart 2017)
- [3] GMT, Anti-Vibration Mount Specialists, Suppliers of Rubber-to-Metal Bonded Products and Moulded Rubber Components, <http://www.army-technology.com/contractors/noise/gmt/gmt4.html>, (Ziyaret tarihi: 30 Mart 2017)
- [4] İşgüvenlik store, Şok Emici / Energy Absorber (Emniyet Kemerini İçin), <http://www.isguvenlikstore.com/urun/sok-emici-energy-absorber-emniyet-kemerini-icin/1711>, (Ziyaret tarihi: 28 Mart 2017)
- [5] ITT Enidine Inc., About Industrial Shock Absorbers | Benefits of Shock Absorbers | ITT Enidine, <http://www.enidine.com/Resources/Industrial-Shock-Absorbers/>, (Ziyaret tarihi: 14 Mayıs 2016)
- [6] Luo R. K., Wu W. X. and Mortel W. J., Effect of Loading Environment on Rubber Bolster Springs Used in Railway Vehicle Bogies, *Plastics, Rubber and Composites*, 2000, **29**(2), 88-91.
- [7] Luo R. K., Impact Simulation and Experiment on Rubber Anti-vibration Systems, *Polymer Testing*, 2016, **50**, 335-342.
- [8] Niemczura J. and Ravi-Chandar K., On the Response of Rubbers at High Strain Rates—II. Shock Waves, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2011, **59**(2), 442-456.
- [9] Dean G. and Wright L., An Evaluation of the Use of Finite Element Analysis for Predicting the Deformation of Plastics Under Impact Loading, *Polymer Testing*, 2002, **22**(6), 625-631.
- [10] Albrecht A. B. and Ravi-Chandar K., High Strain Rate Response of Rubber Membranes, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, **64**, 377-395.
- [11] Verron E., Chagnon G. and Le Cam J. B., Hyperelasticity with Volumetric Damage, Editors: Heinrich G., Kaliske M., Lion A., Reese S., *Constitutive Models for Rubber VI*, CRC Press, Rotterdam, 279-284, 2010.

- [12] Dean G. and Read B., Modelling the Behaviour of Plastics for Design Under Impact, *Polymer Testing*, 2001, **20**(6), 677-683.
- [13] Duan Y., Saigal A., Greif R. and Zimmerman M. A., Analysis of Multiaxial Impact Behavior of Polymers, *Polymer Engineering & Science*, 2002, **42**(2), 395-402.
- [14] Bower A. F., *Applied Mechanics of Solids*, 1th ed, Taylor and Francis Group, LLC, United States of America, 2010.
- [15] Aydoğan A., Finite Element Modelling of Vulcanized Silicon Rubber-Steel Flexure Joints Used in Thrust Vector Control, Master's Thesis, Hacettepe University, Graduate School of Science and Engineering, Ankara, 2016, 430886.
- [16] Mooney M., A Theory of Large Elastic Deformation, *Journal of Applied Physics*, 1940, **11**(9), 582-592.
- [17] Rivlin R. S., & Saunders D. W., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. VII. Experiments on the Deformation of Rubber, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1951, **243**(865), 251-288.
- [18] Blatz P. J. and Ko W. L., Application of Finite Elastic Theory to the Deformation of Rubbery Materials, *Transactions of the Society of Rheology*, 1962, **6**(1), 223-252.
- [19] Yeoh O. H., Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, 1993, **66**(5), 754-771.
- [20] Ogden R.W., Large Deformation Isotropic Elasticity - on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids, *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1972, **326**(1567), 565-584.
- [21] Marlow R. S., On the Stress in an Internally Constrained Elastic Material, *Journal of Elasticity*, 1992, **27**(2), 97-131.
- [22] Rusmee P., Material Degradation,
<http://www.mech.utah.edu/~rusmeeha/labNotes/degradation.html>, (Ziyaret tarihi: 25 Mart 2017)



EKLER

Ek-A

ÖRNEK BİR ABAQUS INPUT DOSYASI

```
*Heading
** Job name: 61_5000_OGDEN Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 6.14-2
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=Part-1 "Sönümleyici takozun adı"
*Element, type=CAX4R
"Elemanlar inp dosyasından silinmiştir"
*Nset, nset=Set-1, generate
  1, 416, 1
*Elset, elset=Set-1, generate
  1, 370, 1
** Region: (Section-1:Set-1), (Controls:Default)
*Elset, elset=_I1, internal, generate
  1, 7, 1
** Section: Section-1
*Solid Section, elset=_I1, material=Rubber
,
** Region: (Section-1:Set-1), (Controls:EC-1)
*Elset, elset=_I2, internal, generate
  8, 370, 1
** Section: Section-1
*Solid Section, elset=_I2, controls=EC-1, material=Rubber
,
*End Part
**
*Part, name=Yuk_5000gram "Darbe Yüğüne verilen ad"
*Node
*Element, type=CAX4R
*Nset, nset=Set-1, generate
  1, 810, 1
*Elset, elset=Set-1, generate
  1, 720, 1
** Section: Section-2
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel
,
*End Part
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Yuk_2500gram-1, part=Yuk_5000gram
```

```

0., 35., 0.
*End Instance
**
*Instance, name=Part-1-1, part=Part-1
*End Instance
**
*Nset, nset=Set-1, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 810, 1
*Elset, elset=Set-1, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 720, 1
*Nset, nset=Set-2, instance=Part-1-1
4, 5, 6, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
*Elset, elset=Set-2, instance=Part-1-1
14, 20, 21, 26, 27, 34, 35, 44, 95, 97, 98, 99, 101, 110, 114
*Nset, nset=Set-3, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 810, 1
*Elset, elset=Set-3, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 720, 1
*Nset, nset=Set-4, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 810, 1
*Elset, elset=Set-4, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 720, 1
*Nset, nset=ust-dis, instance=Yuk_2500gram-1, generate
730, 810, 1
*Elset, elset=ust-dis, instance=Yuk_2500gram-1, generate
641, 720, 1
*Elset, elset=_Surf-3_S2, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
80, 720, 80
*Elset, elset=_Surf-3_S3, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
641, 720, 1
*Elset, elset=_Surf-3_S4, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 641, 80
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-3
_Surf-3_S2, S2
_Surf-3_S3, S3
_Surf-3_S4, S4
*Elset, elset=_Surf-6_S2, internal, instance=Part-1-1
11, 28, 37, 38, 40, 55, 82, 102, 103, 124, 130, 131, 138
*Elset, elset=_Surf-6_S4, internal, instance=Part-1-1
13, 29, 53, 56, 58, 64, 70, 83, 84, 86, 88, 90, 91, 360
*Elset, elset=_Surf-6_S3, internal, instance=Part-1-1
17, 51, 54, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 73, 76, 77, 78, 87, 88
92, 107, 132, 135, 147, 229
*Elset, elset=_Surf-6_S1, internal, instance=Part-1-1
8, 18, 19, 23, 47, 57, 75, 89, 91, 109, 115, 121, 122, 128, 144, 145
253, 310, 353, 356, 357, 362
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-6
_Surf-6_S2, S2
_Surf-6_S4, S4
_Surf-6_S3, S3

```

```

_surf-6_S1, S1
*Elset, elset=_m_surf-1_S1, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 80, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=m_surf-1
_m_surf-1_S1, S1
*Elset, elset=_m_surf-7_S1, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 80, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=m_surf-7
_m_surf-7_S1, S1
*Elset, elset=_rubber-all_S4, internal, instance=Part-1-1
13, 29, 53, 56, 58, 64, 70, 90, 91, 360
*Elset, elset=_rubber-all_S2, internal, instance=Part-1-1
11, 28, 37, 38, 40, 55, 102, 103, 124, 130, 131, 138
*Elset, elset=_rubber-all_S3, internal, instance=Part-1-1
17, 51, 54, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 73, 76, 77, 78, 88, 107
132, 135, 147, 229
*Elset, elset=_rubber-all_S1, internal, instance=Part-1-1
18, 19, 47, 57, 75, 89, 91, 121, 122, 128, 144, 145, 253, 310, 353, 356
357, 362
*Surface, type=ELEMENT, name=rubber-all
_rubber-all_S4, S4
_rubber-all_S2, S2
_rubber-all_S3, S3
_rubber-all_S1, S1
*Elset, elset=_s_surf-1_S3, internal, instance=Part-1-1
17, 64, 66, 67, 73, 76, 77, 78, 107, 147
*Elset, elset=_s_surf-1_S1, internal, instance=Part-1-1
18, 19, 47, 57, 75, 89, 91, 121, 122, 128
*Elset, elset=_s_surf-1_S2, internal, instance=Part-1-1
11, 55, 124, 130, 131, 138
*Elset, elset=_s_surf-1_S4, internal, instance=Part-1-1
53, 56, 58, 70, 91
*Surface, type=ELEMENT, name=s_surf-1
_s_surf-1_S3, S3
_s_surf-1_S1, S1
_s_surf-1_S2, S2
_s_surf-1_S4, S4
*Elset, elset=_s_surf-7_S2, internal, instance=Part-1-1
11, 55, 124, 130, 131, 138
*Elset, elset=_s_surf-7_S4, internal, instance=Part-1-1
53, 56, 58, 70, 91
*Surface, type=ELEMENT, name=s_surf-7
_s_surf-7_S2, S2
_s_surf-7_S4, S4
*Elset, elset=_yuk-alt_S1, internal, instance=Yuk_2500gram-1, generate
1, 80, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=yuk-alt
_yuk-alt_S1, S1
*End Assembly
**

```

```

** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, second order accuracy=YES
1., 1., 1.
*Amplitude, name=Amp-1, definition=SMOOTH STEP
      0.,      0.,      0.001,      1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=Rubber
*Density
1.13e-06,
*Hyperelastic, ogden, test data input, poisson=0.49
*Uniaxial Test Data
      0., 0.
      600., 0.1
      1200., 0.5
      1960., 1.
      2880., 1.5
      4000., 2.
      6000., 2.5
      8400., 3.
      12000., 3.5
      16000., 4.
*Material, name=Steel
*Density
7.85e-06,
*Elastic
2.1e+11, 0.3
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=IntProp-1
*Friction
0.3,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: displaceme Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
Set-2, ENCASTRE
**
** PREDEFINED FIELDS
**
** Name: velocity1 Type: Velocity
*Initial Conditions, type=VELOCITY
Set-4, 1, 0.
Set-4, 2, -3460.
** -----

```

```

**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
Carpma
*Dynamic, Explicit
, 0.017
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-2
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=PENALTY, cpset=Int-2
Surf-6,
** Interaction: Int-3
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=KINEMATIC,
cpset=Int-3
m_Surf-7, rubber-all
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, number interval=100
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
E, EVF, LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SVAVG
*Contact Output
CSTRESS,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

```

Ek-B

HİPERELASTİK MALZEME MODELLERİ BÜNYE DENKLEMLERİ KATSAYILARI

HYPERELASTICITY - OGDEN STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 1			
I	MU_I	ALPHA_I	D_I
1	914,8213340	2,8333556	0,0000440
STABILITY LIMIT INFORMATION			
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
VOLUMETRIC TENSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			
VOLUMETRIC COMPRESSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			

HYPERELASTICITY - OGDEN STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 3			
I	MU_I	ALPHA_I	D_I
1	-23506,4131000	-1,1527416	0,0000145
2	10,4274119	5,9421302	0,0000000
3	26273,3211000	-1,9554979	0,0000000
STABILITY LIMIT INFORMATION			
WARNING: UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL			
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,2568			
BIAXIAL TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0,1600			
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0,4300			
PLANAR COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,3007			
VOLUMETRIC TENSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			
VOLUMETRIC COMPRESSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			

HYPERELASTICITY - NEO-HOOKEAN STRAIN ENERGY			
D1	C10	C01	
0,0000275	733,2398640	0,0000000	
STABILITY LIMIT INFORMATION			
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
VOLUMETRIC TENSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			
VOLUMETRIC COMPRESSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			

HYPERELASTICITY - POLYNOMIAL STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 3				
D1	C10	C01		
D2	C20	C11	C02	
D3	C30	C21	C12	C03
0,0000320	630,1666530	0,0000000		
0,0000000	-2,7765728	0,0000000	0,0000000	
0,0000000	0,8171363	0,0000000	0,0000000	0,0000000
STABILITY LIMIT INFORMATION				
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
UNIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
BIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
PLANAR TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
PLANAR COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS				
VOLUMETRIC TENSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS				
VOLUMETRIC COMPRESSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS				

HYPERELASTICITY - POLYNOMIAL STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 2			
D1	C10	C01	
D2	C20	C11	C02
0,0000142	-2976,2197400	4392,9147100	
0,0000000	67,3694626	-257,1964310	1303,6168200
STABILITY LIMIT INFORMATION			
WARNING: UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL			
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0			
BIAXIAL TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0,13			
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 0,33			
PLANAR COMPRESSION: UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,			
VOLUMETRIC TENSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			
VOLUMETRIC COMPRESSION: STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS			

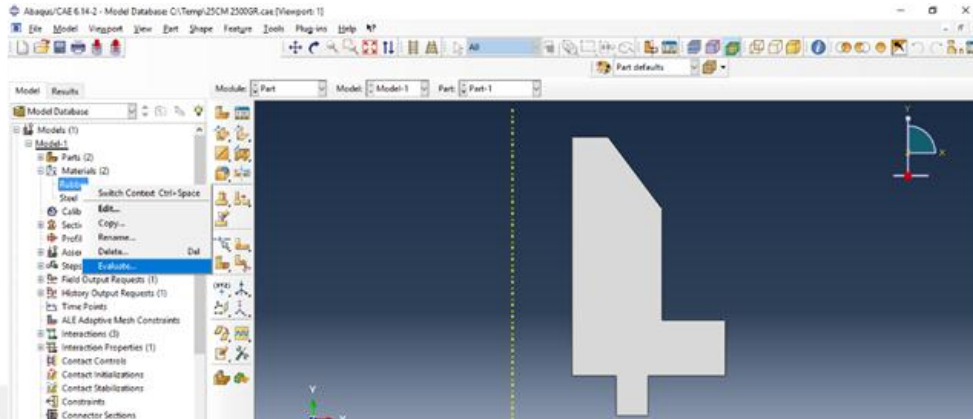
HYPERELASTICITY - MARLOW			
STABILITY LIMIT INFORMATION			
UNIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: STABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR COMPRESSION: STABLE FOR ALL STRAINS			

HYPERELASTICITY - POLYNOMIAL STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 4					
D1	C10	C01			
D2	C20	C11	C02		
D3	C30	C21	C12	C03	
D4	C40	C31	C22	C13	C04
0,0000288	698,3997830	0,0000000			
0,0000000	-32,5889310	0,0000000	0,0000000		
0,0000000	3,5983126	0,0000000	0,0000000	0,0000000	
0,0000000	-0,0686628	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
STABILITY LIMIT INFORMATION					
WARNING: UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL					
UNIAXIAL TENSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 4,3200		
UNIAXIAL COMPRESSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,9304		
BIAXIAL TENSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 2,7900		
BIAXIAL COMPRESSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,5664		
PLANAR TENSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LARGER THAN 4,2600		
PLANAR COMPRESSION:			UNSTABLE AT A NOMINAL STRAIN LESS THAN -0,8099		
VOLUMETRIC TENSION:			STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS		
VOLUMETRIC COMPRESSION:			STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS		

HYPERELASTICITY - MOONEY-RIVLIN STRAIN ENERGY			
	D1	C10	C01
	-0,0000776	1540,6726600	-1800,2981000
STABILITY LIMIT INFORMATION			
WARNING: UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL			
UNIAXIAL TENSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
UNIAXIAL COMPRESSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL TENSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
BIAXIAL COMPRESSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR TENSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
PLANAR COMPRESSION: UNSTABLE FOR ALL STRAINS			
VOLUMETRIC TENSION:			UNSTABLE AT A VOLUME RATIO LARGER THAN 1,0000
VOLUMETRIC COMPRESSION:			UNSTABLE AT A VOLUME RATIO LESS THAN 1,0000

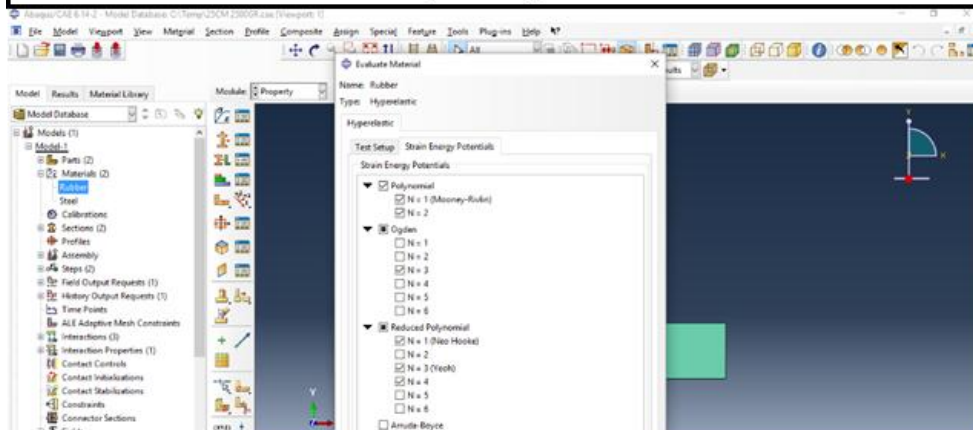
Ek-C

ABAQUS HİPERELASTİK MALZEME KATSAYILARI BULMA ALT PROGRAMI ÇALIŞTIRMA



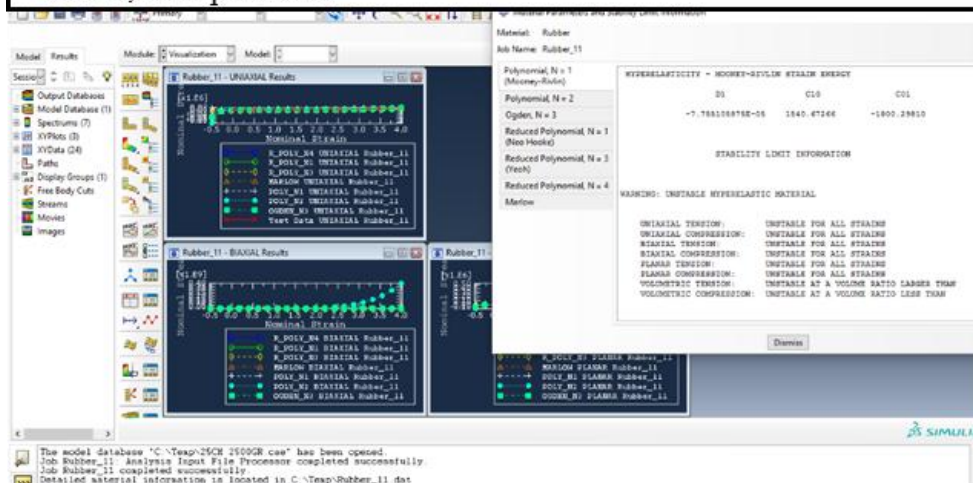
1th Step:

Select Rubber from Materials, then right click and select evaluate.



2nd Step:

Evaluate material section, select the evaluation required material models, then press ok.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Makaleler

- [1] **Kutlu E.**, Oysu C., Sınmazçelik T., Analysing Impact Response of a Rubber Shock Absorber Using Experimental Data and Finite Element Method, *Journal of International Scientific Publications*, 2016, **10**, 294-304.

Sözlü Sunumları

- [1] **Kutlu E.**, Oysu C., Sınmazçelik T., Analysing Impact Response of a Rubber Shock Absorber Using Experimental Data and Finite Element Method, *Materials, Methods & Technologies 2016 18th International Conference*, Elenite, Bulgaristan, 26-30 Haziran 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Evren Kutlu, 1980’de İzmir’de doğmuş, ilk, orta ve lise eğitimini Ödemiş’te tamamlamıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun (2005) olup, askerlik görevini Genel Kurmay’da Makine Mühendisi Yedek Subay (2006) olarak yapmıştır. Vestel (2007), Brisa (2007-2012) ve Ford’da (2012-2013) AR-GE birimleri ve proje departmanlarında araştırma-geliştirme, makine geliştirme ve ürün geliştirme mühendisliği pozisyonlarında çalışmıştır. 2013’ten bu yana Kocaeli Üniversitesi’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta olup, Makine Bölümü derslerini vermektedir. 2013-2015 yılları arasında ayrıca Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Transferi Ofisi Yöneticisi olarak çalışmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ve malzemelerin darbe davranışlarının araştırılması ve modellenmesi ile ilgilenmektedir.