

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ANKASTRE BULAŞIK MAKİNESİNİN DÜŞME TESTİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri ERASLAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustiği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ANKASTRE BULAŞIK MAKİNESİNİN DÜŞME TESTİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sabri ERASLAN
(503131412)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Dinamiği, Titreşim ve Akustiği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Yüce Şanlıtürk

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131412 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sabri ERASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİR ANKASTRE BULAŞIK MAKİNESİNİN DÜŞME TESTİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Metin GÜRGÖZE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Umud Esat ÖZTÜRK
Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.

Teslim Tarihi : **27 Kasım 2015**
Savunma Tarihi : **25 Aralık 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen ve kıymetli bilgileriyle bana yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kenan Yüce Şanlıtürk'e, Arçelik A.Ş. ARGE Direktörlüğü'ne, özellikle Cem Kural, Mehmet Durmaz, Levent Hasanreisoglu, Celal Vatansever, Barış Tekdemir, Kutay Edis, İsmet Bayhan ve Özgür Uysal'a, İTÜ Makina Fakültesi Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustik Anabilim Dalı'nın değerli mensuplarına, tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2015

Sabri Eraslan
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tarifi	2
1.2 Literatür Özeti	3
1.2.1 Beyaz eşya düşme testleri	3
1.2.2 Polimer köpük malzemelerin deneysel yöntemlerle modellenmesi.....	5
1.2.3 Polimer köpük malzemelerin sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi.....	8
1.3 Standartlar ve Deney Prosedürü	10
1.4 Amaç ve Kapsam.....	14
2. TEORİ.....	17
2.1 Polimer Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri	17
2.1.1 Mekanik özellikleri etkileyen parametreler.....	19
2.1.2 Tek eksen basma durumundaki mekanik özellikler	23
2.2 Dinamik Analiz Teorisi: Sonlu Elemanlar Metodu.....	27
2.2.1 Eksplisit çözüm algoritması	28
2.2.2 Eksplisit algoritmanın zaman adımının belirlenmesi	31
3. DÜŞME TEST DÜZENEGİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÖLÇÜMLER.....	35
3.1 Düşük Gerinim Hızlarında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	36
3.2 Yüksek Gerinim Hızlarında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	38
3.3 Düşme Testi Düzenegi Tasarımı	41
3.3.1 Düşme test düzeneginin bileşenleri.....	42
3.3.2 Düşme test düzeneginin sensör özellikleri	45
3.3.3 Test düzeneginin çalışma prensibi	50
3.4 Sonuçlar	54
4. DÜŞME TESTİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ	67
4.1 Sonlu Eleman Metodolojisi	67
4.2 Düşme Testi Düzeneginin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	68
4.2.1 Sonlu eleman modelinin oluşturulması	68
4.2.2 Temas algoritmaları ve başlangıç koşullarının tariflenmesi	71
4.2.3 Genleştirilmiş polistrenin malzeme modelinin oluşturulması.....	73
4.3 Sonuçlar	76
5. ANKASTRE BULAŞIK MAKİNASI DÜŞME ANALİZİ	79
5.1 Ankastre Bulaşık Makinasının Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	80
5.1.1 İç ve dış saclar	83

5.1.2 Plastik komponentler	84
5.1.3 Taban grubu.....	84
5.1.4 Ambalaj malzemeleri	85
5.2 Temas, Bağlantı ve Başlangıç Koşullarının Tanımlanması.....	86
5.3 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	88
5.3.1 Johnson-Cook malzeme modeli	89
5.3.2 Elastik malzeme modeli	90
5.3.3 Elasto-Plastik malzeme modeli	91
5.4 Analiz Sonuçları	92
5.4.1 25 cm yükseklikten düşme analizi sonuçları	93
5.4.2 40 cm yükseklikten düşme analizi sonuçları	96
6. ANKASTRE BULAŞIK MAKİNASI FİZİKSEL DÜŞME TESTİ.....	101
6.1 Deneysel Yaklaşım	101
6.2 Sonuçlar	103
6.2.1 25 cm yükseklikten fiziksel düşme testi sonuçları	104
6.2.2 40 cm yükseklikten fiziksel düşme testi sonuçları	106
7. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK	
ÇALIŞMALAR.....	109
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ	117

KISALTMALAR

A.Ş.	: Anonim Şirket
ARGE	: Araştırma Geliştirme
ASTM	: American Society for Testing and Materials
EPS	: Expanded Polystyrene
PE	: Polyethylen
ISO	: International Organization for Standardization
FEM	: Finite Element Method
CAD	: Computer Aided Drawing
CAE	: Computer Aided Engineering
DC	: Direct Current
N	: Newton
mV	: Milivolt
MPa	: Megapaskal
kPa	: Kilopaskal
gr	: Gram
kg	: Kilogram
dak, dk	: Dakika
sn	: Saniye
kg/m³	: Kilogram/Metreküp
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
USB	: Universal Serial Bus
RWALL	: Rijit Duvar
ABS	: Akrilonitril Bütadien Strien
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat

SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
ρ	: Yoğunluk
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
V	: Hız
g	: Yerçekimi İvmesi
F	: Kuvvet
$a(t)$	: İvme
m	: Kütle
Δt_{cr}	: Kritik Zaman Adımı
h	: Zaman Admı
ω_{maks}	: Maksimum Doğal Frekans
E	: Elastik Modül
σ	: Gerilme
ν	: Poisson Oranı
σ_{akma}	: Akma Gerilmesi
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik Gerilmesi
$\sigma_{gerçek}$	: Gerçek Gerilme
ϵ	: Gerinme
ϵ_p	: Plastik Şekil Değişim Miktarı
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik Gerinmesi
$\epsilon_{gerçek}$	: Gerçek Gerinme
$\dot{\epsilon}$	: Gerinim Hızı
$\dot{\epsilon}_0$	: Referans Gerinim Hızı
$[K]$	: Direngenlik Matrisi
$[C]$	: Sönüm Matrisi
$[M]$	: Kütle Matrisi
$\{x\}$	: Yerdeğiştirme Vektörü
$\{\dot{x}\}$	: Hız Vektörü
$\{\ddot{x}\}$	: İvme Vektörü
σ_{ij}^s	: Gerilme Tensörü
η^*	: Sönüm Katsayısı
P_0	: Başlangıç Hava Basıncı
b	: Pekleşme Modülü
c	: Gerinim Hızı Katsayısı
n	: Pekleşme Üsteli
γ	: Hacimsel Deformasyon
Φ	: Gözeneklilik Katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ürünün kütlesine göre düşme testi yüksekliği [21]......	13
Çizelge 5.1 : Ankastre bulaşık makinası modelinde bulunan eleman adetleri.	82
Çizelge 5.2 : 304 ve 430 sacı için Johnson-Cook malzeme parametreleri [36,37]. ..	90

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Köpük malzemelerin tek eksen basma durumundaki gerilme-gerinme eğrisi [14].	18
Şekil 2.2 : Mekanik özelliklerin yoğunlukla değişimi [11].	19
Şekil 2.3 : Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi [7].	20
Şekil 2.4 : Kartezyen koordinat takımı ve basma doğrultuları [14].	20
Şekil 2.5 : Farklı doğrultulardaki basma kuvvetleri altındaki gerilme-gerinme eğrileri [14].	21
Şekil 2.6 : Gerinim hızının mekanik özelliklere etkisi [16].	22
Şekil 2.7 : Straforun tekrarlı yükleme ve boşalma durumunda gerilme-gerinme eğrisi [14].	22
Şekil 2.8 : Karakteristik eleman boyunun hesabı [33].	32
Şekil 3.1 : Standart çekme testi cihazı.	36
Şekil 3.2 : Zwick Z020 basma ve çekme test cihazı.	37
Şekil 3.3 : Zwick Z020 basma deneyi.	37
Şekil 3.4 : Düşme kuleleri.	38
Şekil 3.5 : Split-Hopkinson basınç çubuğu [23].	40
Şekil 3.6 : Kam plastometre [24].	40
Şekil 3.7 : Düşme test düzeneği şeması [31].	41
Şekil 3.8 : Düşme test düzeneğinin CAD modeli.	42
Şekil 3.9 : 90x90 mm Al profillerin resmi.	43
Şekil 3.10 : Düşme test düzeneğinde kullanılan lineer bilyalı yatak.	44
Şekil 3.11 : Düşen kütle ve lineer olarak yataklanması.	44
Şekil 3.12 : Ölçüm cihazlarının CAD model yerleşimi.	45
Şekil 3.13 : Himmelstein 1500 ASK-300 kuvvet sensörü.	46
Şekil 3.14 : Cihazlar : (a) Himmelstein marka sinyal yükseltici. (b) Yokogawa marka veri toplama cihazı.	47
Şekil 3.15 : Agilent VEE yazılımı arayüzü.	47
Şekil 3.16 : Kuvvet verisi toplama sistemi.	48
Şekil 3.17 : Micro-Epsilon marka lazer deplasman ölçer.	48
Şekil 3.18 : RS232 - USB dönüştürücü.	49
Şekil 3.19 : Lazer sensörü : (a) Gönderilen ve yansıyan ışınlar. (b) Yansıma bölgesi.	49
Şekil 3.20 : İvmeölçerin test düzeneğine yerleştirilmesi.	50
Şekil 3.21 : Düşme test düzeneği.	51
Şekil 3.22 : Sensörlerin yerleşimi : (a) Kuvvet sensörü. (b) Lazer deplasman sensörü.	51
Şekil 3.23 : Veri toplama cihazları.	52
Şekil 3.24 : Kuvvet sensöründen alınan veri.	53
Şekil 3.25 : Lazer deplasman sensöründen alınan veri.	53
Şekil 3.26 : Pulse yazılımına ait görsel.	54
Şekil 3.27 : Kuvvet sensörü verisi	55

Şekil 3.28 : İvmeölçer verisi.	56
Şekil 3.29 : Düşen kütlenin doğal frekansları.	56
Şekil 3.30 : Düşen kütlenin çekiç testi.	57
Şekil 3.31 : Filtrelenmiş ivmeölçer verisi.	58
Şekil 3.32 : İvmeölçer ve kuvvet sensörü verilerinin kıyaslanması.	59
Şekil 3.33 : Yoğunluğu 20 kg/m ³ olan malzemenin farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.	61
Şekil 3.34 : Yoğunluğu 24 kg/m ³ olan malzemenin farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.	62
Şekil 3.35 : Yoğunluğu 26 kg/m ³ olan malzemenin farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.	63
Şekil 3.36 : Yoğunluğu 30 kg/m ³ olan malzemenin farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.	64
Şekil 3.37 : 1000 mm/dak hızda farklı yoğunluktaki numunelere ait gerilme-gerinme davranışı.	65
Şekil 3.38 : Köpük malzemenin 70 cm yükseklikten yapılan düşme testlerinin, yoğunluğa bağlı gerilme-gerinme davranışı.	65
Şekil 4.1 : Strafor numunesinin modellenmesi : (a) Hekza elemanlar. b) Tetra elemanlar	69
Şekil 4.2 : Düşen kütlenin sonlu elemanlar modeli.	70
Şekil 4.3 : Strafor numunesi ile rijit duvar (zemin) teması.	71
Şekil 4.4 : Temas : (a) Yüzeylerin tanımlanması. (b) İlişkinin görüntülenmesi.	72
Şekil 4.5 : Başlangıç koşullarının uygulanması.	72
Şekil 4.6 : Maxvell-Kelvin-Voigt malzeme modeli [25].	75
Şekil 4.7 : Malzemeye ait gerilme-gerinme diyagramı [33].	75
Şekil 4.8 : 20 kg/m ³ yoğunluktaki numuneye ait 25 cm'den düşme sonuçları.	77
Şekil 4.9 : 20 kg/m ³ yoğunluktaki numuneye ait 40 cm'den düşme sonuçları.	77
Şekil 5.1 : Ürüne ait sonlu elemanlar modeli.	80
Şekil 5.2 : Eleman geçişi : (a) Eksplicit analiz. b) İmplicit analiz [25].	81
Şekil 5.3 : Eleman ağı : (a) Uygun. (b) Tavsiye edilmeyen [25].	81
Şekil 5.4 : Eleman ağı : (a) Uygun. (b) Tavsiye edilmeyen [33].	82
Şekil 5.5 : Dış saclar : (a) Orta yüzey. (b) Sonlu elemanlar modeli.	83
Şekil 5.6 : İç saclara ait sonlu elemanlar modeli.	83
Şekil 5.7 : Plastik komponentler grubu sonlu elemanlar modeli.	84
Şekil 5.8 : Taban grubu sonlu elemanlar modeli.	85
Şekil 5.9 : Ambalaj malzemelerinin sonlu elemanlar modeli.	86
Şekil 5.10 : Vida bağlantı bölgeleri.	87
Şekil 5.11 : 25 cm yükseklikten düz düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.	93
Şekil 5.12 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.	94
Şekil 5.13 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu dış saclarda oluşan gerilmeler.	95
Şekil 5.14 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu iç saclarda oluşan gerilmeler.	95
Şekil 5.15 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu straforda oluşan maksimum gerilme.	96
Şekil 5.16 : 40 cm yükseklikten düz düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.	97
Şekil 5.17 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.	98

Şekil 5.18 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu dış saclarda oluşan gerilmeler.	98
Şekil 5.19 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu iç saclarda oluşan gerilmeler.	99
Şekil 5.20 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu straforda oluşan maksimum gerilme.	100
Şekil 6.1 : Düşme testi düzeneği.	101
Şekil 6.2 : Düşme testine hazır haldeki ankastre bulaşık makinası.	102
Şekil 6.3 : 25 cm düz düşme sonucunda plastik şasi ve komponentler.	104
Şekil 6.4 : 25 cm sağ kenar üzerine düşme sonucundaki köpük malzeme.	105
Şekil 6.5 : Düşme testleri sonucunda iç sacların hasar durumu.	105
Şekil 6.6 : 40 cm düz düşme sonucundaki köpük malzeme.	106
Şekil 6.7 : 40 cm düz düşme sonucunda alt şaside oluşan kırılma bölgesi.	107
Şekil 6.8 : 40 cm arkaya düşme sonucunda alt şaside oluşan çatlak bölgesi.	107
Şekil 6.9 : 40 cm sağ kenar düşme sonucunda ön bölümde oluşan deformasyon. ..	108

BİR ANKASTRE BULAŞIK MAKİNESİNİN DÜŞME TESTİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

ÖZET

Beyaz eşya sektöründe, ürünlerin depolanması ve nakliyesi süreçlerinde çarpma ve düşme sonucu hasar görmeleri önemli bir maliyete neden olmaktadır. Düşme ve çarpma gibi olumsuz senaryoların yaşanması neticesinde ürünlerin tamir edilmesi veya kullanılmaz hale gelmesi olasıdır. Ürünlerin üretim hattından çıkıp müşteriye ulaşıncaya kadar birçok taşıma aracına yüklenilip indirilmesi, düşme ve çarpma risklerine neden olmaktadır. Bu nedenle ürünlerde meydana gelebilecek olası hasarları önlemek için, beyaz eşyalar koruyucu paketleme malzemeleri ile muhafaza edilmektedir. Paketleme malzemesi olarak basma durumundaki enerji yutumlama özellikleri yüksek, polimer köpük malzemeler tercih edilmektedir. Ürünün düşme ve çarpması sonucunda, paketleme malzemesinin yeterli performansı gösterip göstermediğinin belirlenmesi amacıyla, fabrika ortamında fiziksel düşme testleri yapılmaktadır. Fabrika ortamında yapılan bu fiziksel düşme testleri önemli bir maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Fiziksel düşme testlerinde ortaya çıkan bu maliyet ve zaman kaybı, endüstride çalışmakta olan mühendislerin alternatif metotlar araştırmalarına neden olmuştur.

Günümüzde gelişen ve hala büyük bir hızla gelişmekte olan bilgisayar teknolojisi ile birlikte, bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların önemi artmıştır. Endüstride de kullanımı oldukça yaygın olan bu bilgisayar destekli mühendislik araçlarından biri de sonlu elemanlar yazılımlarıdır. Sonlu elemanlar yazılımları ile karmaşık mühendislik problemleri basitleştirilerek, kabul edilebilir bir yaklaşım ile sayısal olarak çözümlenebilmektedir. Tasarım süreci ile birlikte eş zamanlı olarak kullanılan sonlu eleman yazılımları, optimum tasarımın en kısa sürede gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen mühendislik yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarla, endüstride yapılan çalışmalarda daha hızlı ve etkin sonuçlara ulaşılmaktadır. Sonlu eleman yazılımları kullanılarak yapılan çalışmaların güvenilirliği, kurulan sonlu elemanlar modeli ve malzeme özelliklerinin doğru bir biçimde modellenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle beyaz eşyalarda uygulanan düşme testi simülasyonlarında enerji yutumlama paketleme malzemelerinin malzeme özelliklerinin doğru bir biçimde modellenmesi gerekmektedir.

Beyaz eşya sektöründe paketleme malzemesi olarak çoğunlukla geliştirilmiş polistren tercih edilmektedir. Endüstride strafor veya polimer köpük olarak da adlandırılan geliştirilmiş polistren, petrolden elde edilen ve basma durumunda enerji yutumlama özelliği yüksek bir malzemedir. Paketleme performansının artırılması ve optimum paketleme yapılması strafor malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi ile mümkün olmaktadır. Paketleme performansının artırılması ile ürünler darbelere karşı daha korunaklı hale getirilebilir. Ürünlerin nakliye esnasında düşme ve darbe sonucu hasar görmeleri engellenerek, ekonomik kayıplar önlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında ankastre bulaşık makinasının düşme testi analizleri ve fiziksel düşme testleri yapılmıştır. Ankastre bulaşık makinasının kütlesi dikkate alınarak, Arçelik A.Ş. bünyesinde yer alan standartlar incelendiğinde, makinanın 25 cm yükseklikten düşme durumunda hasar almaması gerekmektedir. Standartta belirtilen durumda makine, 25 cm'den düz ve kenarları üzerine 10° açılı olarak düşürülmektedir. Henüz prototip aşamasında bulunan bu ürünün üretim onayı alması için bu testlerden hasarsız olarak geçmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışma kapsamında zorlayıcı koşul olarak makinanın 40 cm yükseklikten düşme testleri de yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizleri yapılarak gerçekleştirilen düşme analizleri ele alındığında literatürde strafor malzemesinin yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Fakat literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Arçelik A.Ş. bünyesinde kullanılan strafor malzemelere ait özellikler bulunmamaktadır. Bu nedenle öncül bir çalışma olarak öncelikle beyaz eşya sektöründeki uygulamalarda kullanılmakta olan strafora ait mekanik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürde polimer köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalardan strafor malzemesinin mekanik özelliklerini etkileyen parametreler ve mekanik özelliklerin belirmesi için yapılan test çalışmaları elde edilmiştir. Polimer köpük malzemelerin mekanik özellikleri yoğunluk, gerinim hızı ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Düşme testlerinde strafor malzemenin yüksek gerinim hızlarında deformasyona uğradığı bilindiğinden, bu hızlardaki mekanik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

Ülkemizde polimer köpük malzemelerin yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerini belirlemek için uygun test cihazlarına sahip araştırma merkezleri ve üniversiteler bulunmaktadır. Fakat bu araştırma merkezlerinde yer alan test cihazlarının köpük numunelerin test edilmesi için uygun vurucu kafaya sahip olmaması nedeniyle straforun mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basit düşme testi düzeneği tasarlanmıştır. Basit düşme testi düzeneğinde 25 cm, 40 cm ve 70 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan kütlenin, strafor numunesine çarpması sağlanarak, çarpma anındaki veriler toplanmıştır. Düşme testi düzeneğine ivmeölçer, kuvvet ve lazer deplasman sensörleri yerleştirilmiştir. Kurulan düşme testi düzeneği ile 20, 24, 26 ve 30 kg/m³ yoğunluklarda, 50x50x50 mm³ boyutlarındaki strafor numunelerinin yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca gerinim hızının malzemelerin mekanik özelliklerine olan etkisini belirlemek için Zwick standart çekme testi cihazı ile de testler yapılmıştır. Zwick test cihazı ile yapılan testler 200 mm/dak, 500 mm/dak ve 1000 mm/dak düşük yükleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı yoğunluktaki numuneler için düşük ve yüksek hızlardaki mekanik özellikler karşılaştırılmıştır.

Ankastre bulaşık makinasında paketleme malzemesi olarak 20 kg/m³ yoğunluktaki strafor malzeme kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında sonlu eleman paket programı olarak kullanılan Hyperworks programı içerisinde, straforun modellenmesi için kullanılabilecek olası malzeme kartları araştırılmıştır. Straforun modellenmesi için Visko-Elasto-Plastik malzeme kartı kullanılmıştır. Hyperworks programı içerisinde yer alan Radioss eksplisit çözücüsü kullanılarak düşme test düzeneğinin analizleri yapılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar incelendiğinde strafora ait deneysel veriler ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

Straforun malzeme modeli oluşturulduktan sonra ankastre bulaşık makinasının düşme analizi için sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Ardından ankastre bulaşık

makinasında yer alan komponentlerin malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Hyperworks programı içerisinde bulunan Radioss çözücüsüne ait malzeme kartları incelenmiştir. Buna göre ankastre bulaşık makinasında yer alan sac parçalar için Johnson-Cook malzeme kartı kullanılmıştır. Öte yandan bulaşık makinasında yer alan plastik komponentler için ise elasto-plastik malzeme kartı kullanılmıştır. Son olarak bulaşık makinasında yer alan ve düşme anında kütleli özelliklerinden dolayı atalet kuvvetlerine neden olan motor, kompresör ve evaporatör için elastik malzeme kartı kullanılmıştır. Bu komponentlerin sadece kütleli olarak modellenmesi sağlanmıştır.

Ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli kurulduktan sonra, standartta belirtilen 25 cm ve zorlayıcı koşul olarak belirlenen 40 cm yükseklikten düşme analizleri yapılmıştır. Makinanın 25 cm yükseklikten düşmesi sonucu herhangi bir hasar riski görülmemiştir. Fakat 40 cm yükseklikten düşme durumlarında makinanın alt kısmında yer alan şasinin kompresör bağlantı bölgesinde plastik deformasyonlar görülmektedir.

Son olarak makinanın Ankara Bulaşık Makinası İşletmesi'nde bulunan düşme testi düzeneği ile fiziksel düşme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma henüz prototip aşamasında olduğundan dolayı testler aynı makina kullanılarak yapılmıştır. Gerçek durumdaki fiziksel düşme testlerinde, her bir senaryo için farklı makina kullanılmaktadır. Bu durumda da test maliyeti artmaktadır. Yapılan testlerde her bir düşme senaryosunun ardından paketleme malzemesi çıkarılarak makinanın hasar durumu incelenmiştir. Ayrıca her testten önce makina kullanılmamış paketleme malzemesi ile kaplanarak testler yapılmıştır. Sonuçta makinanın 25 cm yükseklikten düşmesi sonucu makine üzerinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Öte yandan 40 cm yükseklikten düşme sonucunda makine üzerinde yer alan komponentlerde hasar meydana gelmiştir. Fiziksel düşme test sonuçları ile analiz sonuçları uyumluluk göstermiştir.

MODELING AND DROP TEST ANALYSIS OF THE BUILT-IN DISH WASHER

SUMMARY

In white appliances sector, the process of storage and transportation of products, impact and the falling damage to products lead to significant cost. The products may become unusable or may need a costly repair as a result of the possible dropping and impact cases. After the products are out of the production line, there is always a risk that the product may be subjected to drops and impacts. Therefore, to avoid this possible damage during transportation, white appliances are packaged using protective materials. Polymer foam materials that have high energy absorbing capability under compression are preferred in the white appliances industry. In order to guarantee that the packaged products have sufficient level of protection against possible dropping or impacts, these products are subjected to so-called dropping tests. Such tests may become quite expensive if the tests are to be repeated many times in case the prototype does not meet the requirements of the standards. Thus, engineers who work in the industry are searching for alternative methods to minimize such costs.

Nowadays, the importance of computer aided engineering tools is becoming more important as computer technology is advancing. Finite elements software, which is one of main computer aided engineering tools, is commonly used in the industry. This means that complex engineering problems can be modeled and solved numerically by using computer aided engineering tools. Finite element software are being used during design process, helping the engineers optimise their design in the shortest time. Projects are being completed faster and more effective by using advanced engineering tools in industry. However, accuracy and reliability of the numerical simulations depend on many factors including the material properties of parts comparing a product. Therefore, mechanical properties of the packaging materials used in the white appliances industry must be modelled accurately for drop test simulations.

Expanded polystyrene is mostly preferred as a packaging material in household industry. Expanded polystyrene, also named as styropor or polymer foam, is obtained from petroleum and has a high energy absorbing property under compression. Mechanical properties of styropor materials must be known for numerical simulations aiming to optimise the performance of the packaging. Optimized protection of goods against impact during transportation can save very significant amount of cost to the industry.

In this study, physical drop tests and drop tests analysis of built-in dish washer are carried out. Associated drop test standards required that built-in dish washer should have no damage when product is dropped from 25 cm height. As specified in the standard, drop tests should be carried out as free falling tests with 0° and 10° inclination angles with respect to the edges of the product. The built-in dish washer machine should not be damaged during these tests to get. On the other hand, drop

tests from higher levels are also carried in practise to assess the impact resistance of products. For instance, built-in dish washer was dropped from 40 cm height to evaluate the impact resistance.

In this thesis, firstly, mechanical properties of expanded polystyrene materials at high strain rates are investigated in the literature for drop test analysis. However, when studies available in the literature are reviewed, it is not possible to find the properties of packaging foam materials used in Arçelik. Therefore, determination of the mechanical properties of the foam material became one of the main tasks in this thesis. It was found in the literature that mechanical properties of polymer materials mainly depend on density, strain rate and ambient temperature. It was therefore necessary to obtain the material properties at appropriate strain rates for drop tests described in the standards.

There are available research centers and universities having test equipments and devices suitable for the determination of the mechanical properties of polymer materials at various strain rates. However, available test equipments were found to be not capable of carrying out the tests at the desired strain rates. Therefore, a drop test rig was designed and developed in this thesis to determine the mechanical properties of polymer foam material used in white appliances industry at desired strain rates. After free falling mass is dropped from 25 cm, 40 cm and 70 cm heights on a styropor specimen, the appropriate data are collected using appropriate sensors of the drop test rig. Force sensor, laser displacement sensor and accelerometer are utilised in the drop test rig. A cubic specimens with dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ with varying densities (20, 24, 26 and 30 kg/m^3) were tested at high strain rates using the test rig developed in the thesis. Also, the same specimens were tested using Zwick standart tensile test machine under uniaxial compression at low strain rates so as to compare strain rate effects on mechanical properties of foam materials. After all tests were carried out, mechanical properties of the foam materials were compared at low and high various strain rates.

20 kg/m^3 density styropor is used as a packaging material for packaging the built-in dish washer in this study. Hyperworks finite element software was used to model and simulate the drop test rig. Hexahedral elements are commonly used in literature to model foam materials. However, tetrahedral elements were used to model packaging materials in built-in dish washer because of complex geometry of packaging materials. Therefore, finite element model of polymer foam must be verified not only hexahedral elements but also tetrahedral elements to obtain accurately results from drop test simulations of the built-in dish washer. On the other hand, various material models were researched in Hyperworks finite element software to model accurately for polymer foam materials and visco-elasto-plastic model was chosen to model styropor. Radioss explicit solver in Hyperworks was utilised for the numerical simulation of the drop test rig. Then, the results obtained from the transient simulations were compared with the drop test results. It is found that the results obtained from measurements and simulations agree very well both hexahedral and tetrahedral elements.

After material model of styropor was verified, a finite element model suitable for transient non-linear analysis for the built-in dish washer was created. Built-in dish washer components can be divided into four groups that are sheet metals, plastic components, auxillary components and packaging materials. After all components of the machine were created, material properties of individual components were

defined. For sheet metal components of machine, Johnson-Cook material model was used. Johnson-Cook material model is commonly used in literature for isotropic materials such as sheet metals. On the other hand, elasto-plastic material model was selected to define properties of plastic components such as chassis, air channel, salt cellar. Finally, auxillary components such as motor, compressor and evaporator whose inertia properties are very important during impact are defined using elastic material model.

After the finite element model of built-in dish washer machine was ready, drop test simulations were carried out for 25 cm and 40 cm height cases. The results of the drop test simulations showed that there was no risk of any damage to the machine when it was dropped from 25 cm height that is specified in standard. However, drop test simulations for 40 cm height revealed that some plastic deformations could occur, at the plastic bottom chassis where the compressor is assembled to the machine.

Physical drop tests were also carried out in Ankara Dish Washer Plant using a prototype built-in dish washer. Only one prototype was available for physical drop tests. Therefore, the same built-in dish washer prototype was used in tests with varying drop tests heights. After each drop test, packaging material was removed from built-in dish washer and the possible damage to the machine was inspected. Also, before each test, built-in dish washer was packed using unused packaging material. As predicted using numerical simulation, physical drop test from 25 cm height also showed no sign of any damage on machine, confirming that the product has sufficient resistance to drop damage. However, some damage occurred when the machine was dropped from 40 cm height. This result is also in agreement with numerical simulations.

1. GİRİŞ

Günümüzde, endüstriyel ürünlerin güvenilir bir şekilde paketlenmesinin önemi giderek artmaktadır. Bunun nedeni; depolama, istifleme, nakliye...vb. süreçlerde ürünlerin sıkça düşmesi nedeniyle ortaya çıkan olumsuz sonuçlardır. Düşme senaryosuna maruz kalan ürünlerin üzerlerinde oluşacak hasarların, standartlarda belirtilen azami değerleri aşmaması ve üründe bulunan kritik komponentlerin işlevlerini yitirmemeleri gerekmektedir. Kısacası, ürünün imal edildiği ortamdan çıkıp müşteriye hasarsız bir şekilde ulaştırılması paketlemenin en önemli kriteridir. Bunu sağlayabilmek için de, ürünler yalıtım ve enerji yutumlama özelliği çok iyi olan malzemeler ile paketlenmektedir. Paketlemede diğer bir önemli kriter ise paketlemenin minimum hacimde gerçekleştirilmesidir. Minimum hacimde paketleme yapılması, kullanılan paketleme malzemesi miktarını azaltacağından, daha az maliyetli olacaktır. Fakat minimum hacimde paketleme yapılması, esasında nakliye açısından çok daha önemlidir. Daha az hacimde paketleme malzemesi kullanılması, daha çok ürünün nakliye edilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu da nakliye işleminin daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Öte yandan, paketleme malzemesi ve artıklarının olumsuz çevresel etkileri göz önüne alındığında, minimum hacimde malzeme kullanılması ile birlikte doğaya olan zararlı etkiler en aza indirgenecektir.

Beyaz eşya sektöründe, paketleme uygulamalarında en çok tercih edilen malzemeler polimer köpük malzemelerdir. Polimer köpük malzemeler düşme anında ortaya çıkan ve ürüne etkiyecek olan yükleri yutumlama özelliğine sahip, düşük yoğunluklu malzemelerdir. Polimer köpük malzemeler içerisinde de en çok tercih edilenler polietilen (PE) ve genleştirilmiş polistirendir (EPS). Özellikle son yıllarda beyaz eşya sektöründe, genleştirilmiş polistren malzemelerin, polietilen malzemelere göre daha çok tercih edildiği bilinmektedir. Literatürde, asıl adı genleştirilmiş polistiren (EPS) olan malzeme, piyasada, üretici firma BASF'in kendi markası olan "Strafor" ismiyle de tanınmaktadır. Ekonomik üretimi nedeniyle de tüm dünyada paketlemede tercih edilmektedir.

Genleştirilmiş polistrenin tarihçesi incelendiğinde, ilk stiren sentezinin BASF tarafından 1929'da gerçekleştirildiği görülmektedir. 1930'da ise endüstride kullanılmaya başlanmıştır fakat genleştirilmiş polistiren olarak kullanımı 1950'lerde olmuştur. 1952'de Alman Patent Ofisinin "Polimer Esaslı Gözenekli Malzeme Üretim Metodu" isimli yayınladığı kitap straforun tarihçesinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu tarihten sonra genleştirilmiş polistrenin paketlenme malzemesi olarak kullanılması ve bununla birlikte mekanik özelliklerinin araştırılması oldukça yaygınlaşmıştır [1].

1.1 Problemin Tarifi

Müşteriye ulaştırılmak üzere, genleştirilmiş polistren malzeme ile güvenilir bir şekilde paketlenen ürünlerin, herhangi bir düşme senaryosuna maruz kalması durumunda, üründe meydana gelecek hasar durumunun tespiti ve bu hasarın engellenmesi için standart düşme testleri yapılmaktadır. Bu testler, ürünün üretim onayı alması için gerekli testlerden biridir. Bu testlerde paketlenmiş haldeki ürün, standartta belirtilen yükseklik ve açılardan serbest düşmeye bırakılmakta ve üründe hasar meydana gelip gelmediği kontrol edilmektedir. Sonuçların güvenilirliği ve doğruluğu açısından, her bir düşme senaryosu için yeni bir ürünün test edilmesi gerekliliği yüksek maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Günümüzde, gelişen teknoloji ile birlikte bu testlerin aynı şekilde sonlu elemanlar programları kullanarak, sayısal model oluşturup simüle edilebilmesi de mümkün olmaktadır. Sayısal model oluşturularak gerçekleştirilen düşme testlerinde, hasar oluşan bölgelerinin tespiti daha kolay bir biçimde yapılabilmekte, farklı düşme senaryolarında farklı ürün kullanımına bağlı ekstra maliyet ortadan kalkmaktadır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirilen bu düşme testleri, tasarım aşaması ile eş zamanlı yapılarak, tasarım sürecini hızlandırmakta ve düşme kaynaklı revizyon maliyetlerini azaltmaktadır. Kısacası, düşme testlerinin sayısal model oluşturularak yapılması maliyet ve güvenilirlik açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir.

Sonlu eleman paket programları kullanılarak gerçekleştirilen düşme testlerinde, düşme senaryosuna maruz kalan ürün sayısal olarak modellenerek, standartta belirlenen koşullar gerçekleştirilecek şekilde analiz edilmektedir. Ürünün paketlenme malzemesi ile birlikte sayısal modelinin oluşturulması beraberinde bazı zorlukları da getirmektedir. Analiz sonucunda doğru çıktıların elde edilebilmesi için, sayısal

modelde bulunan tüm komponentlerin malzeme özelliklerinin doğru bir biçimde modellenmesi gereklidir. Ürünün komponentlerine ait malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesine ve sayısal olarak modellenenebilmesine rağmen, paketleme malzemesi olarak kullanılan genişleştirilmiş polistrenin malzeme özelliklerinin modellenmesi oldukça güçtür. Ayrıca, literatürde genişleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalara bakıldığında, bunların beyaz eşya düşme testlerinde kullanılması açısından yeterli doğruluğa sahip olmadığı görülmektedir. Bu nedenle öncelikle paketleme malzemesi olarak kullanılan genişleştirilmiş polistrenin, düşme senaryolarına uygun bir şekilde mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve sonlu eleman paket programı içerisinde modellenmesi gerekmektedir. Genleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin ardından ürün düşme analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

1.2 Literatür Özeti

1.2.1 Beyaz eşya düşme testleri

Literatürde, çeşitli endüstriyel ürünler üzerinde yapılan birçok deneysel düşme testi çalışması bulunmaktadır [2-6]. Fakat beyaz eşya sektörü gözönüne alındığında, çalışmaların sayısının kısıtlı olduğu söylenebilir. Söz konusu, düşme testi çalışmalarının simülasyonu olduğunda ise literatürde bulunan çalışma sayısının oldukça azaldığı görülmektedir.

Arçelik A.Ş. ve İ.T.Ü. işbirliği ile Görücüoğlu [2] tarafından hazırlanan yüksek lisans tezi kapsamında 20 kg/m^3 yoğunluktaki genişleştirilmiş polistrenin tek eksenli basma testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar üretici firma BASF'ın verdiği sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Bu testler gerçekleştirilirken İTÜ Makina Fakültesi Mukavemet Laboratuvarı'nda bulunan standart çekme testi düzeneği ASTM D695 standardı göz önüne alınarak basma testi amacıyla kullanılmıştır. Ancak standart çekme düzeneğinin yükleme hızının (maksimum 13 mm/sn), gerçekte düşme durumundaki hızdan (2500 mm/sn) oldukça düşük olması, genişleştirilmiş polistrenin malzeme modelini doğru olarak elde edilememesine neden olmaktadır. Standarta göre, $12.5 \times 12.5 \times 2 \text{ mm}^3$ 'lük dikdörtgen prizması ya da 12.5 mm çapında ve 25 mm boyunda silindirik numuneler kullanılmıştır. Üretici firmanın verdiği sonuçlar ile test sonuçları oldukça benzer olduğundan, çamaşır makinası düşme simülasyonu için BASF'ın verileri kullanılmıştır. Sonuçta, standart çekme düzeneğinin hızının,

gerçekte düşme durumundaki hızdan oldukça düşük olması, çalışma açısından eksik bir noktayı işaret etmektedir. Ayrıca, çalışma kapsamında düşme analizi gerçekleştirilen çamaşır makinasına ait sonlu eleman ağ modeli oldukça basit bir yapıda oluşturulmuştur.

Balaban'ın hazırladığı yüksek lisans tezinde [3], buzdolabının temsili sonlu eleman modeli oluşturularak, alt kısımda bulunan straforun boyutsal optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ANSYS paket programı kullanılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlarda kullanılan eksplisit ve implisit metodların teorisine detaylı olarak yer verilmiştir. Eksplisit kontak algoritmaları, köpüklerin malzeme modelleri ve optimizasyon parametreleri anlatılmıştır. Köpük optimizasyonu, implisit ve eksplisit metodların her biri için yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İmplicit metodda, literatürde strafor için bulunan gerilme-gerinme diyagramı dikkate alınarak, “Mooney Rivlin” malzeme modeli kullanılmıştır. Eksplisit metodda ise, “Crushable Foam” malzeme modeli kullanılmıştır. Buzdolabına ait çelik komponentler lineer elastik malzeme modeli ile modellenmiştir. Buzdolabının 50 cm yükseklikten düz ve 10°'lik açılarla dört farklı kenarı üstüne düşme senaryoları analiz edilmiştir. Sonuçta, alt kısımda yer alan strafor optimize edilmiş ve iki farklı köpük tasarımı sunulmuştur.

Martinez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [4], üstten yüklemeli bir çamaşır makinasının düşme testleri deneysel ve sayısal ortamda gerçekleştirilerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, ürünün paketli haldeki sonlu elemanlar modeli, Hyperworks programında kurularak, belirtilen senaryolardan düşme durumları değerlendirilmiş ve optimum paketleme amaçlanmıştır. Paketleme malzemesi olarak kullanılan genleştirilmiş polistrenin istenen gerinim hızındaki mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla özel bir test düzeneği kurulmuş ve sayısal model test sonuçları ile uyumlu hale getirilmiştir. Genleştirilmiş polistrenin paket program içerisindeki malzeme modeli için visko-elasto-plastik malzeme kabulü yapılmıştır. Çalışmanın sonunda ürünün simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar, ürün üzerinde meydana gelen deformasyonlar ve zemine çarpıp geri sekme süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu aşamadan sonra ise paketleme malzemesinin topoloji optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır.

Kumar, Kaushik ve Sharma'nın yaptığı çalışmada [5], LG marka klima dış ünitesinin sonlu elemanlar modeli kurularak, düşme analizi yapılmış ve sonuçlar fiziksel

testlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacının öncelikle, tasarım aşamasında düşme açısından kritik bölgelerin tespitinin yapılması ve tasarım sürecinde gerekli aksiyonların alınarak, sürecin kısaltılması olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda klima dış ünitesinin düşme analizi açısından kritik öneme sahip tüm komponentleri ile paketlenme malzemesi olarak kullanılan genişletilmiş polistren ve karton malzemeler ile birlikte, sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman paket programı olarak Hyperworks programı ve içersindeki Radioss çözümü kullanılmıştır. Çalışmanın içeriğinde sac ve genişletilmiş polistren malzemeler için kullanılan malzeme modelleri, komponentler arasındaki bağlantıların ve başlangıç koşullarının tariflenmesi detaylı olarak anlatılmıştır. Fakat genişletilmiş polistrene ait mekanik özelliklere yer verilmemiştir. Çalışmanın sonucunda fiziksel test ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça yakın olduğu belirtilmiştir.

Neumayer, Chatiri ve Höermann tarafından gerçekleştirilen çalışmada [6], bir fırının düşme testi simülasyonu yapılmıştır. Fırının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, köpük malzemesinin üzerine sarılı olarak yer alan plastik folyo da modellenmiştir. Fırında yer alan bazı komponentler noktasal kütle olarak modele dahil edilmiştir. Çalışmada LS-DYNA paket programı kullanılırken, köpük malzemesinin malzeme modeli için “Isotropic Crushable Foam (Type 75)” malzeme modeli tercih edilmiştir. Köpük malzemesine ait mekanik özellikler tek eksenli basma deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda düşme testi yapılan fırının köpük malzemesinde meydana gelen deformasyonlar, simülasyonda meydana gelen deformasyonlar ile kıyaslanmış ve oldukça yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

1.2.2 Polimer köpük malzemelerin deneysel yöntemlerle modellenmesi

Literatürde, polimer köpük malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmış çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır [7-12]. Yapılan bu deneysel çalışmalar, tek eksen ve hidrostatik basma, tek eksen çekme, basit kayma, sürünme, üç eksen basma ve birden fazla yükleme boşalma durumlarını içermektedir.

Nagy, Ko ve Lindholm'un hazırlamış olduğu çalışmada [7] tek eksenli basma durumunda, gerilme değerini gerinim hızına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak hesaplayabileceğimiz ampirik ifadeler verilmiş ve farklı yoğunluktaki polistiren ve polietilen malzemelerin gerilme-gerinim diyagramları elde edilmiştir. Düşük gerinim

hızındaki testler elektro-hidrolik test düzeneği kullanılarak yapılırken, yüksek hızdaki testler için düşme test sistemi kullanılmıştır.

Duskov'un yayımladığı oldukça kapsamlı bir içeriğe sahip olan makalede [8], iki farklı yoğunluktaki genleştirilmiş polistirenin zemin malzemesi olarak kullanımında göz önüne alınan malzeme özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak genleştirilmiş polistirenlerin su geçirgenliği test edilmiştir. Ardından ultrasonik test metodu kullanılarak farklı yoğunluktaki genleştirilmiş polistirenlerin elastik modülleri hesaplanmıştır. Üçüncü kısımda, tek eksenli basma testi için silindirik numuneler hazırlanarak farklı yükleme hızlarında, farklı sıcaklık ve nem koşulları göz önüne alınarak, malzemelerin elastik bölgedeki gerilme-gerinme diyagramları elde edilmiştir. Fakat bu diyagramların malzemelerin plastik bölge davranışını tanımlamaması çalışmanın eksik bir yönünü ortaya koymaktadır. Çalışmanın son kısmında ise malzemelerin sürünme özellikleri araştırılmıştır.

Hornberger ile Might'ın hazırladığı makalede [9], geri dönüşüm işlemi uygulanmış genleştirilmiş polistiren malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla standartlarda belirtilen iki adet düşme test sistemi detaylı olarak anlatılmış ve bu test düzeneklerinde yapılan testlerin sonuçları verilmiştir. Yapılan bu çalışma, test sistemlerinin standartlardaki özelliklerinin araştırılması bakımından oldukça detaylı bilgiler içermektedir. Çalışma kapsamında ilk olarak genleştirilmiş köpük malzemelerin, paketsiz düşme test düzeneğinde, ASTM D1596-78A standartına göre testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, ASTM D4168-88 standartında belirtilen paketli düşme testleri yapılmıştır. Literatürde paketsiz düşme testlerinin, kullanımının daha yaygın olduğu belirtilmiştir. Bu testlerdeki sonuçların sadece ilk çarpma ve geri sekmeyi içerdiği görülmektedir. Test numunesi olarak $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$ 'lük genleştirilmiş polistren numuneleri kullanılmıştır. Numune üzerine düşen farklı büyüklükteki kütleler, 76 cm yükseklikten bırakılmıştır. Standartta sürtünmenin etkisiyle, düşen kütlenin hızında maksimum %2 azalmaya izin verildiği söylenmiştir. Bunun için kütlenin numuneye çarpması sırasında, sürtünmesiz ortamda teorik olarak 76 cm'den düşen kütlenin sahip olacağı hız hesaplanarak, çarpma anında bu hız değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak çalışmanın, geri dönüşüm ile elde edilmiş genleştirilmiş polistrenin yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, standartlardaki test sistemlerinin özelliklerini de detaylı olarak açıklaması nedeniyle yararlı bir çalışma olduğu görülmektedir.

Ossa ve Romo tarafından yayımlanan makale [10] genleştirilmiş polistirenin mikro ve makro boyuttaki mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürde mikro boyuttaki mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılmış çalışma sayısının oldukça az olduğu bilinmektedir. Çalışmada mikro boyuttaki deneylerde 4 x 4x 4 mm³'lük numuneler kullanılmıştır. Test düzeneğinde, tek eksenli basma testi için geliştirilen bir test düzeneği, bu düzende kullanılan bir kuvvet sensörü ve deplasmanı ölçmek için tarayıcı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Numune yaklaşık olarak %60 kadar deforme olduğunda, elektron mikroskobu ile numunenin görseli 15 kat büyütülerek incelenmiştir. Mikro boyutta elde edilen sonuçların Poisson oranının yaklaşık sıfır olduğunun görülmesi açısından önemli olduğu belirtilmektedir. Macro boyuttaki mekanik özelliklerin belirlenmesi için ise farklı bir test metodu kullanılmıştır. Numuneler 100 mm çapında ve 170 mm uzunlukta silindirik biçimde hazırlanmış ve üç eksenli basma kuvveti uygulanmıştır. Test düzeneğinin sahip olduğu maksimum hız 10 mm/dak olarak belirtilmiştir. Deplasman ölçümleri yatay ve dikey doğrultularda yapılmıştır. Sonuçta testlerden elde edilen gerilme-gerinme diyagramının genleştirilmiş polistirenin yoğunluğuna, gerinim hızına ve uygulanan kuvvetin yönüne göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Avalle, Belingardi ve Ibba'nın hazırladığı makalede [11] uygun malzeme modellerinin elde edilmesi için farklı yoğunluktaki genleştirilmiş polipropen, genleştirilmiş polistiren ve genleştirilmiş poliüretanın tek eksenli basma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler gerçekleştirilirken ASTM D1621 standardı esas alınmıştır. Genleştirilmiş polistiren için 100 mm çapında, 35 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Genleştirilmiş polipropen ve poliüretan için ise 50 x 50 x 50 mm³'lük, küp şeklindeki numuneler tercih edilmiştir. Test düzeneği 10 mm/s hızda ve %90 strok sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bu deney için uygun hidrolik universal test makinesi (DARTEC 9600) kullanılırken, uygun örnekleme frekansına sahip kuvvet ve deplasman sensörleri kullanılmıştır. Testler en az üç numune için tekrarlanmıştır. Çalışmanın devamında testlerden elde edilen sonuçlar, literatürde yoğunluğa bağlı olarak mekanik özelliklerin hesaplanmasına olanak veren Gibson ve Rusch tarafından verilen bağıntıların sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda Gibson tarafından ortaya konulan ampirik bağıntının sonuçları deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçta, elde edilen deneysel sonuçların, sonlu elemanlar programında kullanmak için uygun olduğu görüşüne yer

verilmiştir. Fakat beyaz eşya sektöründe gerçekleştirilen düşme simülasyonları için makalede kullanılan polimer köpük malzemenin sıkışma strok değeri uygun olmasına rağmen, gerinim hızı oldukça düşük kalmaktadır.

Shivakumar, Deb, Chou ve Chitappa yayımladığı makalade [12], poliüretan malzemenin farklı gerinim hızlarındaki mekanik özellikleri araştırılmış, deneysel verilerden elde edilen sonuçlar kullanılarak gerilme ve gerinim hızı arasında ampirik ifadeler elde edilmiş ve elde edilen bu sonuçların sonlu eleman programına girdi teşkil edeceği hususunun üzerinde önemle durulmuştur. Çalışmada, 50 x 50 x 50 mm³'lük poliüretan numunelere, 14 kg'lık kütlenin 1 m ve 1.5 m yükseklikten düşmesi sonucu elde edilen gerilme-gerinme diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlara bakıldığında, test numunelerinin %70 oranında deforme olduğu görülmektedir. Yani kısacası, poliüretan malzemenin elastik ve plastik bölgedeki mekanik özelliklerinin belirlendiği anlaşılmaktadır. Çalışmanın son bölümünde ise ortaya konulan ampirik ifadeler yardımıyla farklı çarpma hızlarında oluşacak maksimum gerilme değerleri hesaplanılmıştır.

1.2.3 Polimer köpük malzemelerin sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi

Literatürde, köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesinin yanında, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve doğrulanması ile ilgili de çok sayıda çalışma bulunmaktadır [13-16]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, köpük malzemesinin mekanik özelliklerinin tanımlanması, sonlu eleman paket programına ve seçilen malzeme modeline göre farklılık göstermektedir.

Ghosh ve Hatti tarafından yapılan çalışmada [13], genleştirilmiş polistirenin farklı gerinim hızlarındaki gerilme-gerinme eğrileri, Hyperworks adlı paket programa girilerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde deney sonuçları ile program çıktıları oldukça benzerlik göstermiştir. Çalışma kapsamında 3" ve 6" yüksekliğe sahip dikdörtgen prizması şeklinde numuneler kullanılmıştır. Kullanılan test sisteminde hız maksimum 6 m/s' ye ulaşabilmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen malzeme modelinin, ilerleyen zamanlarda daha yüksek gerinim hızları için iyileştirilebileceği belirtilmiştir. Genleştirilmiş polistiren için MAT-83 malzeme modeli kullanılmış ve elde edilen bu malzeme modelinin birçok çalışmada kullanılabileceği belirtilmiştir.

Arçelik A.Ş. ve Boğaziçi Üniversitesi işbirliği ile Öztürk tarafından hazırlanan ve oldukça detaylı bir içeriğe sahip doktora çalışmasında [14], düşük yoğunluklu polimer köpük malzemelerin, tek eksen ve hidrostatik basma, tek eksen çekme, basit kayma ve ani basma yükleme durumları için mekanik davranışları ve enerji yutumlama özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle farklı yoğunluklardaki genleştirilmiş polistiren ve polietilen malzemelerin düşük hızda tek eksende hidrostatik basma ve boşalma durumundaki davranışları test edilmiştir. Bunun için 50 x 50 x 50 mm³'lük boyutlarda küp şeklindeki deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerle Zwick Z020 universal çekme testi makinasında 5 mm/dak, 100 mm/dak ve 1000 mm/dak yükleme hızlarında basma testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, universal çekme testi cihazının yüksek gerinim hızları için uygun olmaması nedeniyle, Öztürk tarafından düşme testi düzeneği tasarlanmıştır. Bu test düzeneği kullanılarak yüksek gerinim hızlarında, köpük malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yüksek gerinim hızları için elde edilen bu veriler, Abaqus adlı sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Öztürk'ün gerçekleştirmiş olduğu bu çalışma o ana dek literatürde bulunmayan, tekrarlı yükleme durumlarında köpük malzemelerinin enerji yutumlama özelliklerine ilişkin bilgiler sunduğundan oldukça önem taşımaktadır. Fakat bu çalışma kapsamında mekanik özellikleri araştırılan polimer köpük malzemelerin, beyaz eşya sektöründe hali hazırda kullanılmakta olan paketleme malzemelerinin tamamını kapsamaması nedeniyle yeni bir araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Croop ve Lobo'nun hazırlamış olduğu çalışmada [15], poliüretan ve genleştirilmiş polistiren malzemeler için LS-DYNA adlı paket programında, farklı gerinim hızlarında malzeme modellerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, poliüretanın 1.25 mm/s 'den 1250 mm/s'ye kadar farklı hızlardaki gerilme-gerinme diyagramları, deneysel yöntemlerle elde edilmiş ve BOSE Enduratec ELF 3200 test makinası kullanılmıştır. Testlerde 12.5 mm yükseklik ve çapta, silindirik 27 kg/m³'lük poliüretan numuneleri kullanılmıştır. Genleştirilmiş polistiren için de aynı hızlar ve toplamda 12 mm kalınlığa sahip iki katmanlı plak biçimindeki numuneler tercih edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, her iki malzeme için de gerinim hızı arttıkça gerilme-gerinme eğrisinde yukarı yönlü ötelenme yani aynı gerinime karşılık gelen gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür. LS-DYNA paket programında

köpük malzemelere uygun çok sayıda malzeme modeli bulunmaktadır. Fakat yapılan denemelerden sonra en uygun model olarak Fu-Chang malzeme modeli seçilmiştir. Çalışmanın sonunda seçilen malzeme modelinin köpük malzemelerin mekanik özelliklerini daha doğru bir biçimde temsil edebilmesi için iyileştirmeler yapılması önerilmektedir.

Gerçeker'in hazırladığı yüksek lisans tezinde [16], mühimmatların köpük malzeme ile entegre şekilde düşme analizleri ve boyutsal optimizasyonu gerçekleştirilirken, bu malzemelerin mekanik özelliklerine literatürde sıkça yer verilmediğine vurgu yapıp, mekanik özelliklerin tespiti için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerçeker yaptığı çalışmada, düşük yükleme ve yüksek çarpma hızlarında deneyler gerçekleştirmiştir. Yüksek hızdaki testler için, tasarlanan bir düşme kulesi kullanılmıştır. Düşme kulesi bırakma sistemi, ivme ölçer ve hızlı kamera ile donatılmıştır. Test numunesi olarak 50 mm'lik küp şeklindeki genişletilmiş polipropilen ve polietilen kullanılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak, LS-DYNA adlı sonlu elemanlar paket programında, deney düzeneği simüle edilmiş ve deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda köpük malzemelerin boyutsal optimizasyonu yapılarak, düşme durumunda mühimmat üzerine gelecek yük miktarının minimum mertebelerde tutulması sağlanmıştır.

1.3 Standartlar ve Deney Prosedürü

Beyaz eşya sektöründe uygulanan düşme testi kapsamında, mekanik özelliklerin tespiti açısından kritik olan malzeme straforudur. Çünkü beyaz eşyaların çarpma ve düşme gibi istenmeyen durumlarla karşılaşması durumunda, hasar görmesini engellemek için, tüm kenarlar, alt ve üst yüzeyler ve köşeler strafor malzemesi ile kaplanmaktadır. Düşme senaryosu durumunda enerjinin büyük bir kısmı strafor tarafından yutulmaktadır. Bu durumda, yere çarpma esnasında strafor malzemesi basma kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Straforun bu basma kuvvetleri altındaki mekanik özelliklerinin belirlenmesi için standartlarda belirtilen metodolojinin izlenmesi gerekir. Çünkü düşük yoğunluktaki strafor malzemesi test ve ortam koşullarından kolayca etkilenmektedir. Testlerin güvenilirliği ve kesinliği büyük oranda standartlarda belirlenen metodoloji ile sağlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, ASTM D1621 “ Sert Hücresel Plastiklerin Basma Özellikleri için Standart Test Metodu ”, ASTM D5628 “ Sert Plastik Malzemelerin

Düşen Kütle Altındaki Darbe Dayanımının Belirlenmesi için Standart Test Metodu ” ve ASTM D6817 “ Sert Hücresel Polistiren Köpükler için Standart Şartname ” standartları, genişletilmiş polistiren malzemelerin basma özelliklerinin belirlenmesini tariflediğinden, detaylı olarak anlatılacaktır.

ASTM D1621 standardı [17] test makinesinin vurucu kafasının hızına göre, başta genişletilmiş plastikler olmak üzere, sert hücresel plastiklerin basma özelliklerinin belirlenmesi için standart test metodunu tariflemektedir. ASTM D1621 standardı ile ISO 844 standardı teknik olarak eşdeğerdir.

ASTM D1621 standardı [17] kapsamında öncelikle, malzemelerin mekanik özellikleri tanımlanırken kullanılan terminolojiye yer verilmiştir. Bu terminolojide basma deformasyonu, basma gerinimi, basma gerilmesi, elastik modül, basmadaki akma noktası gibi mekanik özelliklerin tarifinde kullanılan terimler tanımlanmıştır. Bu standartta göre, sert hücresel plastik malzemelerin yük-deformasyon eğrisi elde edilerek, herhangi bir noktadaki gerilme-gerinim değerleri hesaplanabilmektedir. ASTM D1621 standardı test düzeneğinin özelliklerini de tariflemektedir. Test sisteminde sabit hızla hareket edebilen ve normal konumuna kendiliğinden dönebilen bir basma kafasına sahip makinanın kullanılabileceğini belirtmektedir. Yük ve deplasman ölçerin kalibrasyonlu ve %1 hassasiyetle ölçüm yapabilir olması gereklidir.

Öte yandan ASTM D1621 standardında [17], test numunesi olarak kullanılan hücresel plastiklerin boyutları da belirtilmiştir. Buna göre, kare veya dairesel kesit alanına sahip numune kullanılabilmekte ve bu numunelerin kesit alanı minimum 25,8 cm², maksimum 232 cm² olmalıdır. Minimum numune boyu 25,4 mm olarak verilirken, maksimum numune boyu için parça kare kesit alanına sahip ise genişliği, dairesel bir kesit alana sahip ise çapı üst sınır olarak kabul edilmiştir. Ayrıca numune ile kuvvet uygulayıcı sabit hızlı kafa, yüklemenin başından sonuna dek birbirlerine göre paralel konumda olmalıdır. Her bir durum için en az beş numune test edilmelidir. Test sonuçları ortam koşullarına göre farklılık gösterebileceğinden, standartta ortam koşulları için sıcaklığı 23 ± 2 °C ve ortam nemi 50 ± 5 olarak belirtilmiştir.

ASTM D5628 standardı [18] serbest düşmeye bırakılan kütlelerin etkisi altında, sert plastiklerin kırılması ve hasar görmesi için gerekli darbe enerjisinin hesaplanmasını

kapsamaktadır. ASTM D5628 standardı ile ISO 6603 standardı teknik olarak aynıdır. Bu standartın içeriğinde, hesaplamalar, deney numunesinin ve test sisteminde kullanılan vurucu kafanın boyutları, veri toplama sisteminin özellikleri ve deneyin yapıldığı ortam koşullarının olması gerekli özellikleri tariflenmiştir. Bu standart, plastiklerin delme özelliklerini belirleyen test makinalarının, düşme testi düzeneği olarak kullanılması durumunda göz önüne alınmaktadır.

ASTM D6817 standardında [19] ise sert hücresel köpük malzemeleri fiziksel özelliklerine göre sınıflandırmaktadır. Buna göre genişletilmiş polistirenler EPS XX kg/m³ olarak isimlendirilirken, yoğunluğu dikkate alınmaktadır.

Genleştirilmiş polisteren malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, yukarıda üzerinde durulan standartların dışında ASTM D695 ve ASTM D1596 standartlarının da dikkate alındığı görülmektedir [2]. ASTM D695 standardı, standart çekme testi düzeneğinin basma testini gerçekleştirmek için kullanılması durumunda izlenmesi gereken metodoloji ve kuralları kapsar. Literatürde, düşük yükleme hızlarında, mekanik özelliklerin araştırıldığı durumlarda bu standarta sıklıkla rastlanılmaktadır. Öte yandan, ASTM D1596 standardının da laboratuvar koşullarında, yüksek hızlardaki mekanik özelliklerin araştırıldığı durumlarda dikkate alındığı bilinmektedir.

Yukarıda özet olarak sunulan standartlar, genişleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli koşulları ve metodolojiyi tariflemektedir. Öte yandan beyaz eşyaların paketlenmiş haldeki fiziksel düşme testlerini gerçekleştirirken yine ilgili standartta belirtilen metodolojinin ve koşulların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. ASTM D5276 “Muhafazalı Ürünün Serbest Düşme Testinin Standart Test Metodu” standardı paketlenmiş haldeki ürünlerin düşme ve darbe testleri ile ilgili metodoloji ve şartları içerdiğinden oldukça önem taşımaktadır.

ASTM D5276 standardı [20], paketlenmiş haldeki ürünlerin nakliye sırasında serbest düşme senaryosuna maruz kalması durumunda, üzerine etkiyen ani darbelere karşı dayanabilirliğini test etmek amacıyla hazırlanmıştır. Standarta göre, müşteriye teslim edilecek şekilde paketlenmiş haldeki ürün, düşme esnasında herhangi bir şekil değişimi olmayacak rijit zemin üzerine, serbest düşmeyi sağlayacak bir mekanizmayı barındıran test düzeneğinden farklı açılarda bırakılarak test edilmelidir. Bu açı

değerlerinin kenar üzerine düşme durumlarında 2°'yi geçmemesi gerekmektedir. Fakat testin öncesinde kesin bir hasar kriteri kabulü de yapılması şarttır.

ASTM D5276 standartı kapsamında, düşme testi düzeneğinde kullanılacak bırakma mekanizmasının da özellikleri detaylı olarak tariflenmektedir. Buna göre bırakma mekanizması olarak, ürüne herhangi bir kuvvet uygulamayan kancalı bir sistem veya alternatif mekanizmalar kullanılabilir. Ürünün serbest düşme yapacağı yükseklik konusunda herhangi bir kısıtlama standartta yer almamaktadır [20]. Önerilen serbest düşme yükseklikleri ise Çizelge 1.1'de verilmiştir. Ayrıca bu standart, farklı paketlenme performanslarının kıyaslanması için de kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1 : Ürünün kütlesine göre düşme testi yüksekliği [21].

Kütle	Düşme Yüksekliği
0 - 9.54 kg	76.2 cm
9.55 – 18.63 kg	60.9 cm
18.64 – 27.72 kg	45.7 cm
27.73 – 45.45 kg	30.5 cm
45.45 – 60.50 kg	25.0 cm

Bu tez kapsamında fiziksel düşme testi ve düşme testi analizleri yapılan ankastre bulaşık makinasının kütlesi göz önüne alındığında, standartta belirtilen 25 cm ve standartta belirtilmeyen fakat zorlayıcı koşul olarak belirlenen 40 cm yüksekliklerden serbest bırakılması durumları incelenecektir. Bununla birlikte, açılı düşme durumlarında ise, rijit zemin ile 10° açı yapacak şekilde testler ve düşme analizleri yapılmıştır. Bu yükseklikler ve açılar Arçelik A.Ş.'nin test talimatlarının işaret ettiği şartlar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir [21]. Firma içerisinde kullanılan talimatlar incelendiğinde, ürünün düşme testinin yapılacağı yüksekliğin ürünün kütlesine göre belirlendiği görülmektedir. Buna göre, ürünün kütlesi arttıkça düşme testi yüksekliği azalırken, daha hafif ürünlerin daha yüksek mesafelerden düşmeye bırakılması talimatlarda yer almaktadır. Ayrıca her bir düşme senaryosu için farklı makinanın kullanılması da talimatlarda bulunmaktadır.

1.4 Amaç ve Kapsam

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır [7-12]. Fakat yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, köpük malzemelerin gerinim hızına bağlı mekanik özelliklerinin sayısal olarak modellenmesi üzerine yapılan çalışmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu durum bu tez çalışmasının öncül hedefini oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında, öncelikli olarak geliştirilmiş polistrenin farklı gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerinin sayısal olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın temel motivasyonunu ise beyaz eşya sektöründe gerçekleştirilen düşme testleri oluşturmaktadır. Fabrika ortamında farklı ürün gruplarında gerçekleştirilen fiziksel düşme testleri oldukça yaygın olmasına karşın, bu testlerin simülasyonu ile ilgili literatürde oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır [2-5]. Tez kapsamında, ankastre bulaşık makinasının düşme simülasyonun gerçekleştirilmesi ve sonuçların fiziksel test sonuçları ile kıyaslanması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, literatürde beyaz eşya sektöründe paketlenme malzemesi olarak kullanılan geliştirilmiş polistren ve polietilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Ayrıca polimer köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve beyaz eşya düşme testlerinde göz önüne alınan standartlar araştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde geliştirilmiş polistren malzemelerin mekanik özelliklerinin matematiksel ifadelerini içeren teorik altyapı sunulmuştur. Bu bölümde geliştirilmiş köpük malzemelerin tek eksenli basma durumundaki malzeme davranışı ve gerilme-gerinme eğrisinin özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca bu malzemelerin farklı yoğunluk, gerinim hızı ve ortam sıcaklığı etkisinde, mekanik özelliklerinin hesabında kullanılan matematiksel ifadeler sunulmuştur. Bu kısımda ayrıca sonlu elemanlar yöntemin teorik altyapısı ile çarpma, düşme ve ani darbe uygulamalarında kullanılan çözüm metoduna detaylı olarak yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, geliştirilmiş köpük malzemesinin mekanik özelliklerinin deneysel metodoloji kullanılarak araştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikli olarak standart düşme testi cihazları ve özellikleri araştırılmıştır. Ardından, geliştirilmiş polistrenin tek eksenli ani basma yüklemesi altındaki malzeme

davranışının belirlenmesi amacıyla basit düşme testi düzeneği tasarlanmış ve özellikleri açıklanmıştır. Tasarlanan basit düşme testi düzeneğinde, farklı gerinim hızlarında testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise geliştirilmiş polistren malzemenin mekanik özelliklerinin sayısal metodoloji ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Tasarımı yapılan basit düşme testi düzeneğinin, Hyperworks sonlu elemanlar paket programında sayısal modeli oluşturulmuştur. Deneysel metodoloji yardımıyla elde edilen veriler, sayısal modelde girdi olarak kullanılmış ve geliştirilmiş polistrenin malzeme modelinin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde, paketlenmiş haldeki ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve ürünün düşme simülasyonları yapılmıştır. Makinada bulunan ve düşme açısından kritik tüm komponentler detaylı olarak modellenmiştir. Son bölümde ise, simülasyondan elde edilen sonuçlar, ankastre bulaşık makinasının fabrika ortamında gerçekleştirilen fiziksel düşme testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. TEORİ

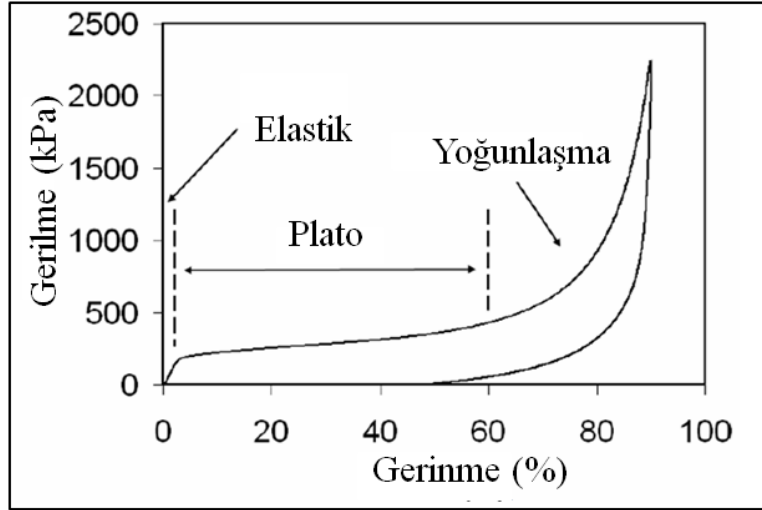
Bu bölümde, tez kapsamında araştırılan ve kullanılan teorik altyapı sunulmaktadır. İlk olarak, polimer köpük malzemelerin yüksek deformasyon etkisi altındaki mekanik özelliklerinin anlaşılması ve malzeme modelinin oluşturulması için gerekli teori sunulacaktır. Burada verilen formülasyonlar, sonlu eleman programında oluşturulan malzeme modeline de temel teşkil etmektedir. Daha sonra, ikinci kısımda ise, sonlu eleman programında gerçekleştirilen düşme, çarpma ve darbe analizlerini kapsayan dinamik analizlerin teorik temelleri verilecektir.

2.1 Polimer Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Polimer köpük malzemeler, basma dayanımı ve enerji yutumlama özellikleri göz önüne alındığında, farklı tasarımlara ait paketleme uygulamaları için oldukça elverişli ve ekonomik malzemelerdir. Bu malzemelerin paketleme uygulamalarındaki kullanımı değerlendirilirken, söz konusu malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesi şarttır. Strafor olarak da adlandırılan genişletilmiş polistren malzemelerin mekanik özellikleri, diğer polimer köpük malzemelerle oldukça benzerlik göstermektedir.

Tek eksende basma durumu için genişletilmiş polistrenin mekanik özellikleri incelendiğinde, diğer köpük malzemelerde de görülen tipik gerilme-gerinme eğrisi görülmektedir. Verilen eğriler tek eksende basma durumu için pozitif olarak kabul edilmiştir. Köpük malzemelere ait tipik gerilme-gerinme eğrisi, tek eksenli yükleme durumunda, temelde üç ana bölümden oluşmaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 2.1’de polimer köpük malzemelerin tek eksen basma durumunda elde edilen gerilme-gerinme eğrisi ve bu eğri üzerinde görülen üç ana bölüm görülmektedir.

Bu bölgelerden ilki elastik bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgede gerilme ve gerinme arasındaki ilişki lineer olarak belirlidir. %3-5 gerinme (birim şekil değiştirme) mertebeleri içerisinde bulunan bu bölge darbe enerjisini yutumlama uygulamalarında etkin değildir. Enerjinin yutumu büyük oranda bir sonraki bölümde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.1 : Köpük malzemelerin tek eksen basma durumundaki gerilme-gerinme eğrisi [14].

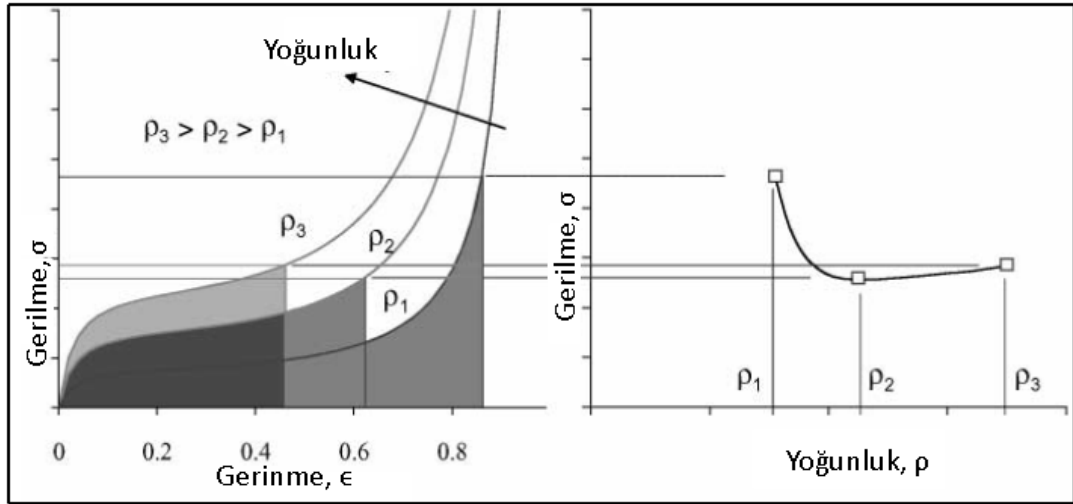
Grafikte yer alan ikinci bölge darbe uygulamaları açısından oldukça önemli olan plato bölgesidir. %5-60 gerinme mertebeleri arasında yer alan bu bölgede malzemede hem elastik hem de plastik deformasyonlar görülmektedir. Yani malzeme elastik rejimin üzerinde yüklendiğinde ve daha sonra üzerine etkiyen yükler kaldırıldığında artık eski boyutlarına geri dönememekte, bir miktar deforme olmuş şekilde kalmaktadır. Belirtildiği gibi, bu bölge darbe enerjisinin yutum uygulamaları açısından önemlidir çünkü enerjinin büyük bir kısmı bu bölgede yutulmaktadır. Plato bölgesinde genleştirilmiş polistrenin granülleri içerisinde bulunan hava, basma kuvveti nedeniyle granüllerin parçalanması sonucu atmosfere çıkar. Sonuçta plato bölgesinin uzunluğu, malzemenin enerji yutum özellikleri ile yakından ilişkili olduğundan darbe, çarpma ve düşme uygulamaları açısından bu bölgenin önemi oldukça fazladır. Grafiğin en sağ kısmında yer alan bölge ise yoğunlaşma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Malzemenin bu bölge içerisindeki davranışı, birinci bölgedeki davranışına benzer yapıda yani lineere yakın olmakta ve gerilme-gerinim eğrisindeki eğim büyük oranda artmaktadır. Bu bölgede malzeme içerisindeki hücreler tamamen deforme olmaktadır. Yoğunlaşma bölgesinde gerilme değerlerindeki ani artıştan dolayı genleştirilmiş polistren malzeme rijit bir yüzeye benzer davranış göstereceğinden, darbe yutumu uygulamalarında malzemenin bu bölgeye ulaşması istenmemektedir.

Şekil 2.1’de yer alan polimer köpük malzemelerin tek eksen basma durumundaki tipik gerilme-gerinme eğrisi, basma durumu için pozitif olarak kabul edilmiştir.

2.1.1 Mekanik özellikleri etkileyen parametreler

Genleştirilmiş polistrene ait gerilme–gerinme grafiği, malzemenin yoğunluğu başta olmak üzere ortamın sıcaklığı, yüklemenin doğrultusu ve gerinim hızına göre farklılık göstermektedir.

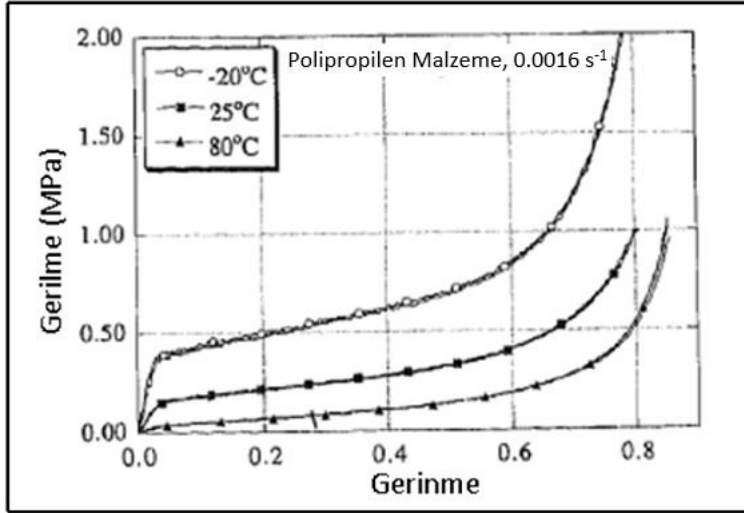
Genleştirilmiş polistrenin yoğunluğu, mekanik özellikleri etkileyen temel parametrelerden biridir. Şekil 2.2’de verilen grafiklerden de görüldüğü gibi, malzemenin yoğunluğu arttıkça basma dayanımı artmakta yani farklı yoğunluklardaki genleştirilmiş polistren için, aynı gerinme değerine karşılık gelen gerilme değeri artmaktadır. Öte yandan, bu malzemelerin yoğunluğu arttıkça, poisson oranının değeri azalmaktadır [5]. Genleştirilmiş polistrenin yoğunluğa bağlı mekanik özelliklerinin değişimi Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2 : Mekanik özelliklerin yoğunlukla değişimi [11].

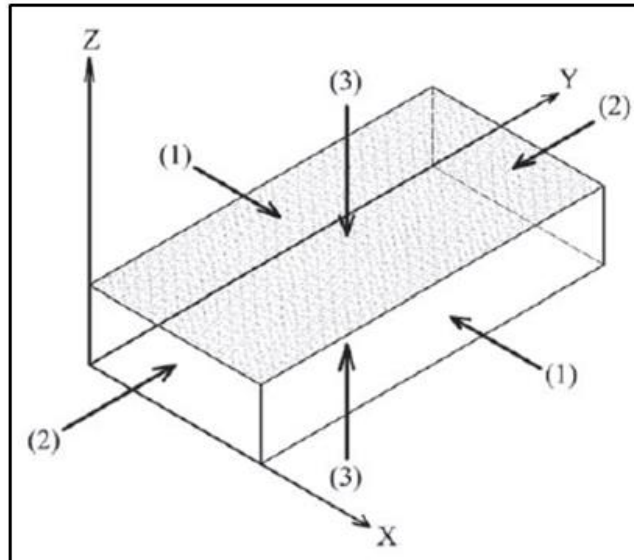
Genleştirilmiş polistren termoplastik bir malzeme olduğundan dolayı ortam sıcaklığı malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ortamın sıcaklığı arttığı takdirde, malzemenin basma dayanımı azalmaktadır. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda polimer köpük malzemelerin basma dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 2.3’de -20, 25 ve 80 °C sıcaklıklarda, genleştirilmiş polistrenin gerilme–gerinme grafiği verilmiştir. Buna göre aynı yoğunluktaki polimer köpük malzemelerin farklı sıcaklıktaki ortam koşullarında test edilmesi ile aynı gerinim değerine karşılık gelen gerilme değerlerinde önemli bir farklılık görülmektedir. Bu nedenle mekanik özellikleri araştırılan polimer köpük malzemelerin uygun ortam sıcaklıklarında test edilmesi gerekmektedir.



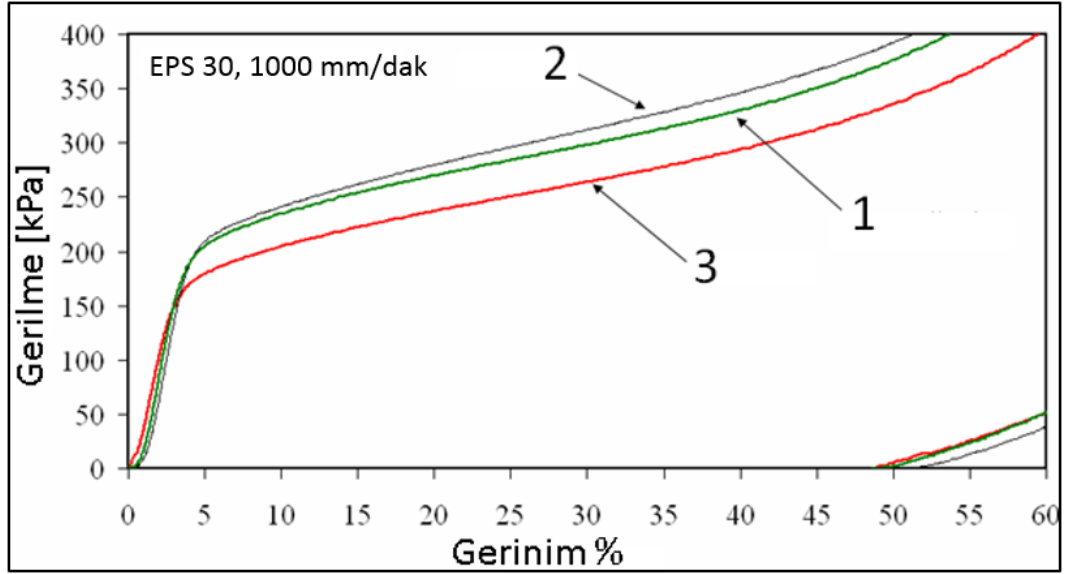
Şekil 2.3 : Mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi [7].

Genleştirilmiş polistren malzemeler, basma dayanımları, kesme ve çekme dayanımlarına göre oldukça yüksek olan malzemelerdir. Bu yüzden uygulamalarda basma ve sıkışma yönünde çalışacak biçimde kullanılırlar. Malzeme üzerine farklı doğrultularda uygulanan basma kuvvetleri dikkate alındığında ise, malzemenin farklı yönlerde farklı basma dayanımı değerlerine sahip olduğu bilinmektedir. Bir başka deyişle, genleştirilmiş polistren malzemeler anizotropik olarak adlandırılan ve Şekil 2.4’de görüldüğü üzere mekanik yüklemelere karşı, doğrultuya göre farklı mekanik özellikler gösteren malzemelerdendir.



Şekil 2.4 : Kartezyen koordinat takımı ve basma doğrultuları [14].

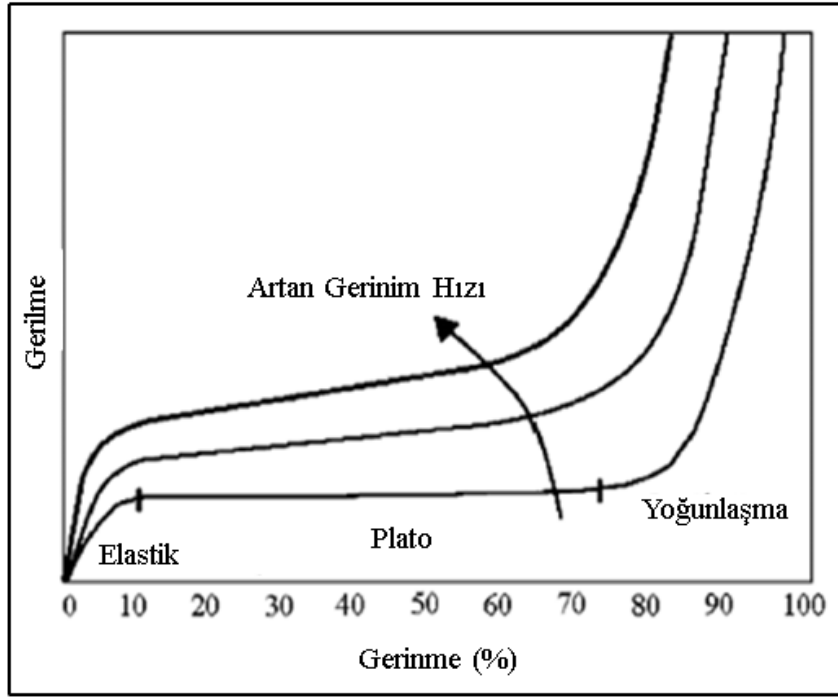
Aşağıda yer alan Şekil 2.5’te de görüldüğü üzere malzemenin (3) nolu basma yönünde dayanımı daha düşüktür.



Şekil 2.5 : Farklı doğrultulardaki basma kuvvetleri altındaki gerilme-gerinme eğrileri [14].

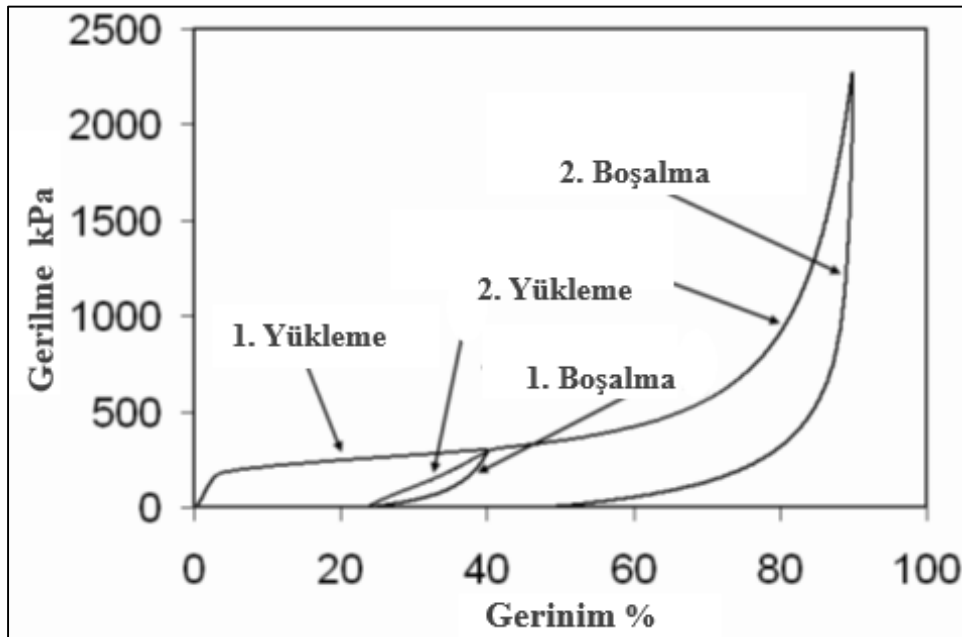
Son olarak; düşme, darbe ve çarpma uygulamaları için son derece kritik olan gerinim hızının, genleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerine olan etkisi göz önüne alındığında, aynı gerinme değerine karşılık gelen gerilme değerinin artan gerinim hızına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Daha detaylı olarak açıklamak gerekirse, gerinim hızındaki artışın, malzeme üzerinde oluşan gerilme değerlerini logaritmik olarak arttırdığı bilinmektedir [13]. Oldukça yavaş yükleme durumu olan quasi-statik durumda ise genleştirilmiş polistrenin basma dayanımında önemli bir düşüş olacağı açıktır. Sayısal modelleme çalışmalarında, genleştirilmiş polistrenin malzeme modeli oluşturulurken, mekanik özelliklerin gerinim hızına bağlı olarak değişmesi aşılması güç bir problemi de beraberinde getirmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 2.6'dan da anlaşılacağı gibi strafor malzemesi üzerine tek eksen doğrultusunda basma yönünde kuvvet uygulayan cismin hızı, genleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Sonuç olarak, genleştirilmiş polistrenin yoğunluğa, ortamın sıcaklığına, yüklemenin yönü ve hızına göre farklı mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Gerilme - gerinme grafiklerindeki rejimler, değişen parametrelere göre farklılık göstermesine rağmen, tüm durumlarda kendisini açıkça göstermektedir. Yani malzemenin sahip olduğu üç adet rejim grafiklerde oldukça belirgindir. Aşağıda yer alan Şekil 2.6'da gerinim hızının malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi görülmektedir. Burada malzemenin elastik, plato ve yoğunlaşma bölgesindeki özellikleri değişmektedir.



Şekil 2.6 : Gerinim hızının mekanik özelliklere etkisi [16].

Genleştirilmiş polistren malzemelerin tek eksenli basma ve boşalma durumundaki mekanik özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fakat birden fazla yükleme ve boşalma durumları için yapılan çalışma sayısı ise oldukça azdır [14]. Aynı malzemenin birden fazla yükleme ve boşalma durumları için genel mekanik davranışını gösteren grafik Şekil 2.7'deki gibi olmaktadır.



Şekil 2.7 : Straforun tekrarlı yükleme ve boşalma durumunda gerilme-gerinme eğrisi [14].

Görüldüğü üzere, ilk yükleme ve boşalmadan sonra genleştirilmiş polistren kalıcı olarak deformasyona uğramış ve ikinci yükleme ve boşalmadan sonra bu kalıcı deformasyon miktarı artmıştır. İlk yükleme durumunda plastik şekil değişiminin gerçekleştiği plato bölgesine kadar sıkıştırılan malzeme, serbest bırakıldığında başlangıçtaki şekline geri dönememiştir.

2.1.2 Tek eksen basma durumundaki mekanik özellikler

Literatürde köpük malzemelerin tek eksen basma durumundaki mekanik özelliklerinin matematiksel ifadeleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır [7,9,10,11,12,28,29,30]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, verilen bağıntılar yardımı ile tek eksenli basma durumunda gerilmeye bağlı, yükleme ve yutulanan enerji miktarı hesaplanabilmektedir.

Köpük malzemelerin tek eksen basma durumundaki mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan formülasyon Gibson tarafından verilmiştir [28]. Bu formülasyonlar gerilme-gerinme eğrisinin üç farklı bölgesi için farklı ifadeler içermektedir.

Lineer elastik bölge içerisinde;

$$\sigma \leq \sigma_{akma} \quad (2.1)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

Plato bölgesi içerisinde;

$$\varepsilon_{akma} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_D (1 - D^{-1/m}) \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sigma_{akma} \quad (2.4)$$

Yoğunlaşma bölgesinde;

$$\varepsilon > \varepsilon_D (1 - D^{-1/m}) \quad (2.5)$$

$$\sigma = \sigma_{akma} \left(\frac{1}{D} \right) \left(\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon} \right)^m \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir. Burada σ gerilme, σ_{akma} akma gerilmesi, E elastik modul, ε gerinimi tanımlarken, D ve m ise malzeme özelliklerine bağlı sabitleri ifade etmektedir. Deneysel verilere dayanarak elde edilen bu ifadeler yukarıda görüldüğü

üzere beş farklı parametre içermektedir. Bu parametrelerden E , σ_{akma} ve ε_D yoğunluğa bağlı iken, D ve m yoğunluğa bağlı değildir [28].

Öte yandan, eğrinin doğruluğunu artırmak için, orijinal Gibson modeli üzerinde bir takım modifikasyonlara gerek duyulmuştur. Bilindiği üzere gerilme-gerinme eğrisinin plato bölgesinde, Gibson'ın verdiği formülasyondan farklı olarak, gerçek ölçümlerde sabit bir gerilme değeri görülmemektedir. Bu yüzden, plato bölgesindeki gerilme değerinin belirli bir eğim ile değişimini sağlamak matematiksel modelin doğruluğunu artıracaktır. Bu durumda plato bölgesindeki gerilme değerini veren ifade aşağıdaki biçimde modifiye edilmiştir [11].

$$\sigma = \sigma_{akma} + h\varepsilon \quad (2.7)$$

Yeni durumda plato bölgesindeki gerilme iki parametreyle belirlenmiş olup, modeldeki toplam parametre sayısı altıya ulaşır. Bu ifadede yer alan h deneysel verilerden elde edilen parametreye karşılık gelir.

Öte yandan tek eksen basma durumundaki mekanik özelliklerin belirlenmesi için Rusch [29] tarafından verilen oldukça basit ve kullanışlı bir bağıntı vardır. Bu bağıntı;

$$\sigma = E_0 f(\varepsilon) \quad (2.8)$$

şeklinde verilmiştir. Bu ifadede σ gerilme, E_0 başlangıçtaki elastik modülü ve $f(\varepsilon)$ ise lineer olmayan birim şekil değiştirmeyi göstermektedir. Lineer olmayan gerinim ise aşağıdaki gibi verilir.

$$f(\varepsilon) = \varepsilon(a\varepsilon^{-c} + b\varepsilon^d) \quad (2.9)$$

Burada deneysel veriler kullanılarak a , b , c ve d ampirik olarak hesaplanan sabitlerdir [29].

Rusch [30] tarafından ortaya konulan ve yaygın olarak kullanılan diğer bir formülasyon ise aşağıdaki biçimde verilmiştir.

$$\sigma = A\varepsilon^m + B\varepsilon^n \quad (2.10)$$

$$0 < m < 1 \text{ ve } 1 < n < \infty \quad (2.11)$$

Bu formülasyonda ilk terim elastik ve plato bölgesini, ikinci terim ise yoğunlaşma bölgesini ifade etmektedir. A ve B parametreleri yoğunluğa bağlı iken, m ve n yoğunluktan bağımsız olarak değişmektedir. Burada birim şekil değişimi olan ε , basma yüklemesi durumunda pozitif olarak tanımlanmaktadır.

Rusch [30] tarafından verilen bu formülasyon, köpük malzemesinin tek eksen basma durumunda yoğunlaşma bölgesindeki mekanik davranışını daha iyi temsil etmek için modifiye edilmiş ve ortaya çıkan yeni formülasyon aşağıda verilmiştir. Bu durumda formülasyondaki ilk ifade aynı şekilde kalırken, ikinci ifade modifiye edilmiştir [6].

$$\sigma = A\varepsilon^m + B\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^n \quad (2.12)$$

$$0 < m < 1 \text{ ve } 1 < n < \infty \quad (2.13)$$

Köpük malzemelerin tek eksen basma durumu için Gibson [28] ve Rusch [29,30] tarafından ortaya konulan bağıntılar oldukça basit ve etkin olmasına rağmen, mekanik özellikleri etkileyen sıcaklık ve gerinim hızı gibi parametrelerden bağımsızdırlar. Halbuki, yapılan deneysel çalışmalar gösteriyor ki köpük malzemelerin mekanik özellikleri, sıcaklık ve gerinim hızına karşı oldukça hassastır. Bu nedenle daha güvenilir bir matematiksel modelin elde edilmesi, bu parametrelerin de gözönüne alınmasını gerektirmektedir.

Nagy [7] tarafından tek eksenli yükleme durumunda, sıcaklık ile gerinim hızını içeren formülasyon aşağıdaki biçimde verilmiştir.

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) L(T) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{a+b\varepsilon} \quad (2.14)$$

Burada $\sigma_0(\varepsilon)$ gerinime bağlı mühendislik gerilmesi, $\dot{\varepsilon}_0$ keyfi gerinim hızı, a ve b ise malzeme özelliklerine bağlı sabitlerdir. Sıcaklığa bağlı fonksiyon olan L(T) ise aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$L(T) = \exp\left[-\frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r}\right] \quad (2.15)$$

Bu ifadedeki C_1 ve C_2 malzemenin sıcaklığa bağlı sabitleri, T_r oda sıcaklığıdır (25°C). T'nin oda sıcaklığına eşit olması durumunda L(T) değeri 1'e eşit olur ve

ifade aşağıdaki gibi sadeleşir. Bu durumda oda sıcaklığında, gerinim hızına bağlı ifade elde edilmiş olur [7].

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{a+b\varepsilon} \quad (2.16)$$

Meinecke ve Schwaber [31] tarafından ortaya konulan ve tek eksen basma durumundaki mekanik özelliklerin gerinim hızına bağlı olarak ifade edilmesini sağlayan formülasyonlar aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\sigma = E_0 f(\dot{\varepsilon}) M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (2.17)$$

$$M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{n(\varepsilon)} \quad (2.18)$$

$$n(\varepsilon) = a + b(\varepsilon) \quad (2.19)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada $\dot{\varepsilon}_0$ referans gerinim hızı olarak tanımlanırken, a ve b amprik sabitlerdir.

Chou'nun [12] mekanik özellikleri etkileyen parametreler olan sıcaklık ve gerinim hızına bağlı fonksiyonu içeren oldukça basit bağıntısı ise aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\sigma = H(\dot{\varepsilon}, T) G(\rho) f(\varepsilon) \quad (2.20)$$

Burada $G(\rho)$ yoğunluğun fonksiyonu olan parametre olarak yer alırken, $H(\dot{\varepsilon}, T)$ ise sıcaklık ve gerinim hızının fonksiyonudur.

Öte yandan literatürde yer alan ve köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin hesabına yardımcı olarak kullanılan bağıntılar da mevcuttur. Bu bağıntılar yardımı ile elastik modül ve poisson oranı gibi parametreler hesaplanabilmektedir.

Horvath [29], köpük malzemesinin ani yükleme koşulu ile basma yönünde yüklenmesi durumunda, %1 birim şekil değişimi durumuna kadar lineer bir davranış gösterdiğini belirtmiş ve başlangıç elastik modulünün yoğunluğa bağlı ampirik ifadesini aşağıdaki şekilde vermiştir. Burada %10 birim şekil değişimi bir dakikanın altında bir sürede gerçekleşiyorsa, bu durum ani yükleme koşulu olarak tanımlanabilir şartı göz önüne alınmıştır [8].

$$E_i = 0.45\rho - 3 \quad (2.21)$$

Elastiklik modülünün yoğunluğun fonksiyonu olarak ifade edildiği ve ikinci dereceden polinom özelliği taşıyan diğer bir ifade ise Duskov tarafından şu şekilde verilmiştir [3].

$$E_i = 16.431 - 1.645\rho + 0.061\rho^2 \quad (2.22)$$

Denklem 2.21 ve 2.22’de yer alan E_i elastiklik modülün birimi MPa, ρ yoğunluk ise kg/m^3 ’tür.

%1 ‘in üzerindeki birim şekil değiştirmelerinde, malzeme lineer olmayan özellikler göstermekte ve elastik modülünün değeri azalmaktadır. Bunun yanında, %1 ‘in üzerindeki birim şekil değiştirmelerinde, gerinim hızı elastiklik modül değerini etkilerken, %1 ‘in altında gerinim hızının elastiklik modülü üzerindeki etkisi ihmal edilebilmektedir [3].

Poisson oranının belirlenmesi konusunda da literatürde teorik olarak yer alan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında, laboratuvar ortamında yapılan deneylere dayanarak eşdeğer poisson oranı bulunması amaçlanmaktadır. Köpük malzemeler için oldukça küçük değerlerdeki poisson oranı, yoğunluğun bir fonksiyonu olacak şekilde şöyle ifade edilmiştir [22].

$$\nu = 0.0056\rho + 0.0024 \quad (2.23)$$

Köpük malzemelerin ν poisson oranı değerleri yukarıda da görüldüğü üzere sıfıra oldukça yakındır.

2.2 Dinamik Analiz Teorisi: Sonlu Elemanlar Metodu

Çarpışma ve düşme analizlerinin sonlu elemanlar teorisi, en genel durumda dinamik analiz ve bu başlık altında yer alan lineer olmayan zamana bağlı eksplisit dinamik analiz teorisine dayanmaktadır. Düşme ve çarpışma durumlarında, malzemeler üzerinde meydana gelen yüksek miktardaki deformasyon, malzemenin plastik şekil değişimine uğraması ve temas algoritmaları analizin lineer olmayan özelliklerini kapsamaktadır. Bu analiz türlerinde, hareketin varlığı ve zamana bağlı deformasyonların söz konusu olması nedeniyle zamana bağlı dinamik bir yapı ortaya

çıkılmaktadır. Eksplisit dinamik analizler, oldukça küçük bir zaman dilimi içerisinde gerçekleşen ve yüksek hızlardaki dinamik modelleme için gerekli matematiksel yaklaşımı içermektedir. Buna göre, $\{x\}$ nodal yerdeğiştirme vektörü, $\{\dot{x}\}$ nodal hız vektörü ve $\{\ddot{x}\}$ nodal ivme vektörü olmak üzere, harekete ait diferansiyel denklem aşağıdaki biçimde yazılır.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (2.24)$$

Burada yer alan $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ ve $\{f\}$ vektörleri $m \times 1$ boyutunda, $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönüm matrisi ve $[K]$ direngenlik matrisi $m \times m$ boyutunda kare matrisler ve m sistemin nodal serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. $\{f\}$ ise sistem üzerine etkiyen dış kuvvetler vektörünü ifade etmektedir [25].

Bu ifade aynı şekilde,

$$F_I(t) + F_D(t) + F_E(t) = F \quad (2.25)$$

olarak da yazılabilir. Burada, $F_I(t) = [M]\{\ddot{x}\}$ kütleli kuvvetleri, $F_D(t) = [C]\{\dot{x}\}$ sönüm kuvvetlerini ve $F_E(t) = [K]\{x\}$ elastik kuvvetleri temsil etmekte olan zamana bağlı terimlerdir. Dinamik analizde herhangi bir t anındaki denge ifadesi için, atalet kuvvetleri ve sönüm kuvvetleri de hesaba katılmaktadır. Statik analizde ise aksine, atalet ve sönüm kuvvetleri ihmal edilerek çözüm yapılmaktadır [26].

Yukarıda verilen ifadenin daha basit bir biçimde yazılması ile,

$$\{\ddot{x}_n\} = [M]^{-1}\{F_n^{dis} - F_n^{ic}\} \quad (2.26)$$

eşitliğine ulaşılır ve bu ifade her adımda çözülerek nihai çözüme ulaşılır. Burada $[M]$ kütle matrisi, diyagonal bir yapıya sahip değil ise diyagonal matrise dönüştürülmesinin ardından çözüm yapılmaktadır. Sönüm ve katılık matrisi için herhangi bir dönüşüm gerekmemektedir. Çünkü F_n^{ic} iç kuvvetler vektörü bu parametreleri içermektedir [26].

2.2.1 Eksplisit çözüm algoritması

Eksplisit çözümlemelerde yukarıda verilen eşitliğin çözümü için farklı integrasyon metodları kullanılabilir. Doğrudan integrasyon metodu, sisteme ait diferansiyel denklem sistemini başka bir forma dönüştürmeden doğrudan hesaplama

yapan metodolojiyi tariflemektedir. Radioss eksplisit çözücüsünde doğrudan integrasyon metodlarından biri olan Newmark metodu kullanılmaktadır [25]. Sistemin zaman adımı h olmak üzere, herhangi bir $t_{n+1} = t_n + h$ anındaki durumu Taylor formülasyonu ile ifade edilecek olursa:

$$y(t_n + h) = y(t_n) + hy'(t_n) + \frac{h^2}{2}y^{(2)}(t_n) + \dots + \frac{h^s}{s}y^{(s)}(t_n) + R_s \quad (2.27)$$

$$R_s = \frac{1}{s!} \int_{t_n}^{t_n+h} y^{(s+1)}(\tau) [t_n + h - \tau]^s d\tau \quad (2.28)$$

Buna göre t_n anındaki durum biliniirse t_{n+1} anındaki hız $\dot{u}_{n+1}$ denklem 2.29 ve yerdeğişimi u_{n+1} denklem 2.30'dan hesaplanabilmektedir.

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{u}(\tau) d\tau, \quad \tau \in [t_n, t_{n+1}] \quad (2.29)$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau)\ddot{u}(\tau) d\tau \quad (2.30)$$

Burada denklem 2.29 ve 2.30'da yer alan integraller numerik olarak çözüldüğü takdirde sonuçta aşağıdaki ifadeler elde edilir [25].

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{u}(\tau) d\tau = (1 - \gamma)h\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} + r_n \quad (2.31)$$

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau)\ddot{u}(\tau) d\tau = \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^2\ddot{u}_n + \beta h^2\ddot{u}_{n+1} + r'_n \quad (2.32)$$

Denklem 2.31 ve 2.32'de yer alan r_n ve r'_n ifadeleri Taylor formülasyonundan gelen h^2 , h^3 ve daha küçük katsayıları içeren terimlerin toplamını ifade etmektedir. Denklem 2.31 ve 2.32'de elde edilen integral ifadeleri denklem 2.29 ve 2.30'da yerine konulursa ve denklemler düzenlenirse:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + (1 - \gamma)h\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} \quad (2.33)$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)h^2\ddot{u}_n + \beta h^2\ddot{u}_{n+1} \quad (2.34)$$

olarak yazılır. Denklem 2.33 ve 2.34’de yer alan γ ve β değişkenlerinin farklı değerleri için farklı algoritmalar elde edilebilmektedir.

- $\gamma = 0, \beta = 0$ için ifade kuramsal eksplisit algoritması olarak tanımlanmaktadır. Bu değerler, 2.34 denkleminde yerine konulduğunda sistem daima kararsız bir hal almaktadır.
- $\gamma = 1/2, \beta = 0$ için ifade merkezi farklar algoritması olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda sistem koşullu kararlı olmaktadır.
- $\gamma = 1/2, \beta = 1/2$ için ifade Fox & Goodwin algoritması olarak tanımlanmaktadır.
- $\gamma = 1/2, \beta = 1/6$ için ifade lineer ivmelenme olarak tanımlanmaktadır.
- $\gamma = 1/2, \beta = 1/4$ için ortalama ivmelenme olarak tanımlanmaktadır.

Yukarıda yer alan algoritmalarından merkezi farklar algoritması Radioss çözücüsünde kullanılan algoritmadır [25]. Buna göre merkezi farklar algoritması, $\gamma = 1/2, \beta = 0$ değerleri için Newmark metodunun özel bir halidir. Buna göre denklem 2.33 ve 2.34 düzenlenirse hız ve yerdeğişimi için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{1}{2}h_{n+1}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad (2.35)$$

$$u_{n+1} = u_n + h_{n+1}\dot{u}_n + \frac{1}{2}h^2\ddot{u}_n \quad (2.36)$$

Burada h_{n+1} , t_n ve t_{n+1} anları arasındaki zaman adımıdır. Özetle, Newmark Metodu denklem 2.24’den ivme $\ddot{u}_{n+1}$, denklem 2.35’den hız $\dot{u}_{n+1}$ ve denklem 2.36’dan yerdeğiştirme u_{n+1} ’yi her bir zaman adımı için hesaplayarak çözüm sağlar.

Ayrıca, merkezi farklar algoritması üç noktadaki zaman adımı için de daha basit bir şekilde ifade edilebilmektedir [25]. Buna göre ivme değeri için:

$$\ddot{u}_n = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{h^2} \quad (2.37)$$

ifadesi elde edilir.

Öte yandan, yarım zaman adımı sonrası için hız değeri yazılabilmektedir.

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right) = \frac{1}{h_{n+1}}(u_{n+1} - u_n) \quad (2.38)$$

Aynı şekilde ivme ve yarım zaman adımı ifadeleri de aşağıdaki biçimde bulunmaktadır.

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{h_{n+\frac{1}{2}}} \left(\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} \right) \quad (2.39)$$

$$h_{n+\frac{1}{2}} = \frac{h_n + h_{n+1}}{2} \quad (2.40)$$

Daha sonra $\ddot{u}_n$ ivme değeri bilindiğine göre, sonraki adımlardaki hız ve yerdeğiştirme değerleri, önceki değerlerden hesaplanabilmektedir [25]. Buna göre $\dot{u}_{n+\frac{1}{2}}$ değeri denklem 2.38'den bilindiğinden,

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} + h_{n+\frac{1}{2}} \ddot{u}_n \quad (2.41)$$

hesaplanabilmektedir. Aynı formülasyon dairesel hızlar için de kullanılabilir.

Yerdeğişimi için de,

$$u_{n+1} = u_n + h_{n+1} \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \quad (2.42)$$

ifadesi elde edilir.

Merkezi farklar algoritması ile elde edilen çözümün kesinliği zaman adımının karesi ile orantılı olarak değişmektedir. Denklem 2.37'de yer aldığı biçimde zaman adımının yarıya inmesi sonucu hata miktarı dört kat azalacaktır. Zaman adımı her çevrimde iç kuvvetlerin hesaplanmasının ardından tekrar hesaplanmakta ve değişmektedir [25].

2.2.2 Eksplisit algoritmanın zaman adımının belirlenmesi

Radioss çözücüsü gibi eksplisit çözücüler için en önemli kriterlerden biri zaman adımındır. Çözümün doğruluğu açısından gerçekleştirilen analizin zaman adımı, teorik olarak elde edilen kritik zaman adımından küçük olmak zorundadır [33]. Eğer analizin zaman adımı, kritik zaman adımından büyük olursa her bir adımda hata miktarı artacak ve sonuçta hatalı sonuçlar elde edilmesine yol açacaktır. En basit durum olarak sönümsüz sistemin kritik zaman adımı aşağıda yer alan denklem 2.43'de,

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{maks}} \quad (2.43)$$

olarak verilmektedir [33]. Burada Δt_{cr} kritik zaman adımını ve ω_{maks} rad/sn maksimum dairesel doğal frekans değerini temsil etmektedir. Analizi gerçekleştirilen modelin zaman adımı, sonlu eleman ağında bulunan tüm elemanları uyaracak kadar küçük olmalıdır. Bunu gerçekleştirmek ancak şok dalgasının ağda bulunan elemanların hiçbirinin düğümünü kaçırmaması ile mümkün olmaktadır [33]. Buna göre zaman adımı,

$$\Delta t \leq \frac{l_c}{c} \quad (2.44)$$

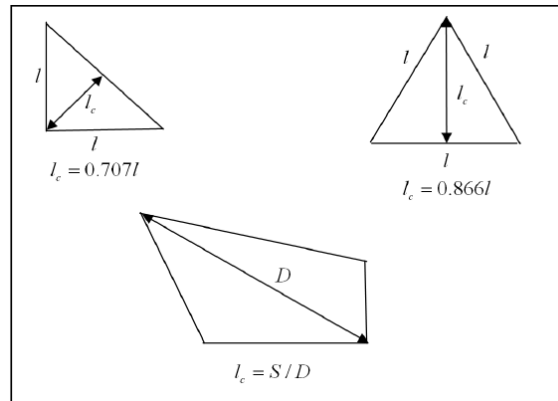
şeklinde belirlidir. Burada l_c en küçük elemanın boyutunu ve c ses hızını belirtmektedir [33].

Radioss eksplisit çözücüsünde zaman adımı hesabı yapılırken temel iki metot kullanılır. Bunlar, eleman zaman adımı ve nodal zaman adımı metotlarıdır.

Eleman zaman adımı metoduna göre zaman adımı,

$$\Delta t = \min_{eleman} \left(\frac{l}{c} \right) \quad (2.45)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [33]. Burada, l karakteristik eleman boyunu ve c sesin malzeme içerisindeki yayılma hızını belirtmektedir. Karakteristik eleman boyu aşağıdaki Şekil 2.8'de gösterilen biçimde hesaplanmaktadır. Her bir eleman için, analizin tüm adımlarında karakteristik eleman boyu ve ses hızı tekrarlı olarak hesaplanmaktadır[25].



Şekil 2.8 : Karakteristik eleman boyunun hesabı [33].

Nodal zaman adımı metodunda ise zaman adımının değeri,

$$\Delta t = \min_{Node} \left(\sqrt{\frac{4m}{k}} \right) \quad (2.46)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, m nodal kütle ve k nodal direngenliği ifade etmektedir [25].

Radioss çözücüsü özel olarak herhangi bir ayarlama yapılmadığı takdirde, eleman zaman adımı metodunu kullanmaktadır [25]. Analiz uygulamalarında, zaman adımının büyüklüğü çözüm süresini etkilediğinden dolayı, eleman boyutunun belirli bir değerden küçük olmasından kaçılmaktadır. Tez kapsamında düşme analizi yapılan ankastre bulaşık makinası modelinin zaman adımı 10^{-7} saniye mertebelerindedir.

3. DÜŞME TEST DÜZENİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÖLÇÜMLER

Beyaz eşya düşme testleri kapsamında mekanik özellikleri kritik öneme sahip olan ve paketlenme malzemesi olarak kullanılan malzeme genişleştirilmiş polistrendir. Düşme ve darbe senaryoları göz önüne alındığında, paketlenme malzemesi üzerine ani basma kuvvetleri etkimekte ve meydana gelen enerjinin %90'ı bu malzemeler tarafından yutulmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere, literatürde genişleştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla farklı deneysel yöntemler ve test cihazları kullanılmıştır [7-16]. Uygun deneysel yöntemin seçilmesi ile tek eksen basma durumu, basit kayma ve tek eksen ani darbe mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Araştırılan mekanik özelliklerin farklı olması, farklı test cihazlarını kullanmayı gerektirmektedir. Aynı şekilde test cihazının seçim kriterlerinden bir diğeri de gerinim hızıdır. 1900'lü yılların başlarında yüksek gerinim hızlarında kuvvet ve uzamanın aynı anda ölçülmesindeki zorluklar nedeni ile malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler düşük gerinim hızlarında gerçekleştirilmiştir. Fakat daha sonraları ölçüm sistemlerinin teknolojiye paralel olarak gelişimi ile birlikte yüksek gerinim hızlarındaki deneyler yapılmaya başlanmıştır. Malzemelerin yüksek gerinim hızındaki mekanik özellikleri, uygulamaları gerçekleştiren mühendislerin, malzemenin bu hızlardaki gerilme-gerinme diyagramına ihtiyaç duymaları ve tasarımlarını bu özelliklere göre şekillendirdiklerinden dolayı oldukça önemlidir. Genleştirilmiş polistrenin mekanik özellikleri gerinim hızına bağlı olduğundan, araştırılan gerinim hızındaki mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan test sistemi seçilmelidir. Uygun test sisteminin seçilmesi ile birlikte, istenilen gerinim hızındaki mekanik özelliklerin elde edilmesi sonucu, sonlu eleman paket programına girdi teşkil edecek veriler olan yoğunluk, elastik modül, akma gerilmesi, poisson oranı değerleri ve gerilme-gerinme eğrileri belirlenmiş olmaktadır. Aşağıda genişleştirilmiş polistren malzemenin düşük ve yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerini belirlemeye yarayan test cihazları hakkında özet bilgiler verilmiştir. Düşük gerinim hızlarındaki mekanik özellikleri belirlemeye yarayan cihazların hızları yükleme hızı, yüksek gerinim hızlarındaki cihazlar için ise çarpma hızı tanımlamaları kullanılacaktır.

3.1 Düşük Gerinim Hızlarında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Düşük gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla, standart çekme testi cihazları kullanılmaktadır. ASTM D695 standardında, çekme testi cihazının, basma testi yapmak amacıyla kullanılması durumunda dikkate alınması gereken prosedürler görülmektedir. Kullanılan bu test düzeneklerinin maksimum yükleme hızının 1000 mm/dak olması, malzemelerin yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerin belirlenmesini olanaksız kılmaktadır.

Standart çekme cihazı ile yapılan deneyler neticesinde malzemenin, cihazın sabit yükleme hızı olan 1000 mm/dak'ya kadar, sabit yükleme hızlarındaki kuvvet-uzama ve gerilme-gerinme eğrileri elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında incelediğimiz düşme testleri göz önüne alındığında, maksimum durumdaki yaklaşık 16 mm/s'lik yükleme hızlarının, düşme anında ulaşılan yaklaşık 3700 mm/s'lik yükleme hızına göre oldukça küçük olduğundan standart çekme test cihazı ile elde edilen mekanik özelliklerin doğru sonuçlar vermeyeceği açıkça görülmektedir. Bu deney cihazlarında numunenin şekil değişimini ölçmek için daha önceleri genellikle lineer değişken fark sensörü (LVDT) kullanılmaktaydı. Artık, gelişen teknoloji ile birlikte bu cihazlardaki şekil değişimi ölçümlerinde kullanılan sensörler, temassız ölçüm yapabilen laser ve optik sensörlerdir. Şekil 3.1'de standart çekme testi cihazı görülmektedir.



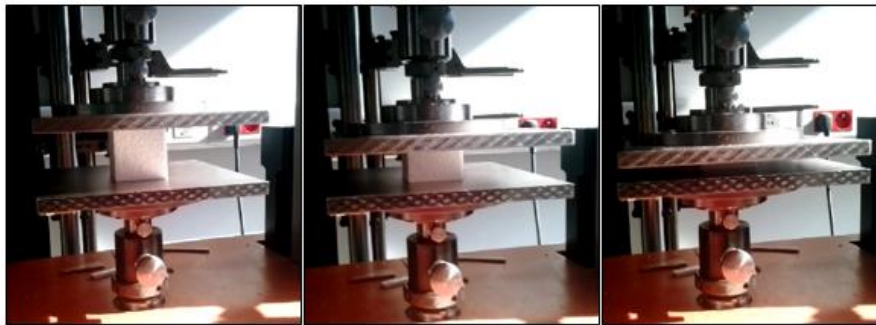
Şekil 3.1 : Standart çekme testi cihazı.

Düşük gerinim hızları ile yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerin karşılaştırılması için, Arçelik A.Ş. bünyesinde kullanılan Zwick Z020 çekme ve basma test cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın da yükleme hızı sabit ve maksimum 1000 mm/dak'dır. Daha düşük çene hızlarında da deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Zwick Z020 test cihazına ait görsel Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Zwick Z020 basma ve çekme test cihazı.

Bu test cihazı yardımı ile 200, 500 ve 1000 mm/dak hızlarda basma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde köpük numuneler, %80 şekil değişimine maruz kalmış ve daha sonra basma çeneleri yukarı yönde hareket etmiştir. Farklı yoğunluktaki köpük numunelere ait test sonuçları, sonuçlar kısmında verilecektir. Aşağıda yer alan Şekil 3.3'de deney görselleri verilmiştir.



Şekil 3.3 : Zwick Z020 basma deneyi.

3.2 Yüksek Gerinim Hızlarında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Düşme testi uygulamaları göz önüne alındığında geliştirilmiş polistrenin mekanik özelliklerinin yüksek gerinim hızlarında belirlenmesi amacıyla kullanılan test cihazlarının başında, gelişmiş sensörler ile donatılmış düşme test cihazları gelmektedir. Düşme test cihazlarının yanı sıra Split-Hopkinson basınç çubuğu ve kam plastometre deney cihazları da yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla kullanılabilmektedir.

Düşme kulesi olarak da adlandırılan düşme test cihazları piyasada mevcuttur. Oldukça pahalı olan bu test cihazları Türkiye’de Instron firması tarafından satışa sunulmaktadır. Ankastre bulaşık makinasının 25 cm ve 40 cm’den düşme senaryoları göz önüne alındığında, Instron firmasının CEAST 9340, CEAST 9350-I ve CEAST 9350-II cihazlarının belirtilen yüksekliklerden düşme durumundaki mekanik özellikleri modelleyebileceği görülmektedir. Düşme senaryolarının yanı sıra düşen kütleye istenilen hızın verilmesi de bu cihazların başka bir özelliğidir. Şekil 3.4’de Instron marka düşme kuleleri görülmektedir.



Şekil 3.4 : Düşme kuleleri.

Yukarıda yer alan düşme kulelerinden CEAST 9340 modelinin çarpma hızı 0.77 mm/s ile 4.65 m/s aralığında değişmektedir. Cihaza ait düşme kafasının ağırlığı 2 ile 37.5 kg arasında 0.5 kg'lık hassasiyetle istenilen değerde ayarlanarak, 0.03 ile 1.10 m yükseklikten serbest düşmeye bırakılabilmektedir. Ayrıca sistemde, düşen kütlenin geri sekip ikinci darbeyi yapmasını önleyen mekanizma bulunmaktadır.

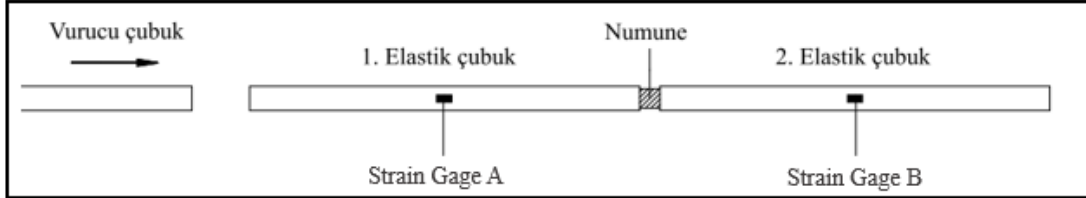
Öte yandan CEAST 9350-I model düşme test cihazının özellikleri incelendiğinde CEAST 9340 modeline ek olarak düşen kütlenin ağırlığı 70 kg'a kadar artırılabilir. CEAST 9350-II modeli de CEAST 9350-I modeline ek olarak çarpma hızını 29 m/s'ye kadar çıkarabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında bu cihazlardan yaralanmak amacıyla, Türkiye'de bu cihazları kullanan test merkezleri araştırılmıştır. Buna göre bu test cihazlarının Tubitak MAM ve Tubitak Bursa Test ve Analiz Laboratuvarı'nda olduğu tespit edilmiştir. Burada kullanılan cihazların plastik parçaların kırılma özelliklerini belirlemek maksadıyla kullanıldığı ve geliştirilmiş polistrenin tek ekseninde ani basma durumundaki özelliklerini belirlemek için gerekli olan düşme kafasına sahip olmadığından, testler gerçekleştirilememektedir.

Öte yandan, Split-Hopkinson basınç çubuğunun da yüksek gerinim hızındaki mekanik özellikleri belirlemek için kullanılan bir test cihazı olduğu bilinmektedir. Hopkinson kurduğu deney düzeneği ile uzun elastik bir çubuğa ani darbe uygulayarak malzemenin yüksek hızlardaki mekanik özelliklerini belirleyebilmiştir [23]. Teorik olarak, elastik çubuk boyunca dalga ilerlemesinin matematiksel ifadesi elde edilebildiğinden dolayı, herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme ve gerilmeler hesaplanabilmektedir. Hopkinson deney sisteminde farklı düzenekler tasarlanarak çekme, basma ve kayma deformasyonları incelenebilmektedir.

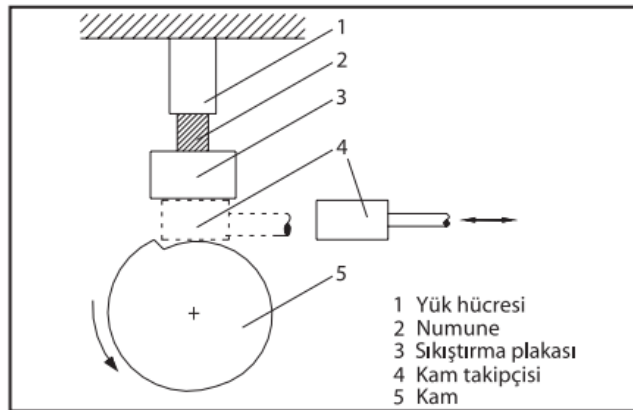
Basma deformasyonu için temelde Şekil 3.5'te gösterilen konfigürasyon kullanılmaktadır. Buna göre numune üzerine bası kuvvetleri uzun iki çubuk vasıtası ile uygulanmaktadır. Burada birinci elastik çubukta, vurucu çubuğun ani darbesi ile bası dalgası meydana gelmektedir. Vurucu çubuk üzerinden oluşturulacak ani darbe, sarkaç, patlayıcı, mermi ve basınçlı gaz ile oluşturulabilir. Birinci çubuk üzerinde oluşan zamana bağlı şekil değişimi, çubuk üzerine yerleştirilen ve aşağıdaki şekilde de görülen A strain-gage'i ile okunmaktadır. Burada birinci çubuğun numune ile temas eden kısmında dalganın bir bölümü geri yansır iken diğer bölümü ikinci

çubuğa iletilmektedir. Yansıyan dalganın meydana getirdiği şekil değişimi yine A strain-gage'i ile okunmaktadır. İkinci çubuktaki zamana bağlı şekil değişimi için de B strain-gage'i kullanılır. Her iki elastik çubuktaki ölçümler yapıldığından, numunenin gerilme-gerinme davranışı belirlenebilir. Bu metodoloji yüksek gerinim hızlarında köpük, kauçuk ve polimer türü malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır [23].



Şekil 3.5 : Split-Hopkinson basınç çubuğu [23].

Düşme kulesi ve Split-Hopkinson basınç çubuğu deney düzeneklerinin dışında kam plastometreler, yüksek gerinim hızlarında basma kuvvetleri etkisi altındaki numunenin mekanik özelliklerini belirlemek için tasarlanmış düzeneklerden biridir. Bu cihazlar yardımı ile özellikle metal malzemelerin sabit şekil değiştirme hızındaki deneyler gerçekleştirilmektedir [24]. Deney cihazında bulunan kam mili motor tarafından tahrik edilerek döndürülür. Daha sonra kam takipçisi yatay düzlemde hareket ederek, aşağıdaki şekilde kesikli çizgilerle gösterildiği şekilde, kam mili ile temas etmektedir. Kam milinin 360°'lik dönme yapması ile kam takipçisi numuneyi sıkıştırmakta ve sonuçta numunenin basma kuvvetleri altındaki deformasyonu belirlenmektedir. Şekil 3.6'da kam plastometre görülmektedir.



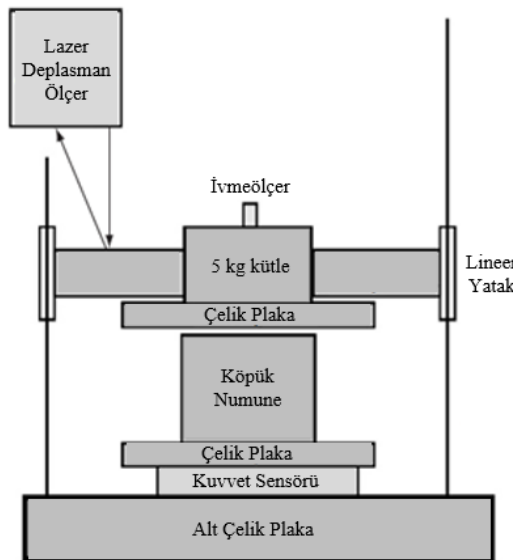
Şekil 3.6 : Kam plastometre [24].

Sonuç olarak, ankastre bulaşık makinasının düşme testi kapsamında mekanik özellikleri araştırılan genişletilmiş polistrenin, yüksek gerinim hızlarındaki mekanik

özelliklerinin belirlenmesi amacıyla düşme testi düzeneği tasarlanmasına ve kurulmasına karar verilmiştir. Kurulan bu düşme testi düzeneği ile yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özellikler belirlenerek, sonlu eleman paket programına girdi teşkil edecek veriler elde edilecektir. Düşme testi düzeneği ile ilgili bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir.

3.3 Düşme Testi Düzeneği Tasarımı

Üretici firmalar tarafından verilen, geliştirilmiş polistren malzemelere ait yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özellikler, polimer malzemelerin üretim aşamalarındaki farklılıkları da göz önüne alındığında, oldukça farklılık göstermektedir. Mekanik özellikleri belirlemek için kullanılan test cihazları incelendiğinde ise, bu malzemelerin düşük gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan test cihazlarından çekme test cihazının yükleme hızlarının yeterince yüksek olmaması, malzemenin mekanik özelliklerinin düşme senaryosu açısından doğru bir biçimde modellenemesine engel olmaktadır. Ülkemizdeki test merkezlerinde bulunan ve yüksek gerinim hızlarında mekanik özelliklerin belirlenmesini sağlayan Instron marka düşme kulelerinin, düşme testleri açısından uygun vurucu kafaya sahip olmaması nedeni ile literatürde düşme test düzeneği için tanımlanan genel kriterler göz önüne alınarak bir düşme testi düzeneği tasarımı gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Literatürde basit düşme testi düzeneği için verilen temel yapı Şekil 3.7’de görülmektedir.

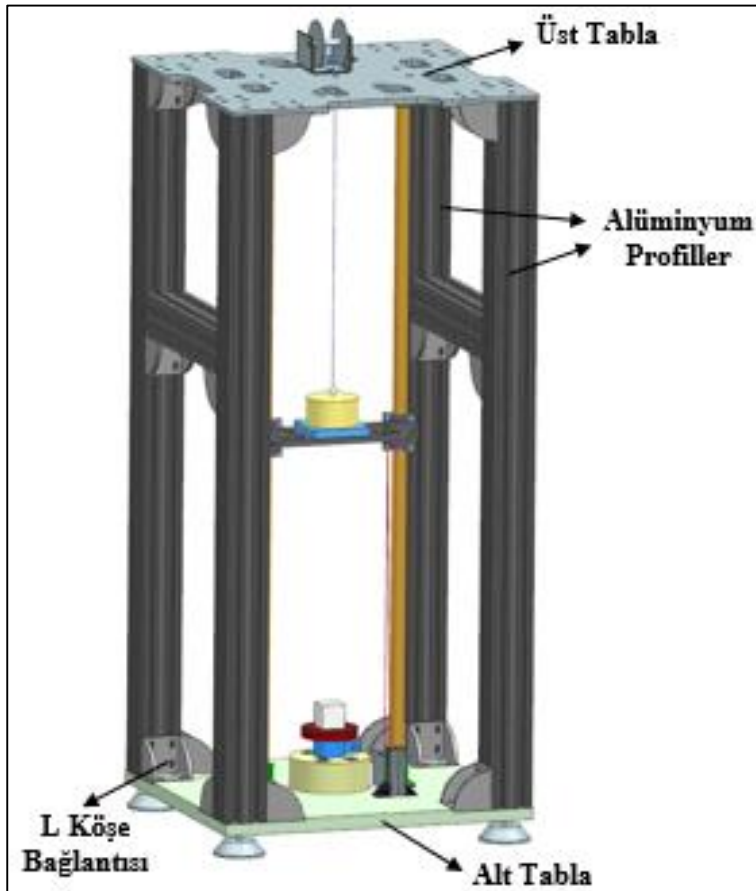


Şekil 3.7 : Düşme test düzeneği şeması [31].

Tasarlanan bu düşme test düzeneği ile paketlenmede kullanılan farklı yoğunluktaki polimer köpük malzemelerin tek eksen basma durumu için yüksek gerinim hızlarındaki mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Bunun için düşen kütlenin 1000-4000 mm/sn aralığındaki çarpma hızlarına ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle düşen kütle yataklanırken sürtünmesi düşük malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca, 50x50x50 mm³ boyutlarındaki numunelerin %70 oranında şekil değişimi amaçlanmaktadır. Bu nedenle serbest düşmeye bırakılan kütle minimum 5 kg olarak belirlenmiştir. Test düzeneğinin tasarımı yapılırken temelde bu kriterler göz önüne alınmıştır. Tasarımı yapılan basit düşme testi düzeneğinin özellikleri, mekanik özellikler ve sensör özellikleri olmak üzere aşağıda iki bölümde açıklanmıştır.

3.3.1 Düşme test düzeneğinin bileşenleri

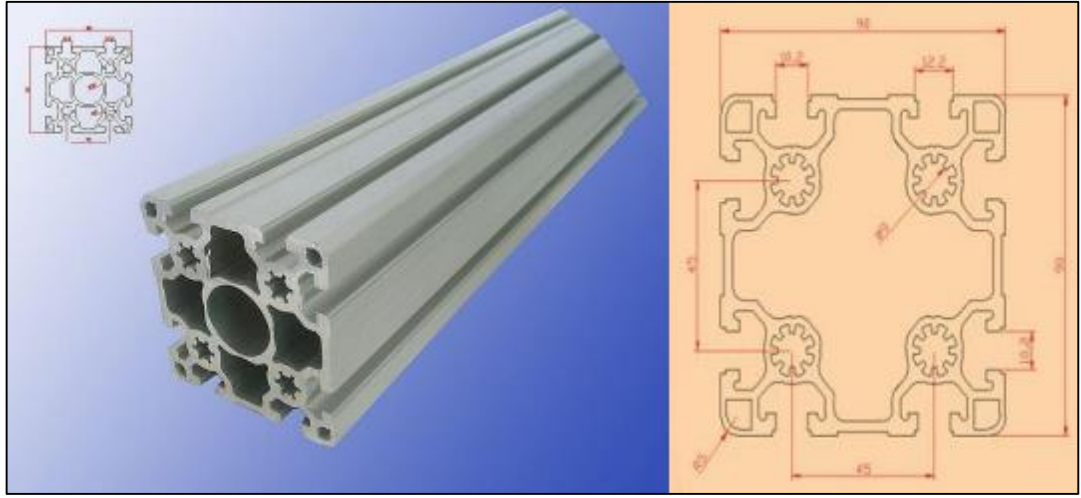
Düşme testi düzeneğinin ön tasarımı CAD model üzerinde gerçekleştirilmiştir. CAD model üzerinde oluşturulan alt ve üst alüminyum plaka, dört adet alüminyum kiriş ile L köşe bağlantılar kullanılarak birbirine monte edilmiştir. Şekil 3.8’de düşme test düzeneğinin CAD modeli görülmektedir.



Şekil 3.8 : Düşme test düzeneğinin CAD modeli.

Kullanılan alüminyum profillerin ölçüleri 90 x 90 mm ve uzunlukları 1500 mm'dir. Bu profillerin birbiri ile olan bağlantıları için 18 adet L köşe bağlantısı kullanılmıştır. Buna göre sistemde 1200 mm yüksekliğe kadar serbest düşme hareketi modellenebilmektedir. İzin verilen serbest düşme yüksekliğine bakılırsa, tasarlanan bu düşme test düzeneği ile yaklaşık olarak 5000 mm/s'lik çarpma hızlarına kadar çıkılabilmektedir.

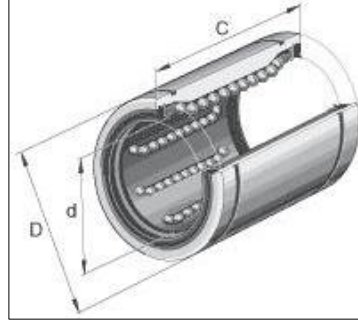
Düşme test düzeneğinde kullanılan 90x90 mm kesitindeki alüminyum profillere ait görsel ve teknik resim Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 : 90x90 mm Al profillerin resmi.

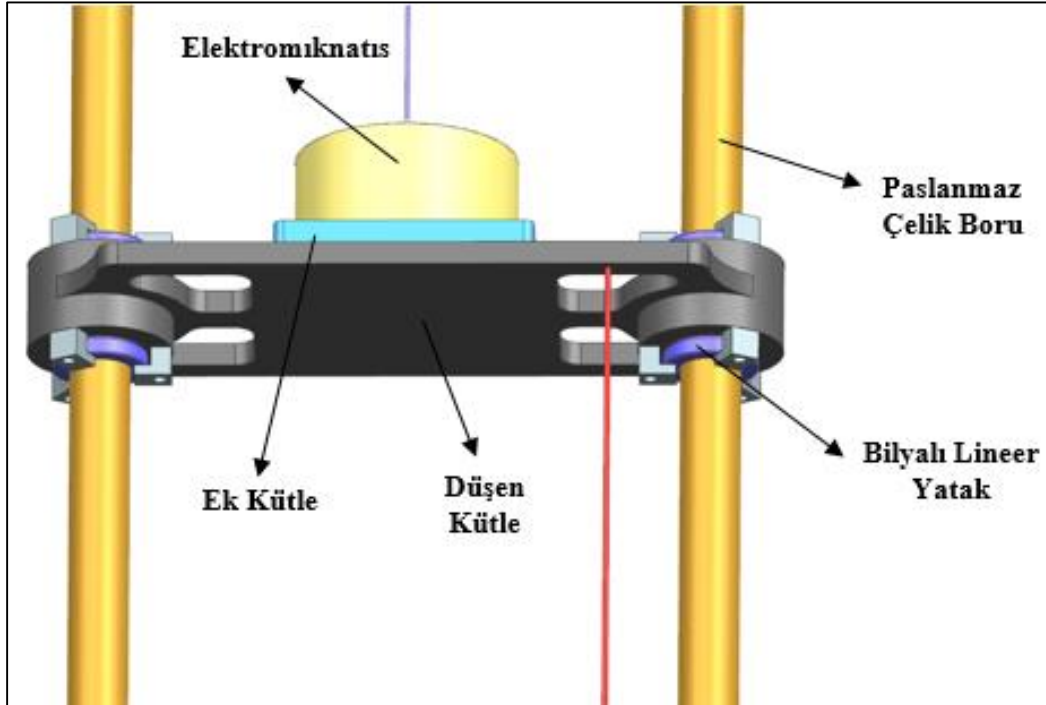
Şekil 3.8'de gösterilen alt tablanın kalınlığı, tablanın düşen kütlenin darbesinin etkisiyle deforme olmaması için 30 mm olarak belirlenmiştir. Üst tablanın kalınlığı ise 15 mm olarak belirlenmiş ve montaj kolaylığı göz önüne alınarak üzerinde boşaltmalar yapılmıştır. Alt ve üst kısımda yer alan alüminyum tablaların en ve boy ölçüleri sırası ile 650 mm x 680 mm olarak kararlaştırılmıştır. Şekil 3.8'de alt ve üst tablalar görülmektedir. Serbest düşmeye bırakılan kütle, alt ve üst alüminyum tablalara metal ayaklar ile sabitlenen paslanmaz çelik borular üzerinde, serbestçe kayabilmektedir. Hızsız olarak serbest düşmeye bırakılan kütlenin, mümkün olan maksimum teorik serbest düşme hızına yakınsaması için sürtünmesi düşük yataklar kullanılması amaçlanmıştır. Bu nedenle paslanmaz çelik borular üzerinde kayan yatakların bilyalı lineer yatak olarak seçilmesi uygun görülmüştür. Sürtünmenin azaltılması için lineer bilyalı yataklara yağlama işlemi de uygulanmıştır.

Deney düzeneğinde kullanılan lineer bilyalı yataklara ait görsel Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 : Düşme test düzeneğinde kullanılan lineer bilyalı yatak.

Serbest düşmeye bırakılan bloğun kütlesi minimum 5 kg olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, farklı yoğunluktaki malzemelerin farklı gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için, düşen kütle değeri 0.5 kg'lık artırımlar ile 10 kg'a kadar artırılabilir. Düşen kütleyle ait bu değerler belirlenirken yük sensörünün ölçüm kapasitesi ve 50x50x50 mm³'lük köpük numunesinin %50-%70 aralığında deformasyona uğraması şartları göz önünde bulundurulmuştur. İstenildiği takdirde düşen kütle miktarı ve serbest düşme yükseklikleri artırılarak, köpük numunesinin daha yüksek miktardaki deformasyonu sağlanabilmektedir. Düşen kütle ve lineer olarak yataklanmasına ait görsel Şekil 3.11'de görülmektedir.

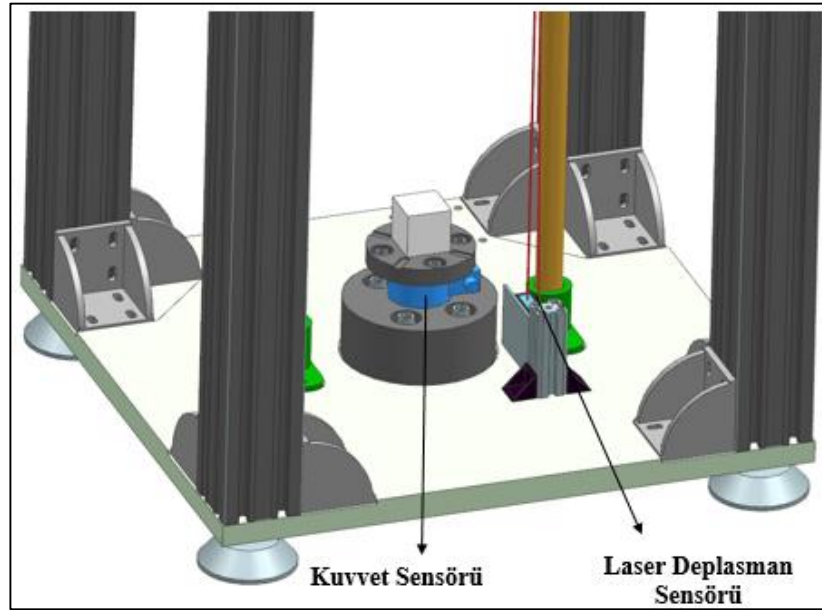


Şekil 3.11 : Düşen kütle ve lineer olarak yataklanması.

Deneyler gerçekleştirilirken belirli bir yüksekliğe ayarlanan elektromıknatıs, düşürülecek olan kütle sabitlenmektedir. Elektromıknatıs, 24V DC elektrik

verildiğinde düşen kütleyi tutan, elektrik kesildiğinde ise bırakma özelliğine sahiptir. Buna göre her bir numunenin test edilmesinin ardından, düşen kütle belirli bir konumdaki elektromıknatısa sabitlenmekte ve diğer numuneler için ölçümler benzer şekilde yapılmaktadır. Farklı yüksekliklerde yapılacak testler için elektromıknatısın yüksekliği tekrardan ayarlanmaktadır. Şekil 3.11’de düşen kütleyi tutan elektromıknatısın CAD modeli görülmektedir.

Yük sensörünün ve köpük numunesinin yerleştirilmesi için alt alüminyum tabla üzerine yuvalar açılmış ve montaj işlemi yapılmıştır. Test düzeneğinin en alt kısmında yer alan plastik ayaklar, alt tablaya monte edilmiştir. Deformasyon miktarını ölçmek için kullanılan lazer deplasman ölçer de aynı şekilde alt kısma alüminyum profiller kullanılarak yerleştirilmiştir. Düşme senaryosu sırasında lazer deplasman sensörünün herhangi bir olumsuz durumda hasar görmesini engellemek için, 40x40 mm² kesitinde alüminyum profiller ile korunaklı hale getirilmiştir. Öte yandan kuvvet sensörü de alt ve üst kısımlarına bağlanan dairesel çelik parçalar ile sisteme monte edilmiştir. Ölçüm cihazlarının alt tabla üzerindeki yerleşimi Şekil 3.12 ‘de gösterilmiştir.

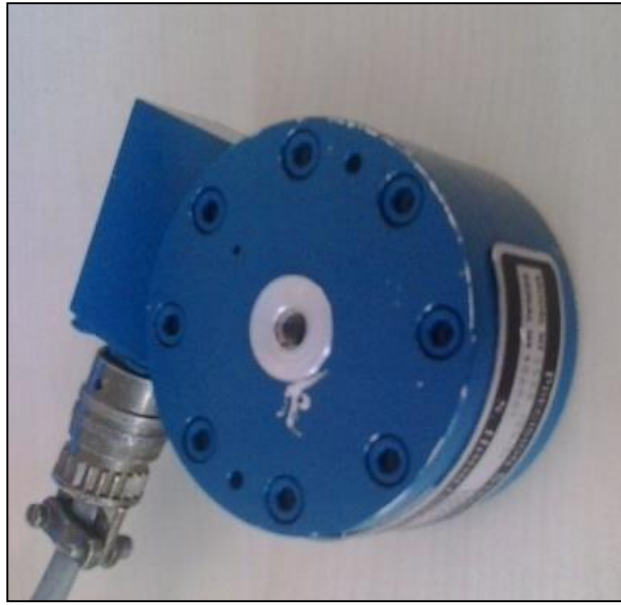


Şekil 3.12 : Ölçüm cihazlarının CAD model yerleşimi.

3.3.2 Düşme test düzeneğinin sensör özellikleri

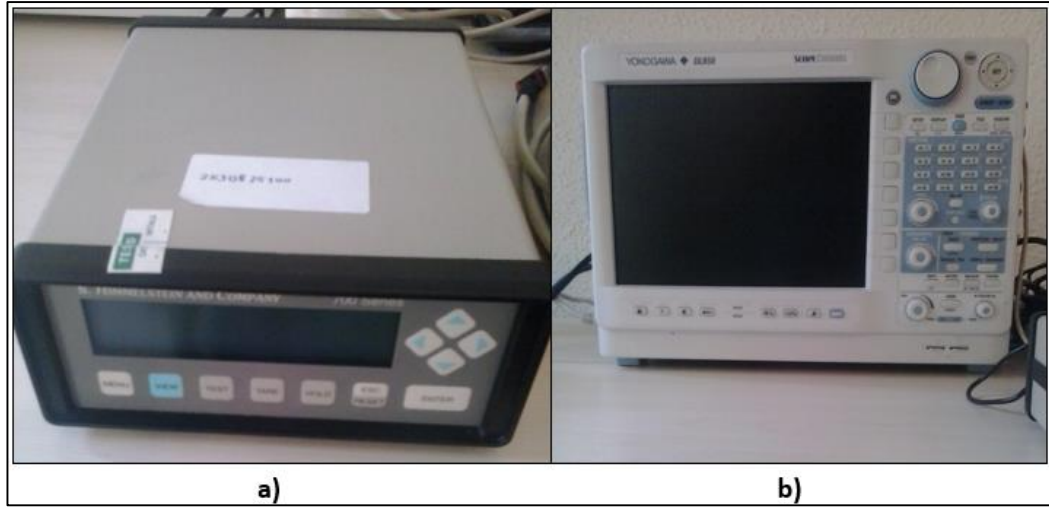
Düşme test düzeneğinde ivmeölçer, kuvvet ve lazer deplasman sensörleri kullanılmıştır. Kuvvet sensörünün, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi düzeneğin alt kısmına monte edilmesi ile düşen kütlenin köpük numuneye çarpma süresi boyunca

kuvvet değerleri ölçülebilmektedir. Test düzeneğinde kullanılan kuvvet sensörü, Himmelstein firmasının 1500ASK-300 model, analog çıktı sağlayan ve 2250 N'a kadar ölçüm yapabilme özelliğine sahip strain-gage tipi sensörüdür. Düşme testi düzeneğinde basma kuvvetlerinin ölçümü için kullan bu sensör, istenildiğinde çekme kuvvetlerinin ölçümü için de kullanılabilir. Basma kuvvetleri için -2.10033 mV/V voltaj çıktısı verirken, çekme kuvvetleri için 2.10203 mV/V voltaj çıktısı sağlamaktadır. Sensörün lineersizliği basma kuvvetleri için -0.015% olarak verilmiştir. Ayrıca, sensörün belirsizliği de 0.025% olarak verilmektedir. Düşme test düzeneğinde kullanılan kuvvet sensörü Şekil 3.13'de görülmektedir.



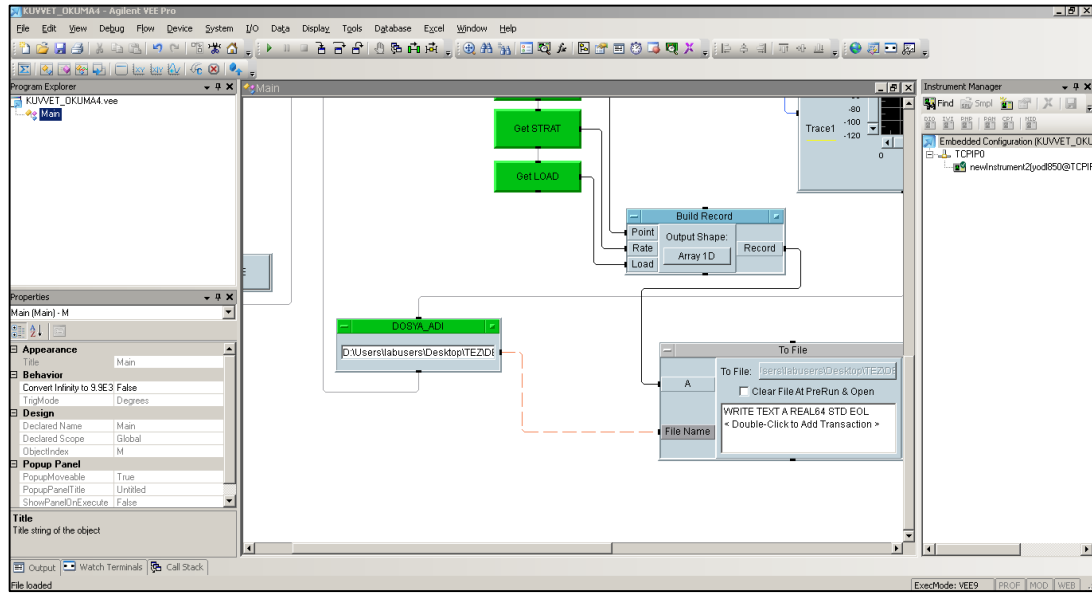
Şekil 3.13 : Himmelstein 1500ASK-300 kuvvet sensörü.

Düşme test düzeneğinde, serbest düşen kütlenin alt kısımda yer alan köpük numuneye çarpması esnasında kuvvet sensöründen elde edilen analog çıktı, sinyal yükselticiye aktarılmaktadır. Sinyal yükseltici ile istenilen değere yükseltilen voltaj değeri, Yokogawa DL 850 model veri toplama cihazına aktarılır. Yokogawa cihazına analog olarak giren veri, burada dijitale dönüştürülür. Düşme test düzeneğinde incelenen çarpma durumu 25 - 35 ms gibi oldukça dar bir zaman aralığını kapsadığından, örnekleme frekansı 10 kHz olacak şekilde ayarlanmıştır. Buna göre Yokogawa cihazından 1 sn ölçüm aralığında 10000 adet veri alınmaktadır. Bu durumda çarpma süresi, 25 - 35 ms aralığındaki süreyi modellemek için 250-350 arası veri elde edilmiş olur. Aşağıda yer alan Şekil 3.14'de düşme test düzeneğinde kullanılan Himmelstein marka sinyal yükseltici ve Yokogawa veri toplama cihazı gösterilmektedir.



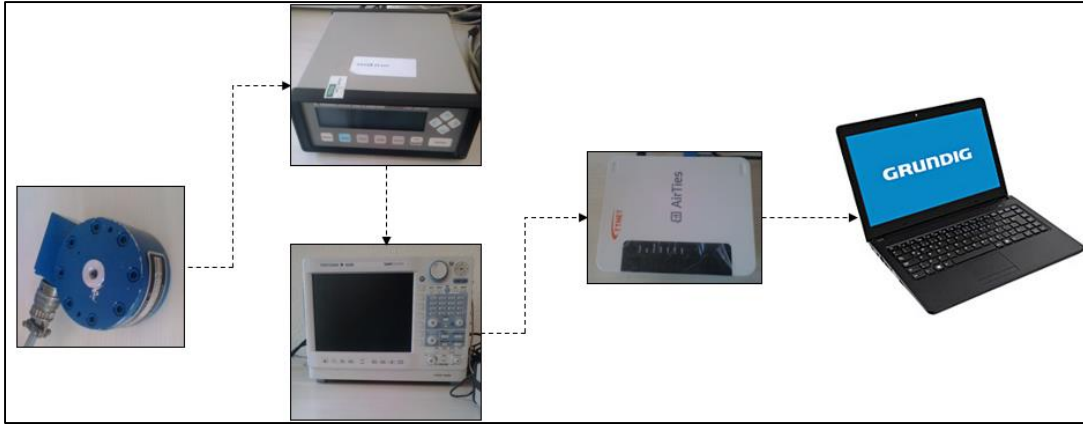
Şekil 3.14 : Cihazlar : (a) Himmelstein marka sinyal yükseltici. (b) Yokogawa marka veri toplama cihazı.

Burada Yokogawa veri toplama cihazında toplanacak verinin, bilgisayarda Agilent VEE yazılımı kullanılarak kontrol edilmesi ve kaydedilmesi sağlanmıştır. Veri toplama cihazından gelen voltaj çıktısı, oluşturulan yazılım ile program içerisinde Newton birimindeki kuvvet çıktısına dönüştürülmektedir. Agilent VEE yazılımının arayüzü Şekil 3.15’te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Agilent VEE yazılımı arayüzü.

Yokogawa veri toplama cihazı ile bilgisayarın bağlantısı iki portlu bir modem ile gerçekleştirilmiştir. Burada bilgisayar ile Yokogawa veri toplama cihazı, oluşturulan sanal bir IP adresi üzerinden bağlantı kurmaktadır. Şekil 3.16’da kuvvet verisi toplama sisteminin bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.16 : Kuvvet verisi toplama sistemi.

Öte yandan köpük numunesinin serbest düşen kütlenin çarpması esnasındaki deformasyonunu zamana bağlı olarak ölçmek için sisteme Micro-Epsilon marka ILD-1401-200 model lazer deplasman ölçer monte edilmiştir. Bu sensör 60 mm ile 260 mm arasındaki deplasmanları hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Buna göre 60 mm'den daha az ve 260 mm'den daha uzak deplasmanlar ölçüm aralığının dışında kalmaktadır. Sensörün test düzeneğinde konumlandırılması, bu ölçüm aralığı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Lazer deplasman ölçer dinamik durumda 100 μ m hassasiyet ile ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca örnekleme frekansı 1000 Hz olduğundan, saniyede 1000 adet veri alabilmektedir. Böylece kuvvet sensöründen saniyede 10000 adet alınan veri ile lazer verilerinin eşleştirilmesi kolayca mümkün olmaktadır. Serbest düşen kütlenin çarpma süresi 25-35 ms aralığında değiştiğinden yeterli hassasiyette ölçüm yapılabilir. Buna göre çarpışma süresi boyunca kuvvet sensöründen 250-350 ve lazer deplasman sensöründen 25-35 veri alınmaktadır. Sensör 24 V DC elektrik beslemesi ile çalışmaktadır ve ağırlığı yaklaşık olarak 100 gr'dır. Lazer deplasman ölçere ait görsel Şekil 3.17'de görülmektedir.



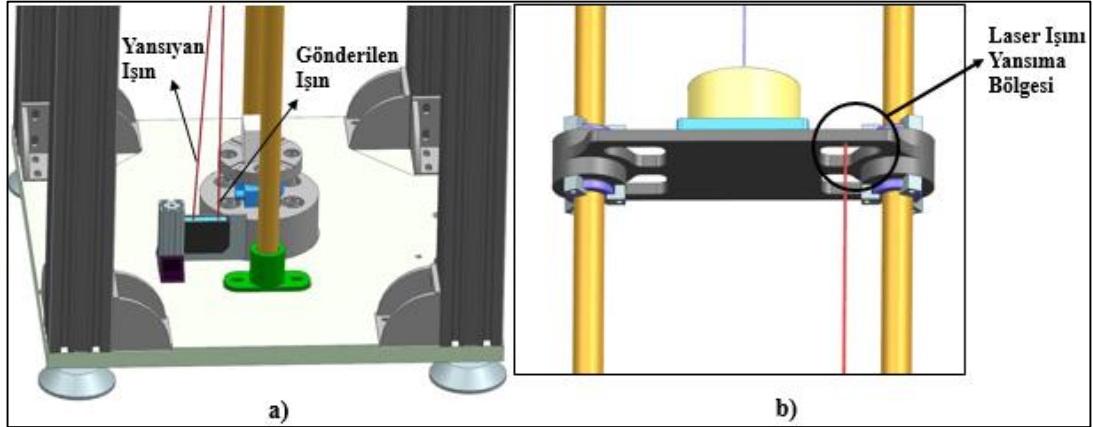
Şekil 3.17 : Micro-Epsilon marka lazer deplasman ölçer.

Lazer deplasman sensörü, RS232 çıkışı ile dijital sinyal verisi sağlamaktadır. RS232 - USB dönüştürücüsü kullanılarak, lazer sensörü bilgisayara bağlanmıştır. Şekil 3.18’de RS232 - USB dönüştürücüne ait görsel verilmiştir. Micro-Epsilon firmasının bu sensörler için sağladığı yazılım ile ölçümün başlatılması, sensörün kontrolü ve sonuçların yazdırılması mümkün olmaktadır.



Şekil 3.18 : RS232 - USB dönüştürücü.

Lazer deplasman ölçer, alt tabla üzerinde yerleştirilmiş olduğu konumdan yukarı yönde düşen kütlenin alt kısmında belirlenen bölgesine, lazer ışığı göndermekte ve belli bir açıda yansıyan lazer ışığı yardımı ile deplasmanı ölçebilmektedir. Şekil 3.19’da lazer sensörün ölçüm yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Lazer sensörü : (a) Gönderilen ve yansıyan ışınlar. (b) Yansıma bölgesi.

Düşme test düzeneğinde kullanılan diğer bir sensör de ivmeölçerdir. Düşen kütle üzerine yerleştirilen ivmeölçer ile köpük numune üzerine serbest düşme hareketi ile darbe uygulayan düşen kütlenin çarpma esnasındaki ivme verileri zamana bağlı olarak elde edilmektedir. İvmeölçerin düşme test düzeneği üzerine monte edilmiş haldeki görseli Şekil 3.20’de görülmektedir.

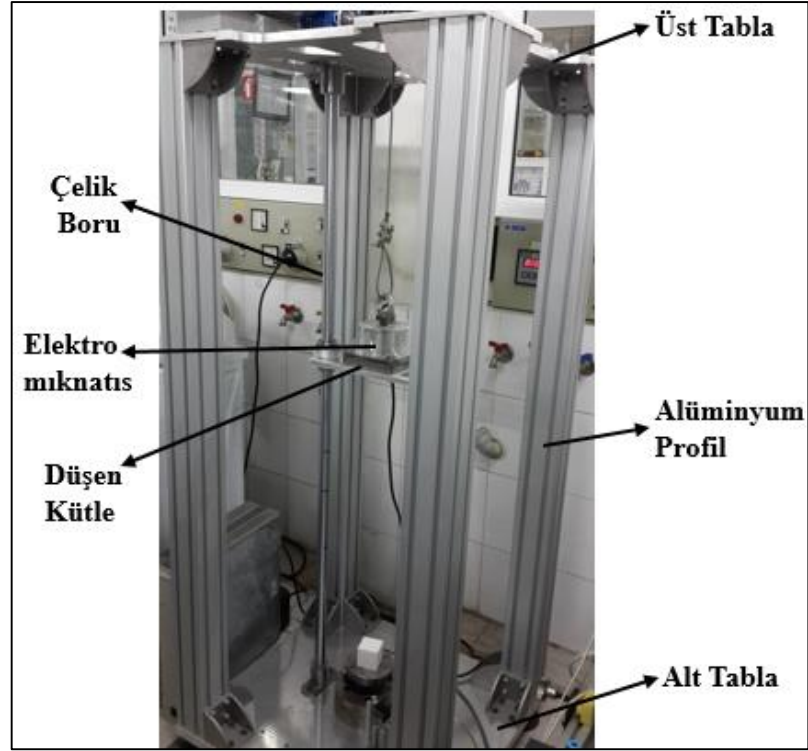


Şekil 3.20 : İvmeölçerin test düzeneğine yerleştirilmesi.

Zamana bağlı olarak elde edilen ivme verileri kullanılarak düşen kütlenin köpük numunesine uyguladığı kuvvet ve çarpma anındaki hızın bilinmesi ile köpük numunenin darbe anındaki deformasyonları da hesaplanabilmektedir. Düşme test sisteminde kullanılan ivmeölçer darbe uygulamaları için de kullanımı uygun olan Brüel & Kjaer marka, 4394 model ivmeölçerdir. İvmeölçer ile veri toplanması 8192 Hz örnekleme frekansında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçer maksimum 500G değerindeki ivmeyi ölçebilmektedir. Ölçüm hassasiyeti 10 mV/G olarak verilmiştir. Kütlesi 2.9 gr olan ivmeölçerin çalışma sıcaklığı -50 ile 125 °C aralığındadır. Öte yandan ivmeölçerin bağlandığı veri toplama sistemi yine Brüel & Kjaer firmasına ait Pulse marka analizör ve yazılımdan oluşmaktadır. Pulse sistemi donanım ve yazılımsal olarak modüler bir yapıya sahip olduğundan, hem titreşim hem de akustik uygulamalar için kullanımı uygundur.

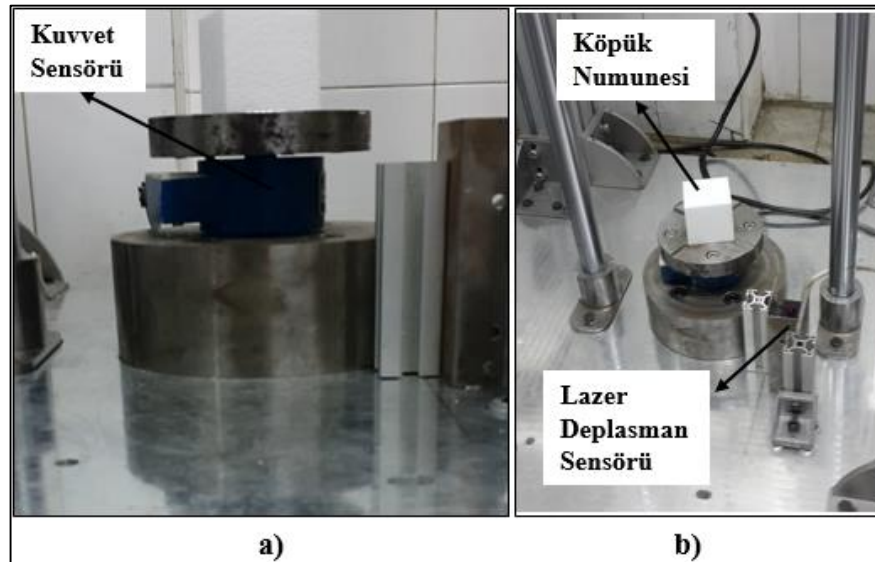
3.3.3 Test düzeneğinin çalışma prensibi

Bu kısımda kurulan düşme test düzeneğinde yapılan testler sırasında izlenen yol anlatılmıştır. İlk aşamada test düzeneğinin detayları sensörleri ile birlikte açıklanmıştır. Daha sonra, kuvvet sensörü ve lazer deplasman sensörü kullanılarak gerçekleştirilen testler açıklanmıştır. Bunun ardından sisteme ivmeölçer monte edilmesi ile gerçekleştirilen testler anlatılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 3.21’de düşme testi düzeneği görülmektedir.



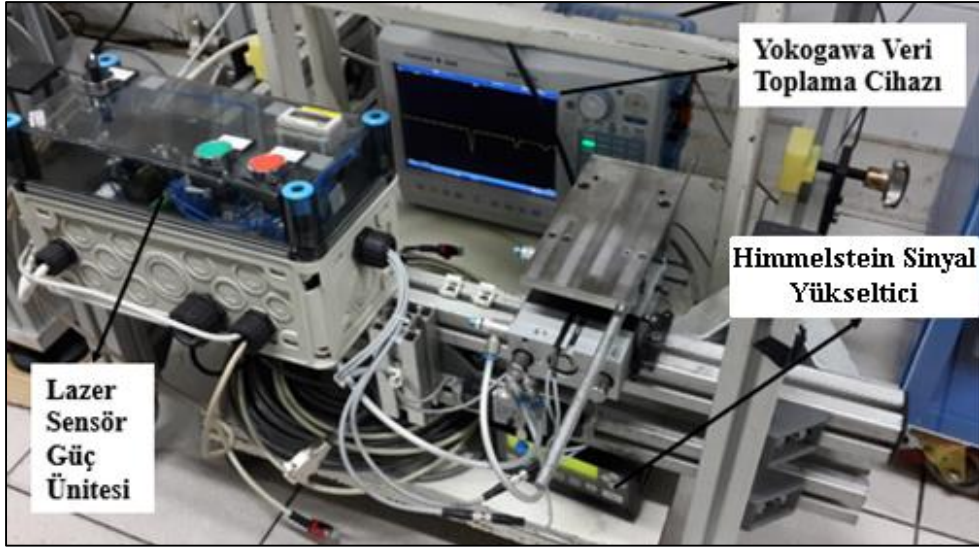
Şekil 3.21 : Düşme test düzeneği.

Kurulan düşme test düzeneğinde sensörlerin ve numunenin yerleşimleri Şekil 3.22’de görülmektedir. Sensörlerin sisteme montajı yapılırken, darbe kuvvetleri neticesinde hatalı ölçümlere neden olabilecek olumsuz senaryolar öngörülerek, sensör montajlarının rijit bir biçimde yapılması sağlanmıştır.



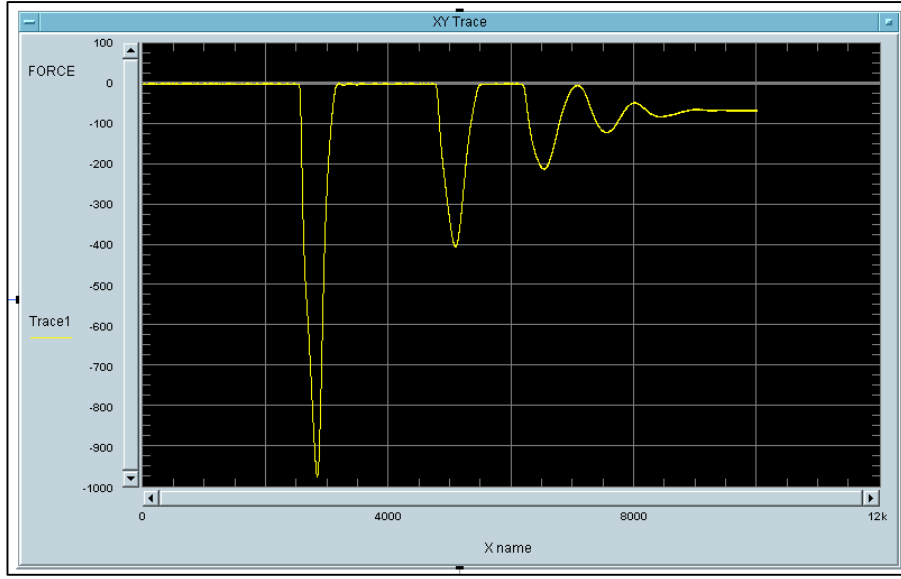
Şekil 3.22 : Sensörlerin yerleşimi : (a) Kuvvet sensörü. (b) Lazer deplasman sensörü.

Şekil 3.23’de veri toplama cihazları ve lazer sensör güç ünitesi gösterilmiştir. Bu cihazlar test düzeneğinin bulunduğu yere güvenli bir biçimde konumlandırılmıştır.



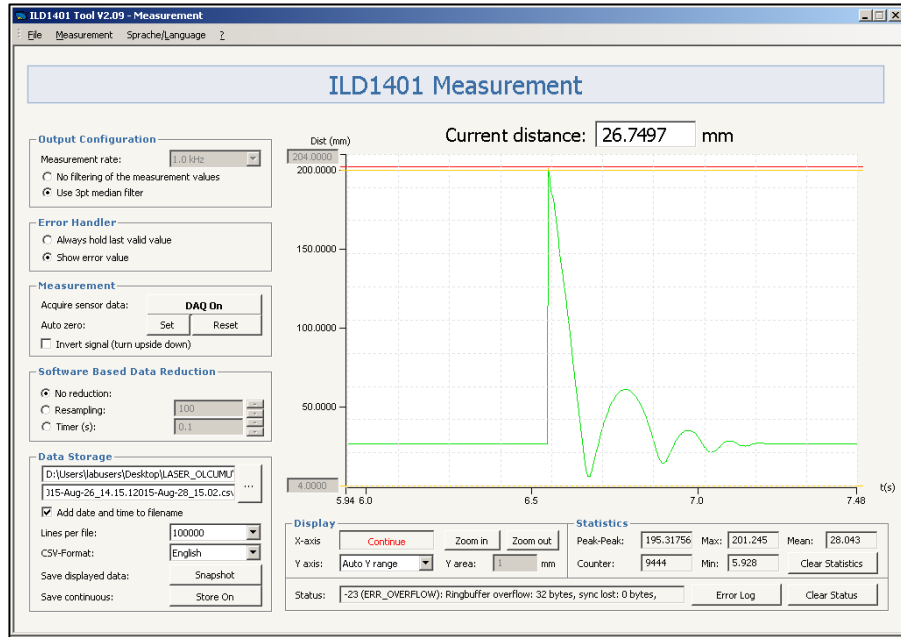
Şekil 3.23 : Veri toplama cihazları.

Ölçümler yapılırken test düzeneğinde ilk olarak, serbest düşmeye bırakılacak kütlenin yüksekliği ayarlanmaktadır. Bunun için elektromıknatısın konumu istenilen düşme yüksekliğini sağlayacak biçimde ayarlanmaktadır. Elektromıknatıs 24V DC elektrik verildiğinde tutma özelliğine sahip olduğundan, elektrik verilerek düşen kütleye sabitlenmektedir. Daha sonra köpük numunesi alt kısımda kuvvet sensörünün üzerinde yer alan dairesel çelik parçanın üzerine yerleştirilir. Numune test düzeneğine yerleştirildikten sonra, sinyal yükseltici kullanılarak kuvvet sensöründen okunan değer sıfırlanmaktadır. Bu aşamadan sonra sistem artık düşme testini gerçekleştirmek için hazırdır. Ölçümü yapmak için öncelikle lazer deplasman sensörü çalıştırılmaktadır. Bunun nedeni lazer sensörün 10 sn boyunca veri toplayabilmesidir. Diğer yandan kuvvet sensöründen sadece 1 sn süresince veri toplanabilecek biçimde ayarlama yapılmıştır. Lazer sensörü çalıştırıldıktan sonra, elektromıknatısa verilen elektriğin kesilmesi ve kuvvet sensörünün ölçüme başlaması aynı anda yapılmalıdır. Elektromıknatısa verilen elektriğin olması gereken zamandan erken veya geç kesilmesi durumunda, kuvvet ölçme süresi çarpışma süresini kapsamama sonucunu yaratabilmektedir. Bu nedenle elektromıknatısa verilen elektriğin kesilmesi ve kuvvet sensörünün ölçüme başlangıç zamanlarının çakıştırılması önemlidir. Uygun şartlar altında her bir numune için deneyin yapılmasının ardından kuvvet sensöründen elde edilen veri .txt uzantılı, lazer sensöründen elde edilen veri ise .xls uzantılı olarak kayıt edilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 3.24 kuvvet grafiğini, Şekil 3.25 ise lazer deplasman sensöründen elde edilen deplasman grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.24 : Kuvvet sensöründen alınan veri.

Şekil 3.24 ve 3.25’de de görüleceği üzere elde edilen veri 4 adet çarpmayı kapsamaktadır. İlk çarpmadan sonraki çarpımlar düşürülen kütlenin geri sekmesini, yeniden düşüp tekrar geri sekmesi adımlarını göstermektedir. Test sisteminde geri sekmeyi önleyen herhangi bir mekanizma bulunmamaktadır.

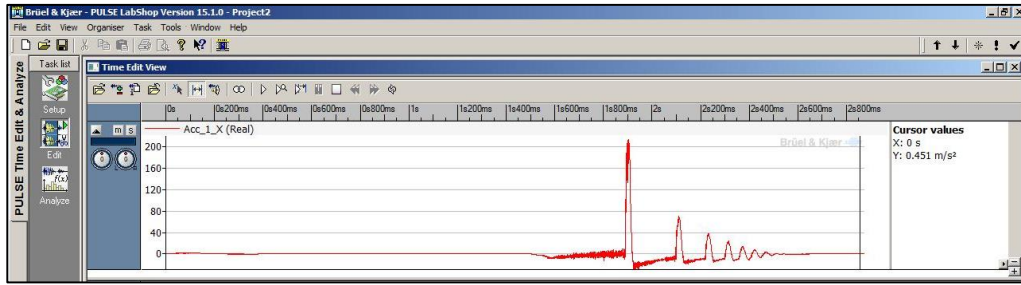


Şekil 3.25 : Lazer deplasman sensöründen alınan veri.

Yukarıda tarif edilen koşullar göz önüne alınarak ölçümlerin yapılmasının ardından lazer ve kuvvet sensörlerinden elde edilen veriler kayıt edilerek sonuçlar değerlendirilmektedir. Sonuçların değerlendirilmesinde lazer ve kuvvet sensörlerinden zamana bağlı elde edilerin verilerin uyumu sağlanarak, köpük

malzemeye ait gerilme-gerinme eğrisi bir sonraki bölümde anlatılacağı şekilde elde edilebilir.

Öte yandan ivmeölçer kullanılarak yapılan ölçümlerde de benzer sistematik uygulanmaktadır. Serbest düşme yapacağı konuma getirilen düşen kütle, ivmeölçer veri toplama sisteminin aktif hale getirilmesinin ardından serbest düşmeye bırakılmaktadır. Elde edilen ivme verileri kayıt edilip, daha sonra işlenmek üzere Pulse yazılımından alınarak değerlendirilir. Şekil 3.26'da ivmeölçer verilerinin işlendiği Pulse yazılımına ait görsel yer almaktadır.



Şekil 3.26 : Pulse yazılımına ait görsel.

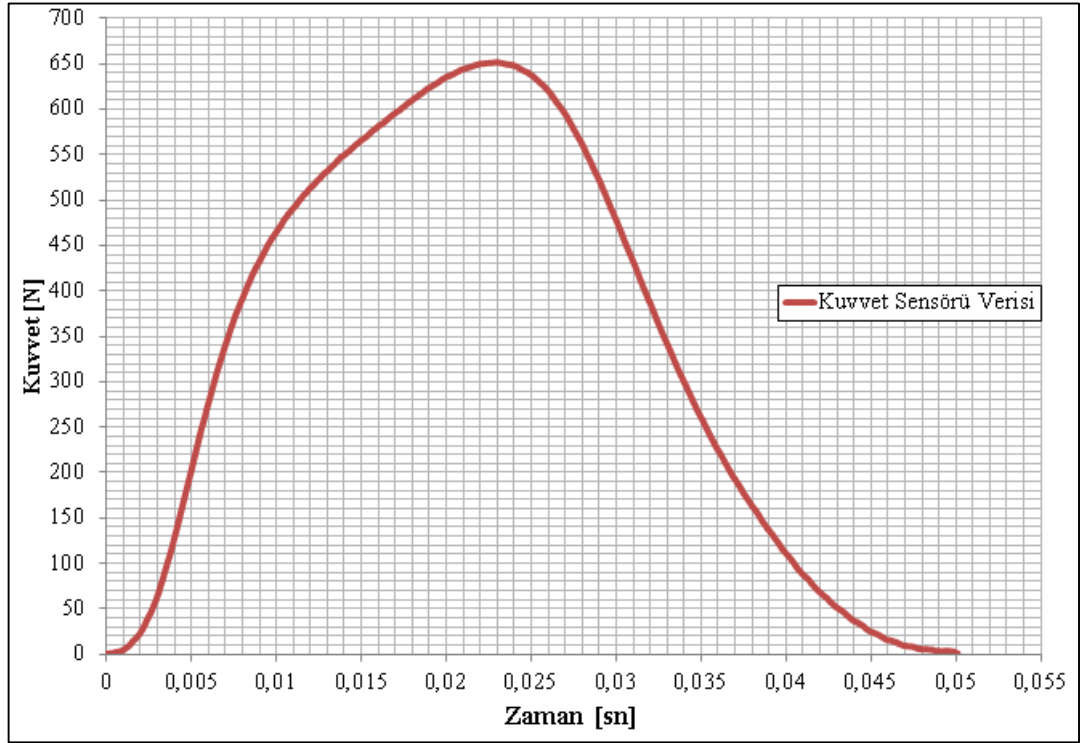
Yukarıda yer alan Şekil 3.26'dan da görüldüğü gibi düşen kütlenin sekme ve yeniden darbe uygulama durumlarındaki ivme verileri de elde edilmiştir. Fakat çalışma kapsamında ilgilenilen durumun ilk çarpma durumu olması nedeni ile ivmeölçerden, kuvvet sensöründen ve lazer deplasman sensöründen alınan verilerin sadece ilk çarpma için olan kısmına odaklanılmıştır.

3.4 Sonuçlar

Bu kısımda Zwick marka standart çekme testi cihazı ve bu tez kapsamında ortaya konan düşme test düzeneği ile yapılan test sonuçları sunulmuştur. 20, 24, 26 ve 30 kg/m³ yoğunluktaki köpük numunelerinin farklı gerinim hızlarındaki test sonuçları verilmiştir. Testlerde oluşacak saçınıklığın sonuçlara olan etkisini azaltmak için her bir senaryoda testler 5 kez tekrarlanmıştır. Standart çekme test cihazı ile 200 mm/dak, 500 mm/dak ve 1000 mm/dak olmak üzere düşük ve sabit yükleme hızlarında elde edilen sonuçlar, kurulan düşme test düzeneğinden elde edilen yüksek çarpma hızlarındaki deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle düşme testi düzeneğinde bulunan kuvvet sensöründen elde edilen veriler incelenmiştir. Şekil 3.27'de tipik bir örnek olarak 20 kg/m³ yoğunluktaki köpük

numunenin 25 cm yükseklikten yapılan test sonucunda elde edilen kuvvet grafiği verilmiştir.



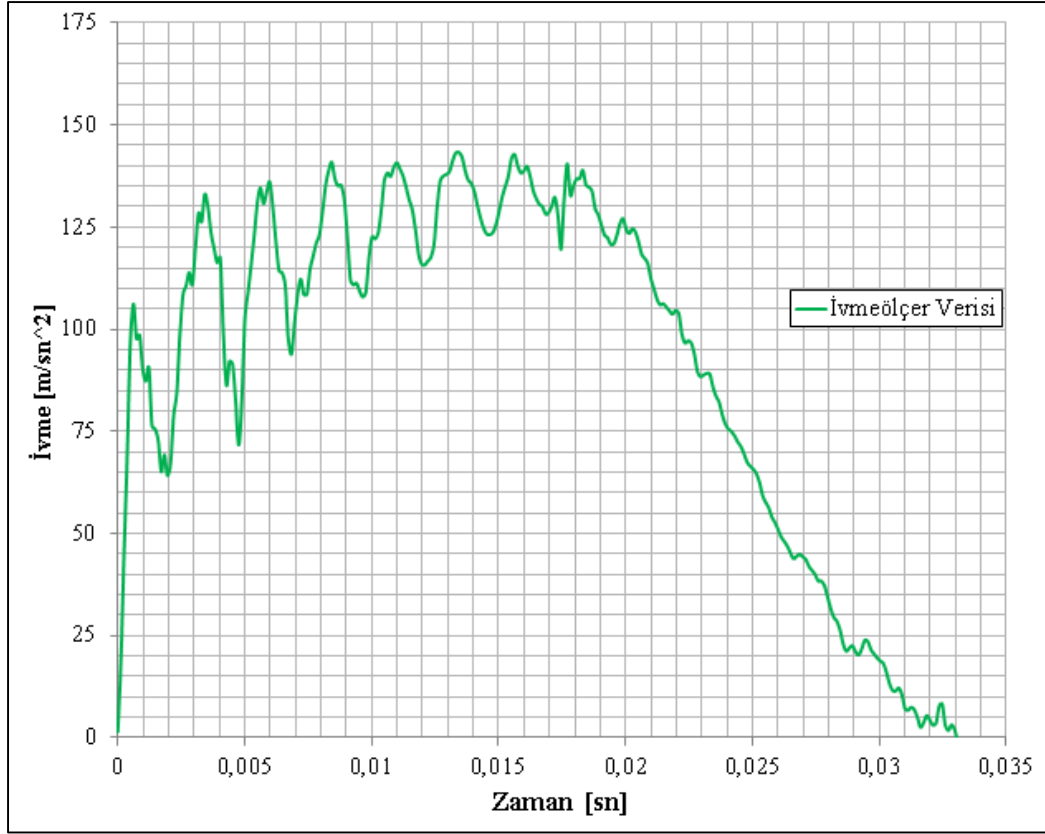
Şekil 3.27 : Kuvvet sensörü verisi

Şekil 3.27'deki kuvvet verileri, düşen kütlenin köpük numuneye çarpması ve geri sekmesi süresini kapsamaktadır. Grafik incelendiğinde çarpma ve geri sekme süresi yaklaşık olarak 0.05 sn görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, çarpma ve geri sekme süresinin 0.025-0.035 sn aralığında gerçekleştiği görülmektedir [10,14]. Burada kuvvet sensöründen elde edilen veriler, literatürde yapılan çalışmalardan farklılık göstermektedir. Bunun nedeni düşme test düzeneğinde kullanılan kuvvet sensörünün darbe anındaki kuvvetin değişim hızını takip edememesidir. Bu nedenle kuvvet sensörü ile toplanan veriler değerlendirildiğinde hatalı sonuçlara yol açmaktadır.

Öte yandan ivmeölçer ile belirli zaman aralığında her nokta için elde edilen ivme değerleri, denklem 3.1'de yer alan Newton'un 2. Yasasına göre, düşen kütle ile çarpıldığında darbe anındaki zamana bağlı kuvvet verisi elde edilebilmektedir.

$$F(t) = m \cdot a(t) \quad (3.1)$$

Şekil 3.28'de 20 kg/m³ yoğunluktaki köpük numunesinin 25 cm yükseklikten yapılan test sonucunda elde edilen ivme grafiği verilmiştir.



Şekil 3.28 : İvmeölçer verisi.

Şekil 3.28’de yer alan, ivmeölçerden elde edilen veriler, köpüğün sıkışması sırasında salınımlı olarak görülmektedir. Bu salınımın nedeninin ivmeölçerin yerleştirildiği düşen kütlenin, çarpmanın etkisi ile doğal frekansında tahrik olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu nedenle düşen tablanın doğal frekanslarının belirlenmesi için çekiç testi yapılmıştır. Şekil 3.29’da düşen kütlenin çekiç testi ile belirlenen doğal frekansları görülmektedir.



Şekil 3.29 : Düşen kütlenin doğal frekansları.

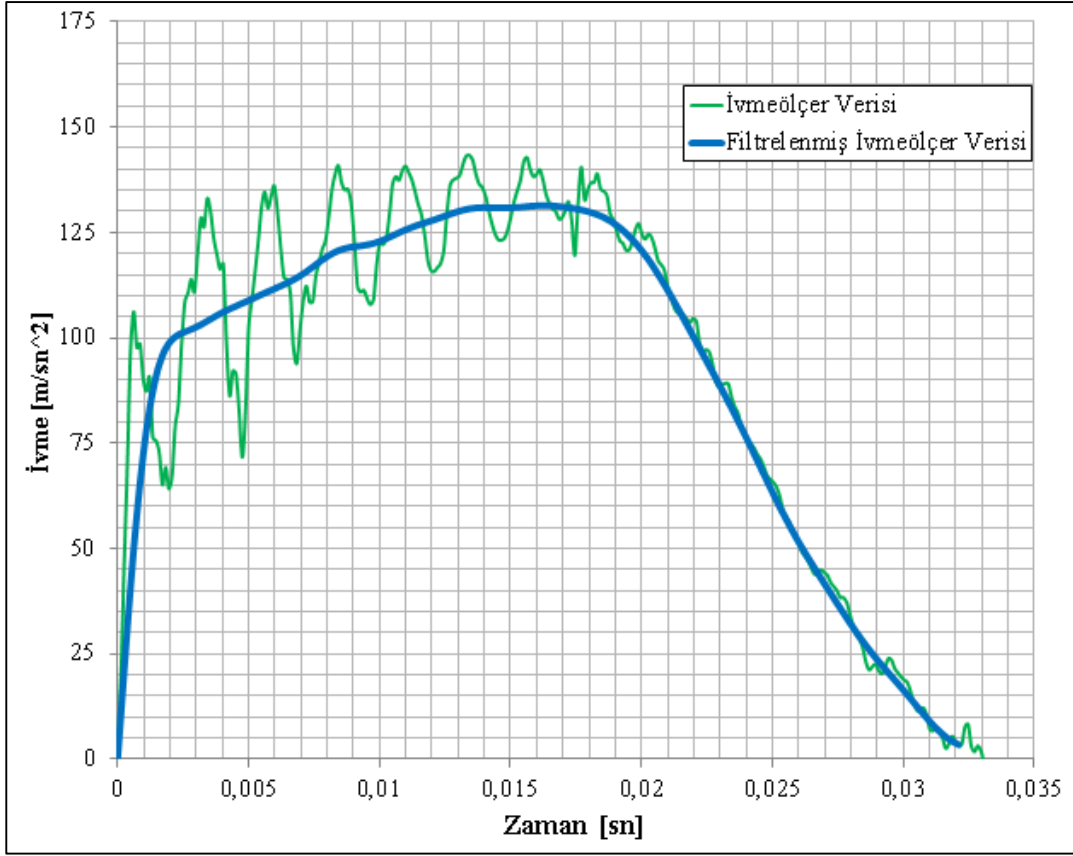
Şekil 3.28’de yer alan ivmeölçer verilerinde oluşan salınımların frekansı incelendiğinde, düşen kütlenin 800 Hz’e kadar olan doğal frekanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Öte yandan, düşen kütleyle ait çekiç testine ait görsel Şekil 3.30’da görülmektedir.



Şekil 3.30 : Düşen kütlenin çekiç testi.

Şekil 3.28’de görülen salınımların frekansının, Şekil 3.29’da görülen doğal frekans değerlerinden 385 Hz değerine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Buna göre düşen kütlenin doğal frekansında tahrik olması nedeni ile ivmeölçer verisinde salınımlar meydana gelmektedir. Buradan düşen tablanın daha yüksek rijitliğe sahip olacak bir biçimde tasarlanması ile ivmeölçer verisinde meydana gelebilecek salınımların etkisi azaltılabilmektedir.

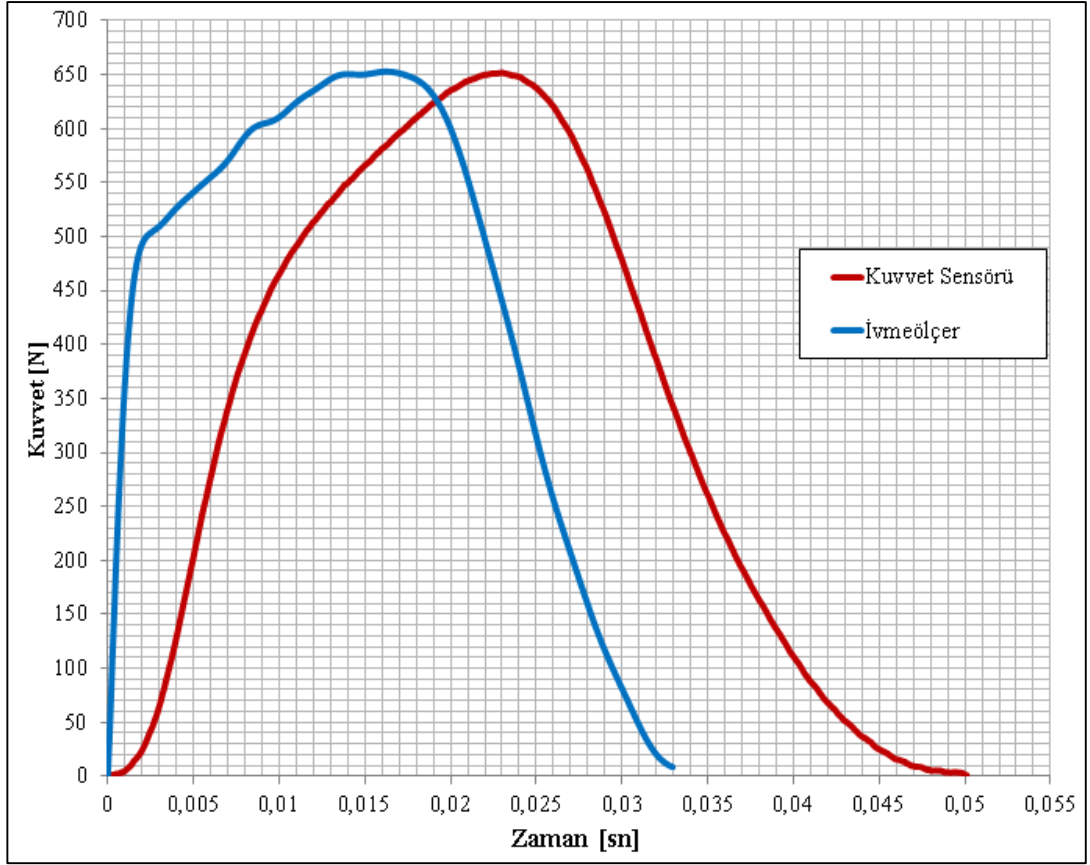
Ayrıca Şekil 3.28 detaylı olarak incelendiğinde düşen kütlenin çarpma ve geri sekme süresinin 0.03-0.035 sn aralığında olduğundan literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir [10,14]. Burada ivmeölçerin, darbe anındaki ivmenin değişim hızını takip edebildiği anlaşılmaktadır. Fakat ivmeölçerden elde edilen salınlı verilerin doğru bir biçimde değerlendirilebilmesi için MATLAB programında faz kaymasına sebep olmayacak şekilde filtrelenmesi gerekmektedir. Şekil 3.31’de 20 kg/m³ yoğunluktaki köpük numunesinin 25 cm yükseklikten yapılan testler sonucu ivmeölçerden elde edilen ve MATLAB programında filtrelenmiş ivme verisi görülmektedir.



Şekil 3.31 : Filtrelenmiş ivmeölçer verisi.

Kuvvet sensörü ve ivmeölçerden elde edilen veriler değerlendirildiğinde, kuvvet ölçümü için ivmeölçer verilerinin kullanılması daha hassas ve güvenilir bulunmuştur. Düşme testi düzeneğinden elde edilen ivme verilerinin filtrelenmesinin ardından denklem 3.1'in kullanılması ile zamana bağlı kuvvet verileri elde edilmiştir. Burada serbest düşmeye bırakılan kütle 5 kg'dır. Buna göre Şekil 3.32'de 20 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numunenin 25 cm yükseklikten yapılan testler sonucunda, kuvvet sensörü ve ivmeölçer kullanılarak elde edilen kuvvet verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.32'de, kullanılan kuvvet sensörünün tepki süresinin yeterli olmadığı, bu sensörün hızlı kuvvet değişimlerini takip edemediğini ve bu sonucun ivmeölçer verisinden hesaplanan kuvvet verisinden farklı olduğu görülmektedir.

Öte yandan, darbe anında köpük malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deformasyonun zamana bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, daha önce de belirtildiği gibi, lazer deplasman sensörü verileri kullanılmıştır. Lazer deplasman sensörü ile ivmeölçer verilerinin zaman uyumlulukları sağlanarak köpük malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Lazer deplasman sensöründen elde edilen örnek bir sonuç Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.32 : İvmeölçer ve kuvvet sensörü verilerinin kıyaslanması.

Ayrıca, karşılaştırma için, ivmeölçerden elde edilen verilerin, iki defa integrasyonu ile zamana bağlı deplasman verileri de elde edilebilmektedir. Elde edilen ivme verileri zamana bağlı olarak çizdirildikten sonra, çarpma anındaki hızın teorik olarak hesaplanması ile zamana bağlı hız grafiği çizdirilebilir. Fakat test sisteminde yer alan düşen kütlenin, sisteme lineer bilyalı yataklar ile monte edilmesinden dolayı çarpma anındaki hız, olası maksimum hızdan yaklaşık olarak %10 daha düşüktür. Burada hızın bir miktar farklı olmasının nedeni sistemde oluşan sürtünmelerdir. Bu nedenle çarpma anındaki hız değeri için teorik olarak hesaplanan hız yerine, lazer deplasman sensörünün verileri kullanılarak elde edilen çarpma başlangıcındaki hız hesaba dahil edilmiştir. Aynı şekilde zamana bağlı deplasmanın belirlenmesi için de hız-zaman grafiğinin integrali alınarak deplasman verisi elde edilmiştir. Teorik hız hesaplanırken denklem 3.2’de yer alan ifade kullanılır.

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 \quad (3.2)$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (3.3)$$

Burada, m düşen kütle, g yerçekimi ivmesi, h düşme yüksekliği ve V teorik çarpma hızını belirtmektedir. Buna göre düşme test düzeneğindeki hızlar 25, 40 ve 70 cm yükseklikten serbest düşme durumları göz önüne alındığında, 2215, 2800 ve 3700 mm/s olarak hesaplanmıştır. Fakat lazer deplasman sensörü ile 25, 40 ve 70 cm düşme yükseklikleri için elde edilen çarpma hızları sırası ile 1980, 2440 ve 3320 mm/s olmaktadır. Görüldüğü üzere teorik ve gerçek çarpma hızları arasında yaklaşık %10'luk bir fark bulunmaktadır. Öte yandan, Zwick standart test cihazındaki sabit yükleme hızları 200, 500 ve 1000 mm/dak'ya karşılık olarak 3.33, 8.33 ve 16.66 mm/s olarak hesaplanmaktadır.

Burada düşük ve yüksek gerinim hızlarındaki gerilme-gerinme eğrileri verilirken gerinim hızları yerine, Zwick test cihazı ile yapılan düşük hızlardaki testler için sabit yükleme hızları ve kurulan düşme test düzeneği ile yüksek hızlarda yapılan testler için başlangıç çarpma hızları mm/s birimi ile verilerek karşılaştırılmıştır. Öte yandan gerinim hızı hesaplanırken denklem 3.4 ve 3.5 kullanılır.

$$\varepsilon(t) = \frac{L_0 - L(t)}{L_0} \quad (3.4)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{L_0 - L(t)}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL(t)}{dt} = \frac{V(t)}{L_0} \quad (3.5)$$

Burada bilindiği üzere ε gerinme, L_0 numunenin ilk boyu ve $L(t)$ ise numunenin t anındaki boyunu tanımlamaktadır. $\dot{\varepsilon}(t)$ ise gerinim hızına karşılık gelir ve birimi s^{-1} dir. $V(t)$ ise t anındaki hızı karşılık gelir. Zwick standart çekme testi cihazında sabit hızda yükleme yapıldığından, gerinim hızı sabittir. Fakat düşme test düzeneğinde serbest düşmeye bırakılan kütlenin strafor numuneye çarpması ve sıkıştırması süresince gerinim hızı değişmektedir.

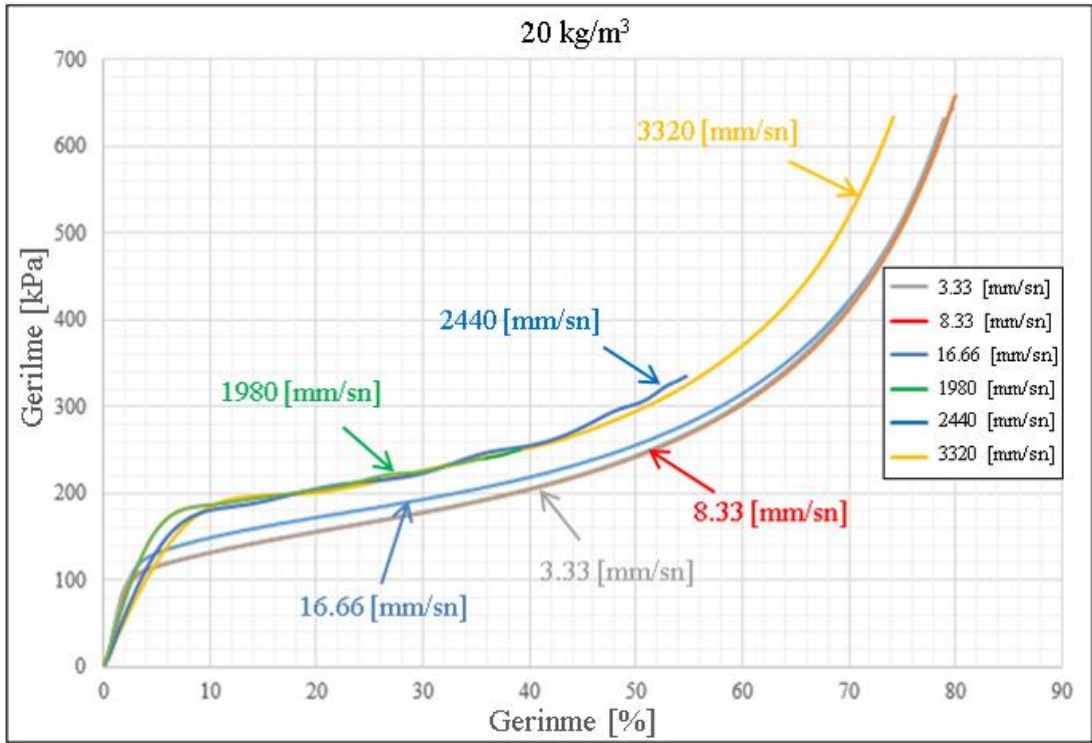
Yukarıda elde edilen veriler değerlendirildiğinde, köpük malzemeye ait mekanik özellikleri belirten gerilme-gerinme eğrisi elde edilebilir. Gerilme ve gerinme değerleri hesaplanırken denklem 3.6 ve 3.7 kullanılır.

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{S_0} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.7)$$

Burada, F malzeme üzerine etkiyen kuvvet, S_0 başlangıç kesit alanı, Δl deformasyon miktarı ve l_0 malzemenin başlangıç boyunu ifade etmektedir. Köpük numunelere ait başlangıç kesit alanı $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ve başlangıç yüksekliği 50 mm 'dir. Ölçüm cihazından ve yukarıda yer alan denklemlerde 3.6 ve 3.7 kullanarak elde ettiğimiz gerilme-gerinme değerleri, mühendislik gerilme ve gerinmesine karşılık gelmektedir.

Farklı yoğunluktaki köpük malzemelere ait gerilme-gerinme diyagramının elde edilmesinin ardından, sonuçlar sunulmuştur. Çalışma kapsamında düşme testleri gerçekleştirilen ankastre bulaşık makinasının paketleme malzemesi olarak da kullanılan 20 kg/m^3 yoğunluktaki köpük malzemeye ait farklı hızlardaki gerilme - gerinme eğrisi Şekil 3.33'de verilmiştir.

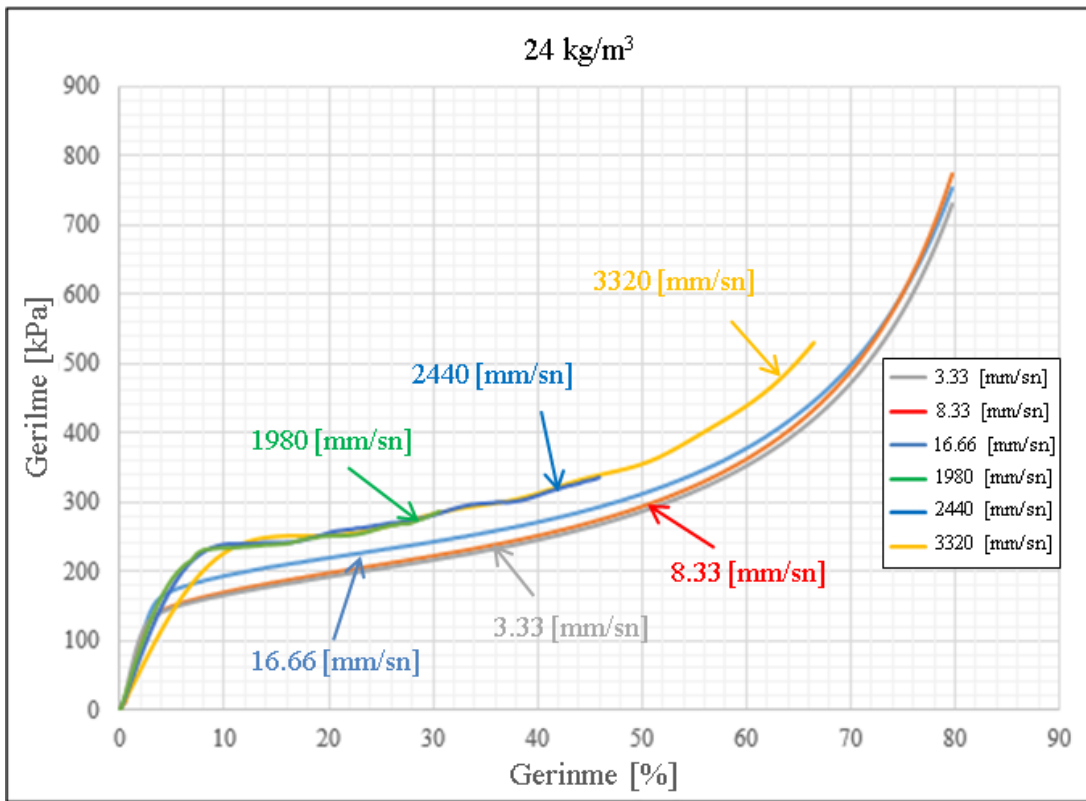


Şekil 3.33 : Yoğunluğu 20 kg/m^3 olan malzeme için farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.

Şekil 3.33'de de görüldüğü üzere düşük ve yüksek hızlardaki mekanik özellikler birbirinden oldukça farklıdır. Düşük yükleme hızları kendi aralarında kıyaslandığında mekanik özelliklerinin oldukça benzer olduğu görülmektedir. Benzer şekilde yüksek çarpma hızlarındaki mekanik özellikler de kendi aralarında benzerlik göstermektedir. Gerçekleştirilen düşme testleri açısından önemli bir sonuç, 25, 40 ve 70 cm'den kütle bırakılarak yapılan düşme testleri için elde edilen 1980, 2440 ve 3320 mm/s çarpma hızlarındaki mekanik özelliklerin birbirine oldukça yakın

olmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında da birbirine yakın gerinim hızlarında mekanik özelliklerde önemli bir fark görülmemesine rağmen, gerinim hızının on veya daha fazla kat artması neticesinde mekanik özelliklerde önemli farklılıklar görülmektedir [7]. Ayrıca, Şekil 3.33'te de görüldüğü üzere, farklı düşme hızlarında yapılan testler, farklı gerinme aralıklarında testlerin yapılmasına fırsat vermektedir ve düşme hızı arttıkça daha yüksek gerinim değerlerine ulaşabilmektedir.

Aynı şekilde 24 kg/m^3 yoğunluktaki köpük malzemeye ait farklı hızlardaki gerilme-gerinme eğrileri aşağıda, Şekil 3.34'de verilmiştir.

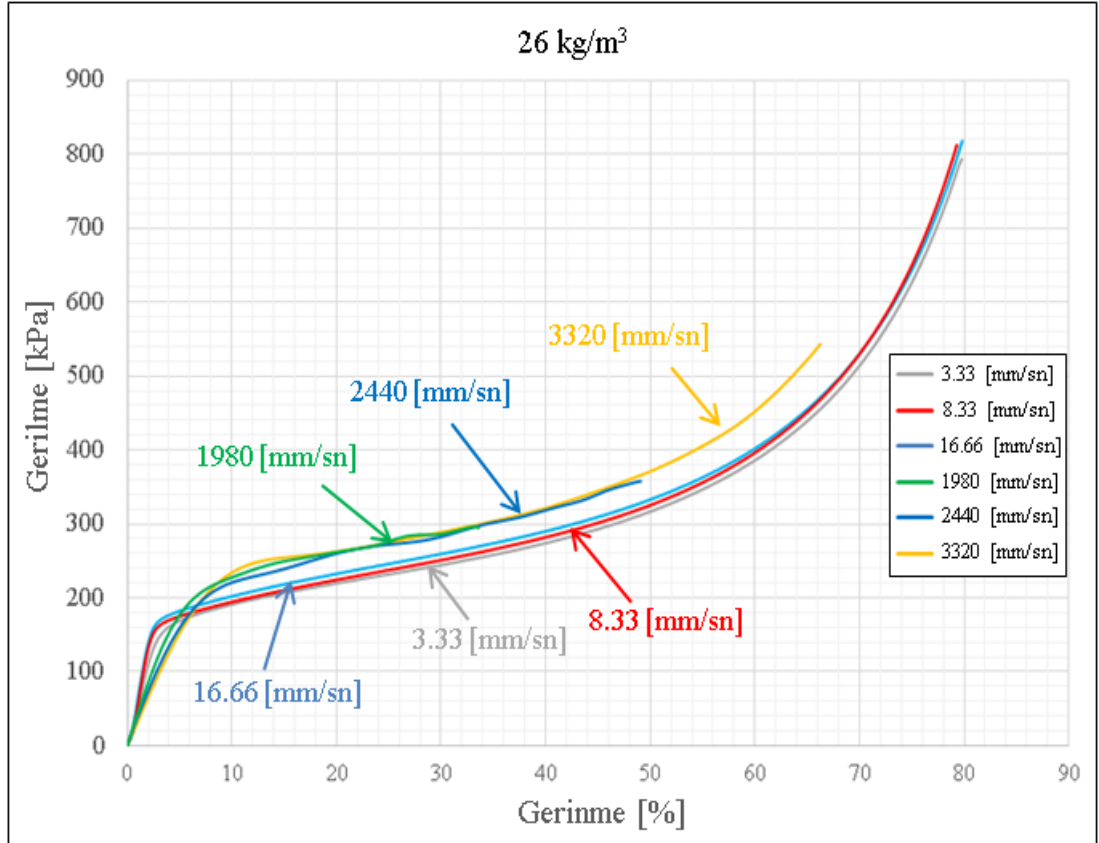


Şekil 3.34 : Yoğunluğu 24 kg/m^3 olan malzeme için farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.

Şekil 3.34 incelendiğinde, 24 kg/m^3 yoğunluktaki köpük malzemenin daha önce Şekil 3.33'te verilen 20 kg/m^3 yoğunluktaki köpük malzeme ile benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Fakat 24 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numunesi için, aynı gerinme değerlerine karşılık gelen gerilme değerleri 20 kg/m^3 yoğunluktaki numuneye göre daha büyüktür. Bu da yoğunluğun malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisini göstermektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere yoğunluğun artması neticesinde köpük malzemeler üzerinde oluşan gerilme değerleri büyümekte yani malzeme daha

rijit bir hal almaktadır. 24 kg/m^3 yoğunluktaki köpükler çalışma kapsamında düşme analizi yapılan ankastre bulaşık makinasında kullanılmamaktadır. Fakat Arçelik A.Ş. bünyesinde üretimi gerçekleştirilen diğer ürünlerde kullanılmaktadır. Bunun için bu malzemeye ait özelliklerin belirlenmesi, farklı ürün gruplarında yapılacak diğer çalışmalara kaynak oluşturmaktadır. Aynı şekilde 26 ve 30 kg/m^3 'lük köpükler için de bu durum geçerlidir.

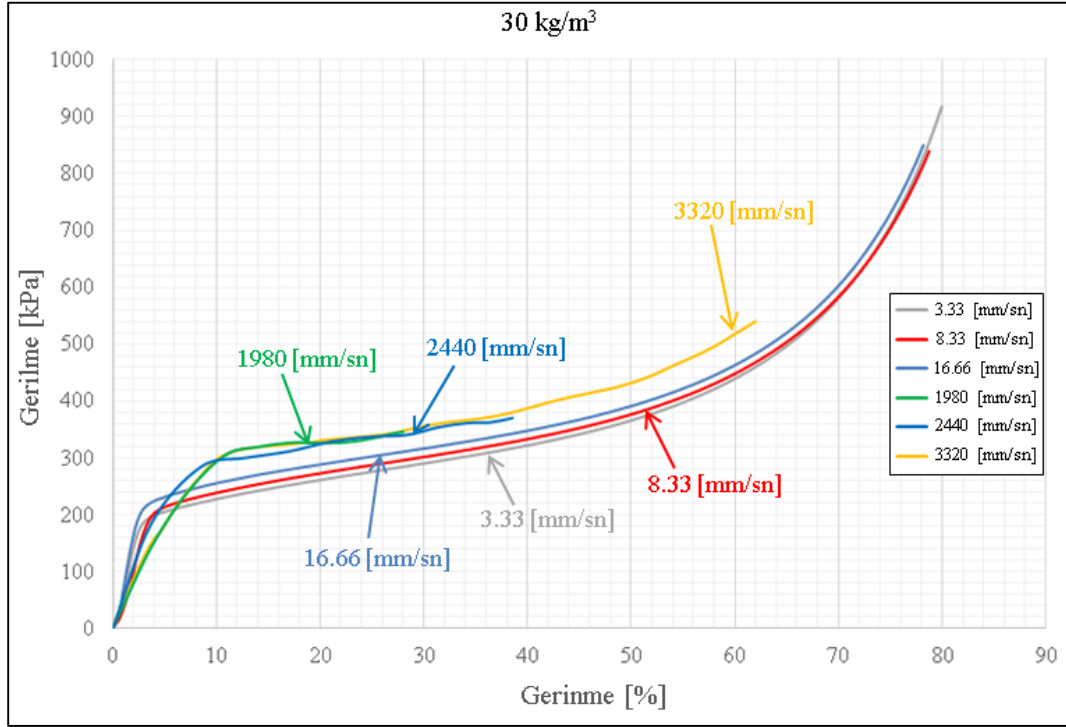
Şekil 3.35'te 26 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numunelere ait gerilme-gerinme eğrisi verilmektedir. Buna göre 26 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numunede aynı gerinim değerine karşılık gelen gerilme değeri 20 ve 24 kg/m^3 'lük numunelere göre daha büyüktür. Gerilme-gerinme eğrisine ait karakteristik özellikler bu numunede de görülmektedir.



Şekil 3.35 : Yoğunluğu 26 kg/m^3 olan malzeme için farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.

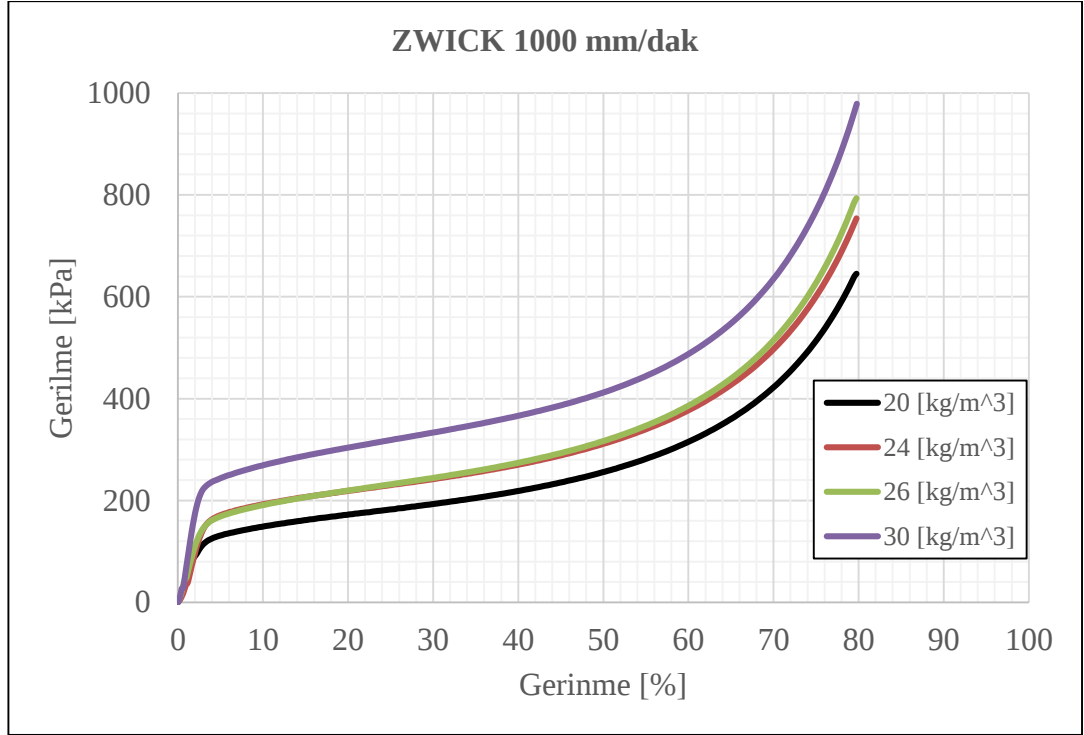
Son olarak 30 kg/m^3 yoğunluktaki numunelere ait mekanik özellikler verilmektedir. 30 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numuneler diğer numunelere göre daha rijit bir yapıdadır. Ayrıca 30 kg/m^3 yoğunluktaki köpük numunelerin diğerlerine oranla maksimum gerinme miktarı daha azdır.

Malzemelerin mekanik özelliklerinin gösteren eğrilere bakıldığında %5-8 gerinimlere kadar olan bölgede lineer kabul edilebilir bir bölge görülmektedir. Lineer bölge içerisinde farklı yoğunluktaki köpük numunelere ait elastik özellikler sabit bir elastik modülü E ile belirlenebilir. Buna göre yoğunluğa bağlı olarak elastik modül değerlerinin arttığı da görülmektedir. Ayrıca gerilme-gerinme eğrilerinde %5-60 gerinme arasındaki plato bölgesi de açıkça görülmektedir. Plato bölgesi içerisinde gerilme değerlerindeki artışın diğer lineer ve yoğunlaşma bölgelerine göre oldukça az olduğu görülmektedir. Son olarak mekanik özellikleri gösteren eğrilerde en sağ kısımda yer alan yoğunlaşma bölgesi, lineer bölgedeki davranışa biraz benzer bir yapıda, gerilme değerlerindeki ani artış ile görülmektedir. Şekil 3.36'da 30 kg/m^3 yoğunluktaki numunenin mekanik özellikleri gösteren gerilme-gerinme eğrisi görülmektedir.



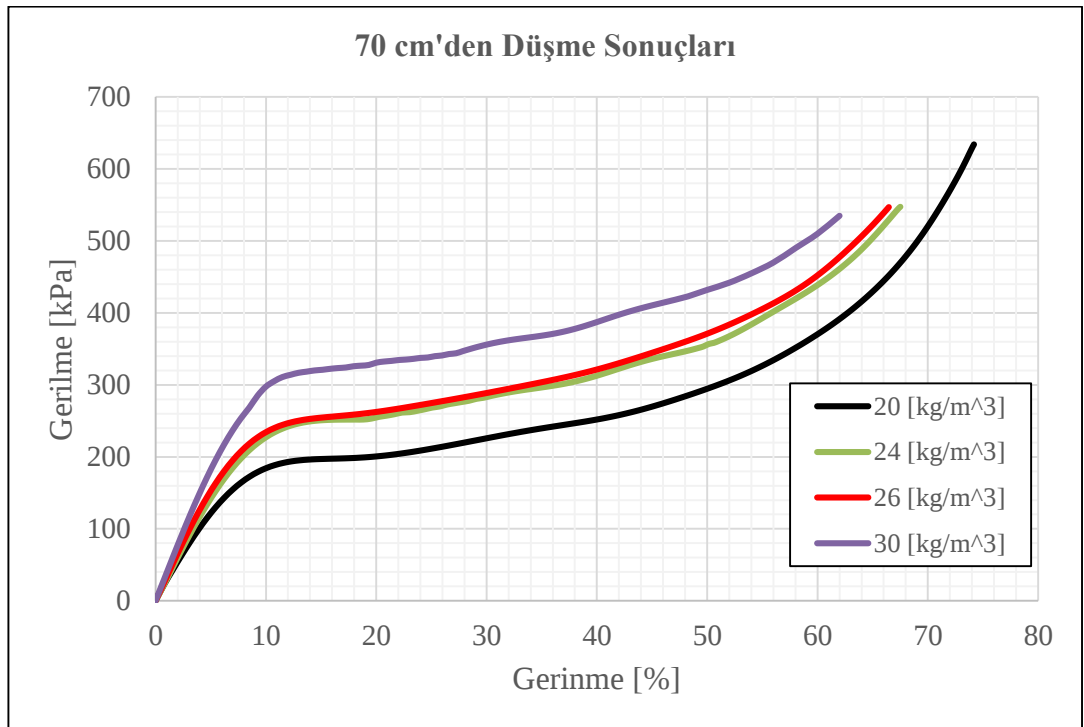
Şekil 3.36 : Yoğunluğu 30 kg/m^3 olan malzeme için farklı hızlardaki gerilme-gerinme davranışı.

Öncesinde de açıklandığı üzere köpük malzemelerin mekanik özellikleri yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Buna göre aynı yükleme veya çarpma hızlarında, farklı yoğunluktaki malzemelere ait gerilme-gerinme eğrisi incelendiğinde, yoğunluğun malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi daha açık bir biçimde görülmektedir. Şekil 3.37'de Zwick çekme test cihazı ile 1000 mm/dak yükleme hızında farklı yoğunluktaki numunelere ait gerilme-gerinme eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.37 : 1000 mm/dak hızda farklı yoğunluktaki numunelere ait gerilme-gerinme davranışı.

Ayrıca 70 cm yükseklikten, yüksek çarpma hızlarında yapılan testlerde, yoğunluğun malzemenin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 3.38’de görülmektedir.



Şekil 3.38 : Köpük malzemenin 70 cm yükseklikten yapılan düşme testlerinin, yoğunluğa bağlı gerilme-gerinme davranışı.

4. DÜŞME TESTİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

4.1 Sonlu Eleman Metodolojisi

Günümüzde bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ve buna bağlı olarak gelişmekte olan mühendislik yazılımları ile birlikte, çalışmalar daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Test metoduna dayalı çalışmaların süre ve maliyetlerinin yüksek olması, bilgisayar destekli bu yazılımları kullanım ihtiyacını önemli ölçüde artırmaktadır.

Endüstride de kullanımı oldukça yaygın ve popüler olan bilgisayar destekli mühendislik araçlarından biri de sonlu elemanlar yazılımlarıdır. Sonlu elemanlar metodu ile oldukça karmaşık mühendislik problemleri daha basite indirgenerek, kabul edilebilir bir yaklaşım çerçevesinde sayısal olarak çözümlenebilmektedir. Bu yöntemde farklı boyut ve tipteki elemanlar kullanılarak, yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulmaktadır. Elemanlar düğüm noktası diye adlandırılan noktalar yardımı ile tanımlanmakta ve çok sayıda eleman kullanımı yapının farklı bölgelerinin modellenmesine imkan vermektedir. Ele alınan problemin basitleştirilmesi ile kesin sonuç yerine yaklaşık sonuç elde edilebilmekte fakat daha ayrıntılı bir modelleme ile kesin sonuca da yaklaşılabilmektedir. İlk kez 1950’li yıllarda uçak gövdesinde oluşan gerilmeleri analiz etmek için kullanılmaya başlanan bu metod, daha sonraki yıllarda mühendisliğin çeşitli alanlarındaki problemlere uygulanabilir hale getirilmiştir [35]. Sonlu elemanlar metodu, yapısal analiz problemlerinin yanında, akışkanlar mekaniği, ısı iletimi ve manyetik alanlar gibi farklı mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılmaktadır. Farklı mühendislik disiplinlerindeki problemlere ait diferansiyel denklemler arasındaki bu benzerlik, problemin yaygın olarak kullanımına olanak tanımaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, malzeme özellikleri araştırılan köpük malzemenin, basit düşme testi düzeneğinden elde edilen veriler kullanılarak, sonlu elemanlar modelinde kullanılacak malzemenin özellikleri belirlenmiş olacaktır. Endüstrideki uygulamalar açısından en kririk noktalardan biri, oluşturulan malzeme modelinin,

gerçekteki durumu yeterli doğrulukta simüle edebilmesidir. Bu nedenle malzeme karakterizasyonunun belirlenmesine ve mevcut malzeme modellerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar, sonlu eleman yönteminin gerçek ile uyumunu arttırdığı için oldukça önemlidir.

Bulaşık makinasının düşme testlerinin sayısal olarak modellenmesinden önce, düşme test düzeneği modellenmiş, sonlu elemanlar modeli ile yapılan analiz sonuçlarının deneysel veriler ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Bu çalışma, ileride yapılacak analizlerin güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Aşağıda sunulan bölümde, deneysel yaklaşım ile malzeme özellikleri belirlenen köpük malzemenin, Hyperworks sonlu eleman paket programı içerisinde yer alan Radioss eksplisit çözücüsünde malzeme modelinin oluşturulması ve düşme testinin simülasyonu için gerçekleştirilen aşamalar detaylı olarak verilmiştir.

4.2 Düşme Testi Düzeneğinin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

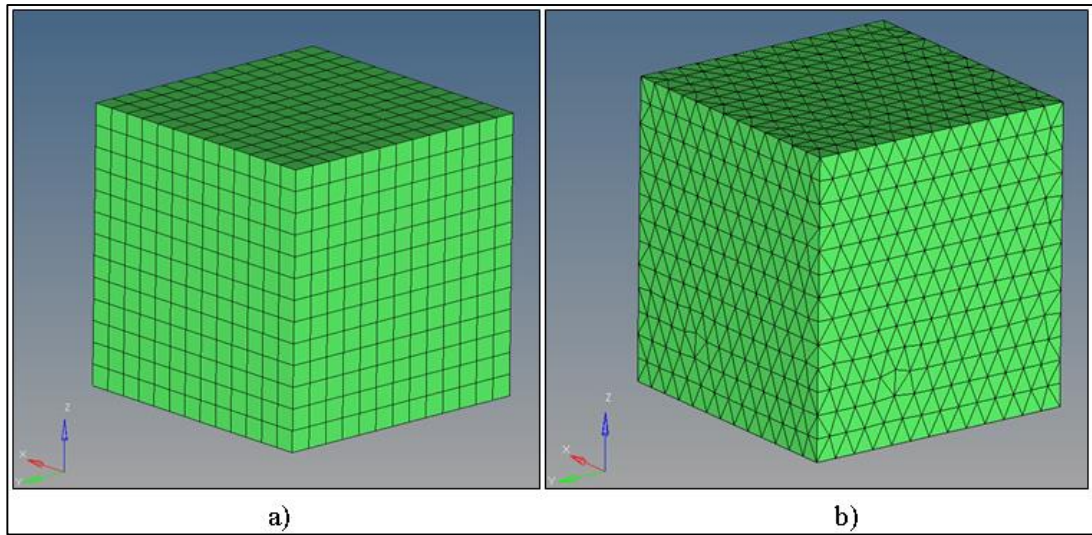
Genleştirilmiş polistrenin malzemenin mekanik (gerilme-gerinme) özelliklerinin belirlenmesi için kurulan basit test düzeneği ve gerçekleştirilen testler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilebilmektedir. Buna göre en genel halde, deneyde kullanılan 50x50x50 mm³ boyutundaki strafor numunesi ve serbest düşmeye bırakılan kütlenin sonlu eleman modeli oluşturularak, belirlenen başlangıç koşulları ve sınır şartları altındaki simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Modelin kurulması için öncelikle sonlu eleman ağı oluşturulacaktır. Sonraki aşamada, sonlu elemanlar modeli içerisinde düşen kütle ile numune ve numune ile zemin arasında temas tanımlanacaktır. Son olarak da deney düzeneğinden elde edilen veriler ve strafor malzemesinin genel mekanik özellikleri göz önüne alınarak, sonlu eleman paket programı içerisinde uygun malzeme modeli seçilerek çözümlemeler yapılacak ve elde edilen analiz sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırılacaktır.

4.2.1 Sonlu eleman modelinin oluşturulması

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması aşamasında öncelikle oluşturulacak model ve elde edilecek çözümlerden hangi çıktıların beklendiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre oluşturulacak model, istenilen tüm verileri yeterli hassasiyette sağlayacak kadar karmaşık ve çözüm süresini minimuma indireyecek kadar basit bir şekilde kurulmalıdır. En genel bakış açısı ile test sisteminde, strafor

numunesi üzerine serbest düşme hareketi yapan bir kütle düşmektedir. Test sistemine ait CAD modeli mevcuttur. Buna göre modelde düşen kütle, kütlelerin yatakladığı kızaklar ve lineer bilyalı yataklar ile strafor numunesinin sonlu elemanlar modeli oluşturulabilir. Fakat burada serbest düşme hareketi yapan kütlelerin yataklanması ve temas algoritmalarının tanımlanması modelin karmaşıklığını ve çözüm süresini artırmaktadır. Bunun yerine sonlu eleman modelinde, herhangi bir yataklama yapılmamış serbest düşmeye bırakılan bir kütlelerin strafor numunesi üzerine düşmesi ve geri sekmesi neticesinde de yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmemiz mümkündür.

Strafor numunesi ait sonlu elemanlar modeli aşağıdaki Şekil 4.1’de görüldüğü gibi üç boyutlu elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Eleman tiplerinin simülasyon sonuçlarına olan etkisinin incelenmesi açısından, strafor numunesi hem üçgen piramit biçimindeki tetrahedral elemanlarla hem de küp şeklindeki hekzahedral elemanlarla modellenmiştir. Burada, tetrahedral elemanlarla da modelleme yapmanın nedeni, ileride bulaşık makinası düşme testleri modellerinde bu eleman tipinin kullanılacak olmasıdır. Eleman boyutları her iki eleman tipi için de yaklaşık olarak aynı değere sahiptir.

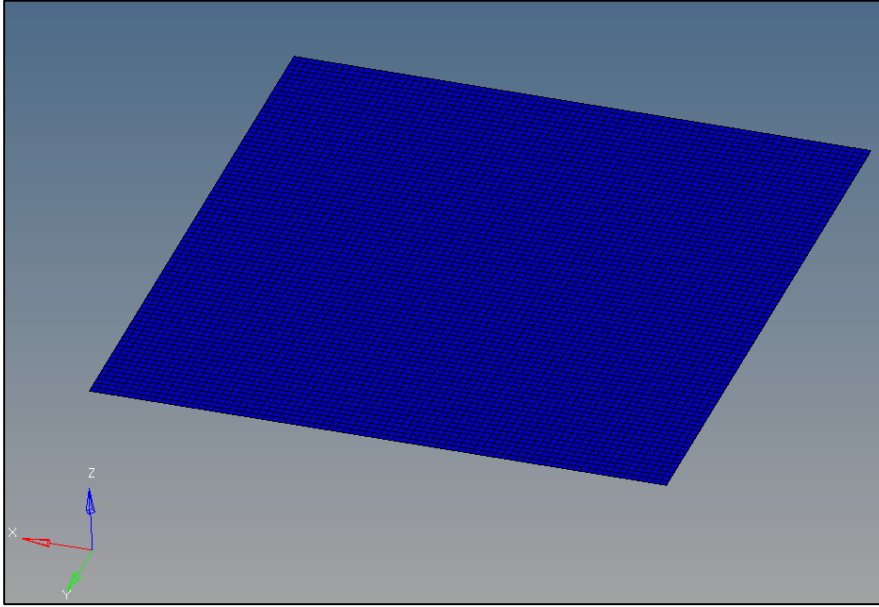


Şekil 4.1 : Strafor numunesinin modellenmesi : (a) Hekza elemanlar. (b) Tetra elemanlar.

Yukarıdaki şekilde görülen hekzahedral elemanlarla modellenmiş strafor numunesinde 2200 eleman bulunurken, tetrahedral elemanlarla modellenmiş modelde 8120 eleman bulunmaktadır. Serbest düşmeye bırakılan kütlelerin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken ise, iki boyutlu dörtgen elemanlar veya üç boyutlu

elemanlar tercih edilebilir. Burada oluşturulan modelde serbest düşen kütle iki boyutlu dörtgen elemanlar ile modellenmiştir. Bunun nedeni sonlu eleman paket programı içerisinde yer alan temas algoritmasında, iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar arasındaki temasın, üç boyutlu elemanlar arasındaki temastan daha yüksek doğruluğa sahip olmasıdır.

Serbest düşmeye bırakılan kütlein basitleştirilerek, dikdörtgen prizma biçiminde olduğu göz önüne alınırsa, orta yüzey tekniği ile modellenebilmektedir. Burada dikdörtgen prizmanın orta yüzeyinden geçen yüzey alınmakta ve iki boyutlu dörtgen elemanlarla modellenmektedir. Burada dörtgen elemanların boyutu olarak 1 mm olarak seçilmiştir. Eleman boyutu, temas yapılacak yüzeyin alanı da dikkate alınarak, temas algoritmasının doğru şekilde çalışabilmesi açısından önemlidir. Şekil 4.2’de düşen kütlein sonlu elemanlar modeli verilmiştir.



Şekil 4.2 : Düşen kütlein sonlu elemanlar modeli.

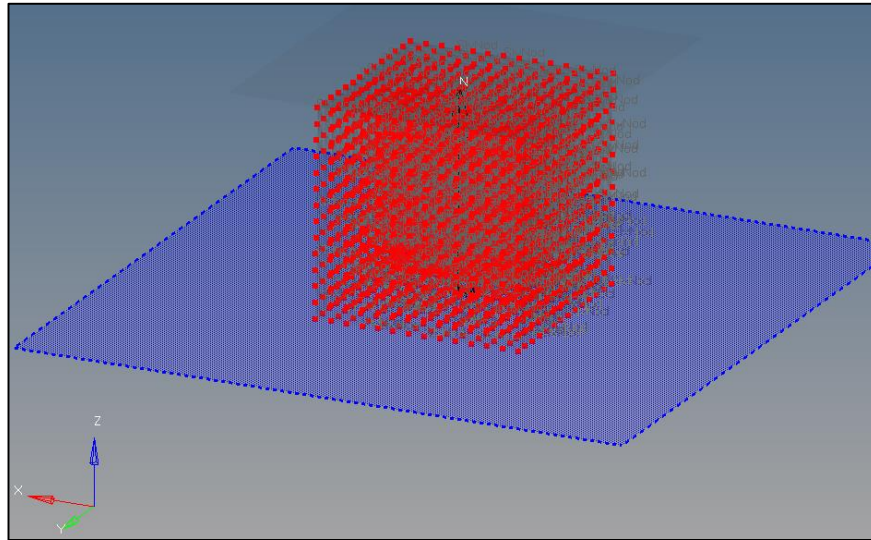
Şekil 4.2’de görülen, düşen kütlein sonlu eleman modelinde toplam 6400 adet dörtgen eleman kullanılmıştır. Daha sonra düşen kütleyle ait et kalınlığı ve malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. Malzeme özellikleri tanımlanırken sonlu eleman paket program içerisinde yer alan elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Malzemeye ait yoğunluk, poisson oranı ve elastik modül değerleri tanımlanmıştır.

Aslında, düşme test düzeneğindeki düşen kütle oldukça rijit bir yapıya sahiptir ve yukarıda belirtilen sayıda eleman kullanılmaksızın da düşme test düzeneği modellenebilir. Ancak ileride çok karmaşık ve esnek bir yapı olan bulaşık makinası

düşen sistem olarak modelleneceğinden, burada da düşen kütle için çok sayıda serbestlik derecesi kullanılması yazılımın denenmesi açısından uygun bulunmuştur.

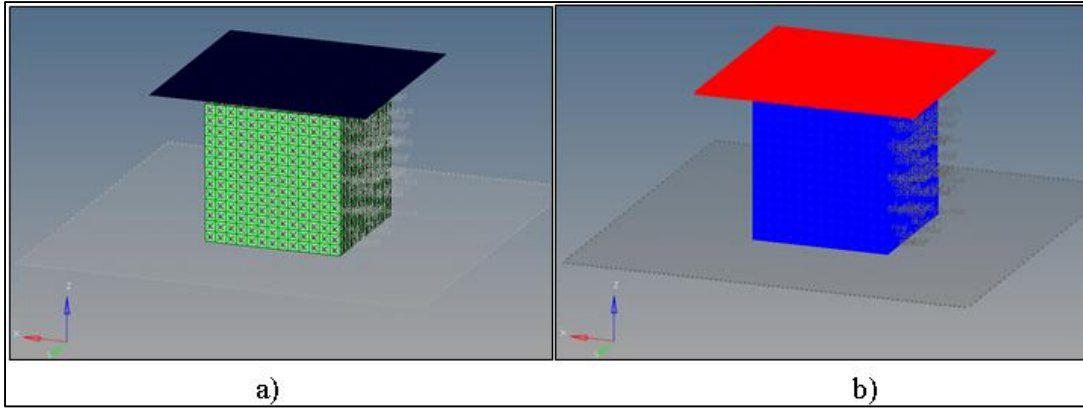
4.2.2 Temas algoritmaları ve başlangıç koşullarının tariflenmesi

Sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra, düşen kütle ile strafor malzemesi ve strafor malzemesi ile zemin arasındaki temas algoritması tanımlanmalıdır. İlk olarak strafor ile zemin arasındaki temasın modellenmesini ele alacak olursak, paket program içerisinde yer alan rijit duvar (RWALL) algoritmasının kullanılması uygun bulunmuştur. Strafor numunesinin alt kısmında bulunan bir düğüm noktası referans alınarak, strafor modelinin tabanına paralel ve sonsuz büyüklükte bir yüzey oluşturulmaktadır. Bu yüzeyin strafor ile teması yine aynı algoritma içerisinde yer alan seçenekler ile belirlenebilmektedir. Aşağıdaki yer alan Şekil 4.3’de rijit yüzey ve temasta bulunduğu strafor modeli görülmektedir.



Şekil 4.3 : Strafor numunesi ile rijit duvar (zemin) teması.

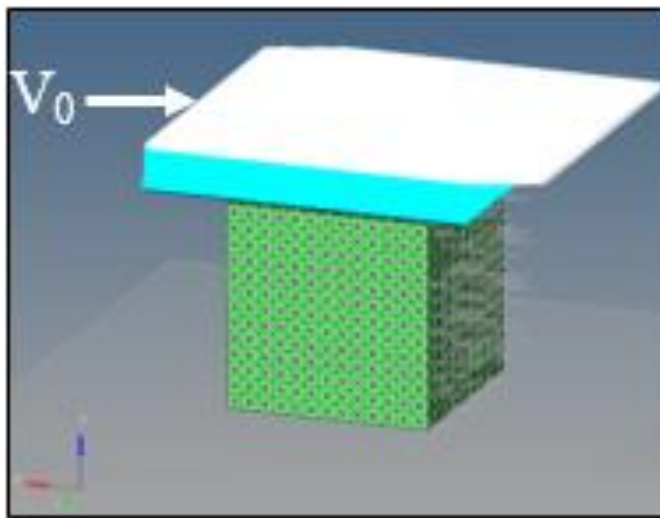
Alt kısımda yer alan rijit zemin tanımlandıktan sonra, düşen kütle ile strafor malzemesi arasındaki temas tanımlanmalıdır. Burada sonlu eleman paket programı içerisinde yer alan Tip 7 temas algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma içerisinde temasa girecek yüzeyler ve karşısındaki düğüm noktaları seçilir. Eleman boyutlarının büyük olduğu model üzerinde temas yüzeyleri, eleman boyutlarının küçük olan modelde ise düğüm noktaları seçilir. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde de benzer şekilde, strafor üzerinde temas yüzeyleri oluşturulurken, düşen kütle üzerinde ise bu temas yüzeyleri ile temas edecek düğüm noktaları seçilir. Temas yüzeyleri ve temas ilişkisi aşağıdaki Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4 : Temas : (a) Yüzeylerin tanımlanması. (b) İlişkinin görüntülenmesi.

Modeldeki bileşenlerin birbiri ile olan temas ilişkileri tanımlandıktan sonra, düşen kütlenin hareketine ait başlangıç koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Düşen kütlenin, 25 cm ve 40 cm yüksekliklerden serbest düşme senaryoları dikkate alındığında, 25 cm yükseklikten serbest düşme için lazer deplasman sensöründen elde edilen çarpma anındaki hız 1980 mm/s, 40 cm yükseklikten için ise 2440 mm/s olarak hesaplanmıştır ve modele tanımlanmıştır.

Sonlu eleman paket programı içerisinde, serbest düşme hareketi yapacak kütlenin, belirlenen yüksekliklerden serbest olarak bırakılması yerine, çarpma anındaki hızı hesaplanarak, numuneye çok yakın bir noktadan hesaplanan bu hız değerinde çarptırılması, çözüm süresi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Strafor numunesine oldukça yakın bir mesafede konumlandırılan düşen kütleye, yukarıda hesaplanan başlangıç koşulları uygulanarak çözümler elde edilmiştir. Başlangıç koşulları uygulanmış sonlu elemanlar modeli aşağıdaki Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5 : Başlangıç koşullarının uygulanması.

4.2.3 Genleştirilmiş polistrenin malzeme modelinin oluşturulması

Genleştirilmiş polistren malzemelerin genel mekanik özellikleri ve mekanik özellikleri etkileyen parametreler Bölüm 2’de detaylı olarak verilmiştir. Bölüm 3’de ise malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kurulan düşme testi düzeneğinin yapısı ve özelliklerinin yanında, test sonuçları başlığı altında, malzemeye ait gerilme-gerinme diyagramları ve gerekli diğer mekanik özellikleri ortaya konulmuştur. Bu tez kapsamında daha önce de vurgulandığı üzere, düşme açısından kritik komponentlerin başında gelen ve düşme anında enerji yutumunu gerçekleştiren paketleme malzemesi genleştirilmiş polistrenin, düşme test düzeneğinden elde edilen mekanik özellikleri, sonlu eleman modeline girilerek genleştirilmiş polistren malzeme için uygun malzeme modeli de oluşturulacaktır.

Genleştirilmiş polistrenin mekanik özellikleri incelendiğinde, sonlu eleman paket programı içerisinde modellenmesi oldukça zor bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sonlu eleman paket programı olarak kullanılan Hyperworks programı içerisinde, darbe, düşme ve çarpışma analizleri için kullanılan ve eksplisit çözücü olarak yer alan Radioss’da, genleştirilmiş polistren malzemelerin modellenmesi amacıyla kullanılabilecek üç adet olası malzeme modeli bulunmaktadır. Bunlar balpeteği malzeme modeli, tablo tanımlı visko-elastik malzeme kartı ve visko-elasto-plastik malzeme modelleridir [33].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, özellikle metal köpük malzemelerin modellenmesinde sıklıkla tercih edilen malzeme modeli, balpeteği malzeme modelidir. Bu model genellikle mikro yapısı bal peteğine benzeyen, sıkıştırılabilir metal köpük malzemelerin modellenmesinde tercih edilmektedir [25].

Tablo tanımlı visko-elastik malzeme modeli ise farklı gerinim hızlarındaki mekanik özelliklerin tanımlanması için oldukça uygun bir model oluşturmasına rağmen, model içerisinde sadece elastik şekil değişiminin modellenenebilir olması önemli bir kısıt oluşturmaktadır [25]. Çalışma kapsamında polimer köpük malzemelerin, plastik deformasyona uğraması sonucu yutulan enerji araştırıldığından, bu modelin kullanımı istenilen verilerin elde edilmesine olanak tanımamaktadır.

Sonlu eleman paket programı içerisindeki visko-elasto-plastik malzeme modeli, polimer köpük malzemelerin modellenmesi için kullanımı en yaygın malzeme modelidir. Bu tez kapsamında da strafor malzemenin modellenmesinde visko-elasto-

plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Adlandırılmasından da anlaşılacağı üzere bu modelin kullanımı ile polimer köpük malzemelerin plastik şekil değişimi bölgesindeki mekanik özellikleri de modellenebilmektedir. Plastik deformasyona uğrayan strafor numunesi, son durumda kalıcı şekil değişimine uğramış biçimde kalmaktadır. Model tanımlanırken, darbe enerjisini yutumlama amacıyla kullanılan düşük yoğunluklu, kapalı hücreli köpük malzemelerin modellenmesinde kullanıldığı belirtilmektedir. Ayrıca, modelin sadece üç boyutlu elemanların malzeme özelliklerini tanımlamak için kullanıldığı da ek olarak ifade edilmektedir [33]. Bu malzeme modelinde, malzemenin gerilme-gerinme eğrisini tablo halinde model içerisine tanımlanmaktadır. Malzeme modeli içerisinde gerilme-gerinme eğrisi tanımlanırken dikkat edilmesi gereken nokta, gerinme değerleri çekme durumunda pozitif, basma durumunda negatif olarak tanımlanmalıdır. Fakat gerilme değerleri her iki durum için de pozitif olarak alınmalıdır [33]. Ayrıca gerilme-gerinme eğrisi tanımlanırken, deney sonuçlarından elde edilen mühendislik eğrisi doğrudan kullanılmaktadır. Malzemenin akma gerilmesi sonrasında bulunan plastik bölgedeki mekanik özellikleri tanımlanırken, malzemeye ait gerilme-gerinme eğrisinin malzeme modeline girilmesi yerine, A,B ve C akma katsayısı parametreleri ve γ hacimsel deformasyon katsayısına bağlı ifade de kullanılabilir [33]. Bu ifade aşağıdaki şekilde verilmektedir.

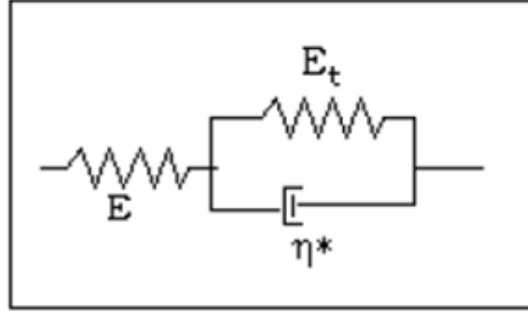
$$\sigma_y = A + B. (1 + C\gamma) \quad (4.1)$$

Öte yandan köpük malzemenin elastik ve plastik bölgedeki davranışı, kart içerisine girilen gerilme-gerinme eğrisi ile daha doğru bir modelleme gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da düşme testi düzeneğinden elde edilen gerilme-gerinme diyagramı, visko-elasto-plastik malzeme modeli içerisine tanımlanmıştır.

Visko-elasto-plastik malzeme modelinde malzemeye ait gerilme değerleri hesaplanırken, literatürdeki Maxvell-Kelvin-Voigt modeli esas alınmaktadır [25]. Buna göre modele ait denklem aşağıda verilmiştir.

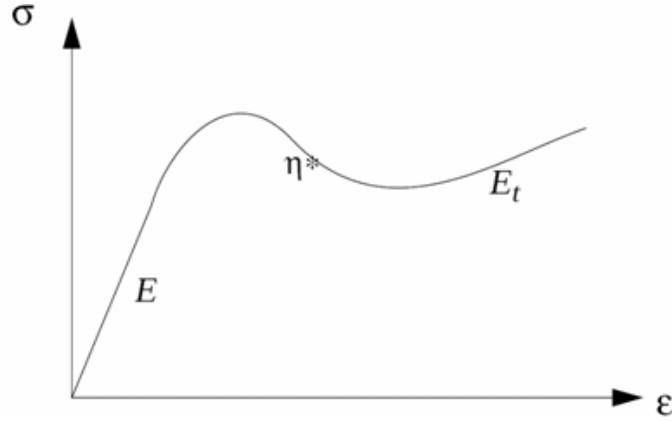
$$\sigma_{ij}^s(t + \Delta t) = \sigma_{ij}^s(t) + \left(E \dot{\varepsilon}_{ij} - \left(\frac{E + E_t}{\eta} \sigma_{ij}^s(t) \right) + \frac{E E_t}{\eta} \varepsilon_{ij} \right) \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

Burada σ_{ij}^s gerilme tensörü, $\dot{\epsilon}_{ij}$ gerinim hızını ve η sönüm katsayısını tariflemektedir. Bu malzeme modeline ait diyagram aşağıda Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Maxwell-Kelvin-Voigt malzeme modeli [25].

Şekil üzerinde yer alan parametreler E elastik modül, η* basma durumundaki sönüm katsayısı ve E_t tanjant modülü olarak tanımlanmıştır. Burada yer alan şematik gösterim, gerilme-gerinme diyagramında aşağıdaki Şekil 4.7'deki eğride olduğu gibi de gösterilebilmektedir.



Şekil 4.7 : Malzemeye ait gerilme-gerinme diyagramı [33].

Genleştirilmiş köpük malzemelerin enerji yutum özelliklerinin, granülleri içerisinde bulunan hava ile sağlandığı bilinmektedir. Visko-elasto-plastik malzeme kartı ile köpük malzemeler içerisindeki hava oranı tanımlanabilmektedir [25]. Bu tanımlama hacimsel deformasyon ve basınç ilişkisi göz önüne alınarak aşağıdaki eşitlik ile belirlidir.

$$P_{hava} = -\frac{P_0 \cdot \gamma}{1 + \gamma - \Phi} \quad (4.3)$$

$$\gamma = \frac{V}{V_0} - 1 + \gamma_0 \quad (4.4)$$

Burada, γ_0 başlangıçtaki hacimsel büyüklük, P_0 başlangıçtaki hava basıncı, Φ gözeneklilik oranı, γ son durumdaki hacimsel deformasyon, V son durumdaki hacim ve V_0 ilk durumdaki hacmi tanımlamaktadır [25]. Radioss eksplisit çözücüsünde, visko-elasto-plastik malzeme kartı içerisinde mühendislik gerilmesi ve mühendislik gerinmesi formülasyonu kullanılmaktadır. Bu ifadeler aşağıdaki şekilde verilmektedir [25].

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{S_0} \quad (4.5)$$

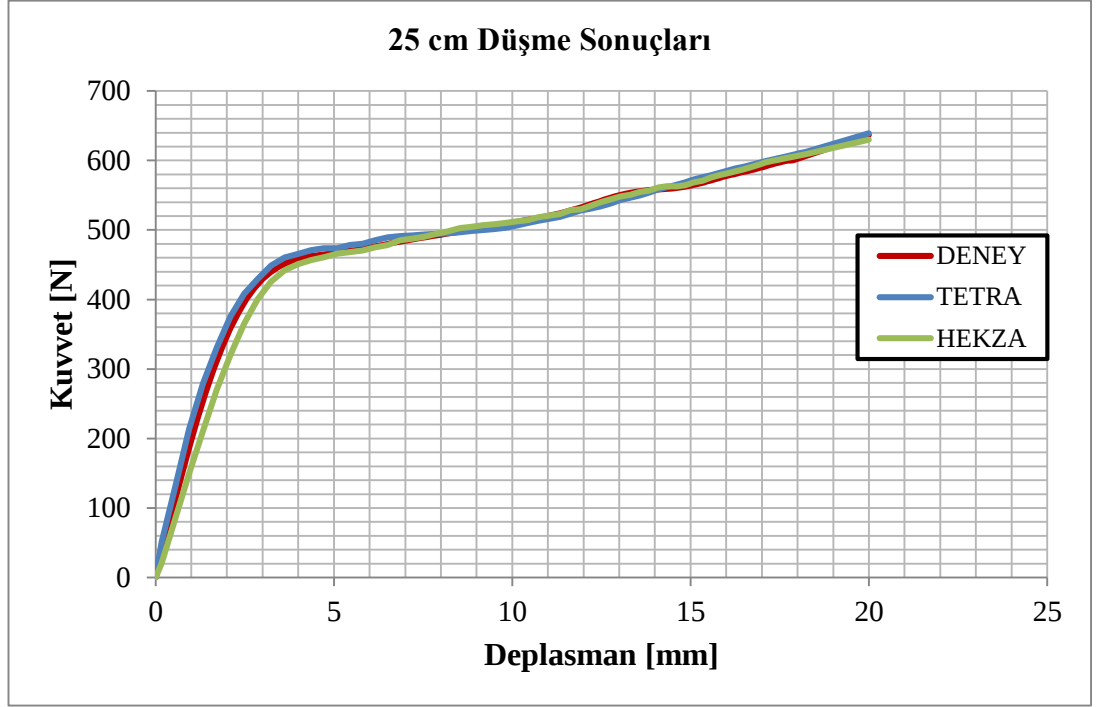
$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.6)$$

Burada, F malzeme üzerine etkiyen kuvvet, S_0 başlangıç kesit alanı, Δl deformasyon miktarı ve l_0 başlangıç boyunu ifade etmektedir. Ölçüm cihazından elde ettiğimiz veriler kullanılarak denklem 4.5 ve 4.6 yardımı ile mühendislik gerilmesi ve gerinmesi hesaplanarak elde edilen eğri visko-elasto-plastik malzeme kartı içerisine tanımlanmıştır. Malzemenin elastik bölgedeki davranışı ise E elastik modülü ile belirlidir. Malzeme kartının deneysel verilerle uyumunu artırmak için P_{hava} , Φ ve η^* parametreleride uygun değerlerde model içerisinde tanımlanmıştır.

4.3 Sonuçlar

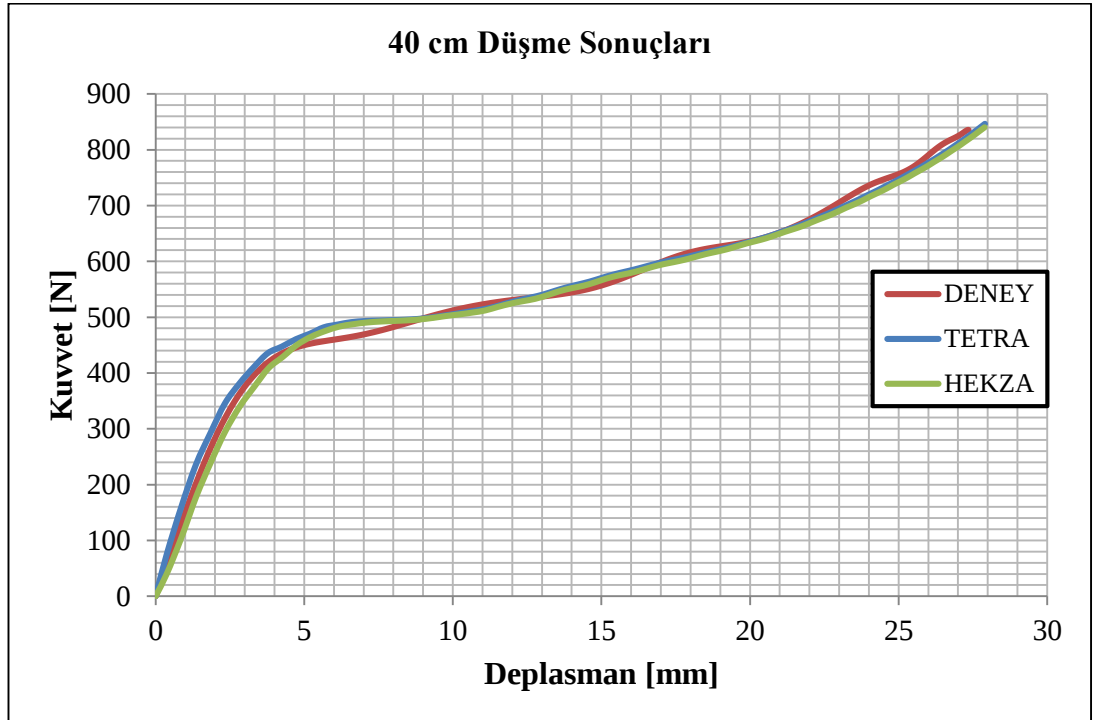
Bu kısımda deneysel veriler kullanılarak elde edilen gerilme-gerinme eğrisinin sayısal model içerisinde tanımlanması neticesinde elde edilen analiz sonuçlarının, deneysel veriler ile uyumu karşılaştırılacaktır. Test düzeneğinin simüle edilmesi ile elde edilen kuvvet-deformasyon değerleri, strafor malzemesi için tanımlanan malzeme modeli ile doğrudan ilişkilidir. Buna göre simülasyon sonucunda elde edilen bu kuvvet-deformasyon sonuçları, deney düzeneğinden elde edilen veriler ile kıyaslanacaktır. Literatürde sonlu eleman malzeme modeli oluşturulması ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında da benzer şekilde sayısal modelden elde edilen kuvvet-deplasman sonuçları, deneysel verilerden elde edilen kuvvet-deplasman verileri ile kıyaslanarak doğrulama yapılmaktadır [13]. Burada yapılan simülasyonlar strafor numunesinin hem hekza hem de tetra üç boyutlu elemanlar ile modellenmesini karşılaştırma imkanı da sunmaktadır. Şekil 4.8’de ankastre bulaşık makinasında kullanılan 20 kg/m^3 yoğunluktaki strafor numunesine ait 25 cm’den

düşme durumunda elde edilen sonuçlar, hem deneysel hem de analiz verileri olarak sunulmuş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 : 20 kg/m³ yoğunluktaki numuneye ait 25 cm'den düşme sonuçları.

Şekil 4.9'da 20 kg/m³ yoğunluktaki strafor numunesine ait 40 cm'den düşme senaryosu sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.9 : 20 kg/m³ yoğunluktaki numuneye ait 40 cm'den düşme sonuçları.

Hem 25 cm'den, hem de 40 cm'den düşürme durumunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde kurulan sonlu eleman modeli ve kullanılan malzeme modelleri ile deneysel sonuçlara oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Hekza ve tetra eleman tiplerine ait sonuçlar da birbiri ile kıyaslandığında yine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde malzeme modeli oluşturulurken genellikle hekza eleman tipi kullanılarak modelleme yapılmaktadır [13-15]. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, ankastre bulaşık makinasına ait sonlu elemanlar modelinde köpük malzemelerin tetra elemanlar kullanılarak modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle her iki eleman tipinin de deneysel verilerle uyumu araştırılmıştır. Burada 40 cm ve 25 cm'den serbest düşme senaryoları için kuvvet-deformasyon eğrileri strafor numunesinin maksimum sıkışma bölgesine kadar incelenmiştir. Düşen kütlenin çarpmadan sonra geri sekmesi esnasında köpük numunesine iletilen kuvvet incelenmemiştir. Sonuçta strafor malzemenin 40 ve 25 cm yüksekliklerden düşme senaryolarına ait malzeme modelleri elde edilmiştir.

5. ANKASTRE BULAŞIK MAKİNASI DÜŞME ANALİZİ

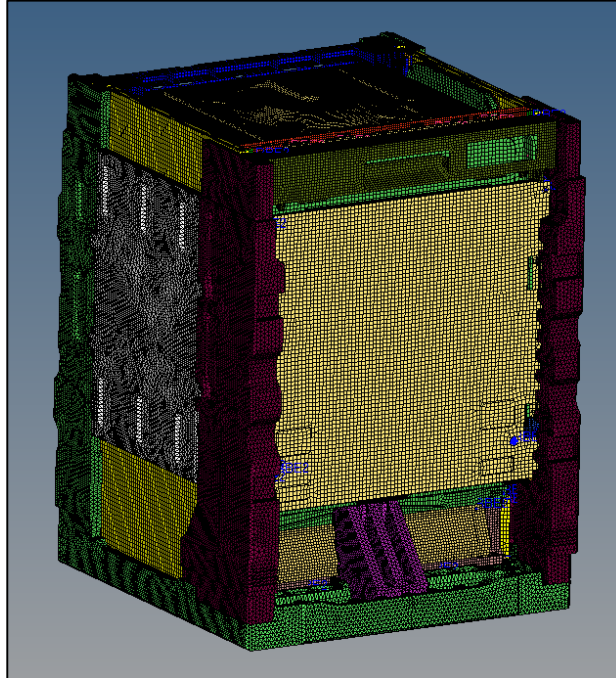
Beyaz eşya endüstrisindeki uygulamalarda, yeni ürünlerin tasarımı ve üretimi veya mevcut ürünlerin iyileştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Bu tasarım ve iyileştirme süreçleri gerçekleştirilirken standartlarda belirtilen kriterlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu aşamada gözönüne alınması gereken kriterlerden biri de düşme testi kriterleridir. Ürün ağırlığına bağlı olarak standartlarda belirtilen düşme testi kriterleri, ürünün nakliyesi esnasında karşılaşılan zarar görme durumlarını engellemek için uygulanmaktadır. Ayrıca ürünün üretim onayı alması için standartlarda belirtilen düşme testi şartlarını sağlaması gerekmektedir.

Endüstride gerçekleştirilen düşme testleri genellikle fabrikanın üretim hattında belirlenen test alanında fiziksel düşme testi cihazları ile yapılmaktadır. Fabrika ortamında yapılan bu fiziksel düşme testleri, müşteriye sunulmak üzere hazırlanmış paketlenmiş haldeki ürünlerin standartlarda belirtilen yüksekliklerden serbest bırakılması sonucu hasar durumunun kontrol edilmesini kapsamaktadır. Fakat gerçekleştirilen fiziksel düşme testlerinde makinanın hasar alan bölgeleri gözden kaçabilmektedir. Ayrıca her bir tasarım ve iyileştirme için farklı makinaların test edilmesi gerektiğinden prototip üretimine bağlı maliyet ve zaman açısından önemli kayıplar yaşanabilmektedir.

Fabrika ortamında gerçekleştirilen fiziksel düşme testlerinin yanında, sonlu eleman yazılımları ile ürünün sayısal olarak modellenmesi ve analizi mümkün olmaktadır. Ürüne ait CAD modeli kullanılarak, sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra standartlarda belirtilen kriterler göz önüne alınarak analizler gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman modelinin yüksek doğrulukta olması, düşme analizi sonucunda daha doğru çıktıların elde edilmesini sağlamaktadır. Sayısal ortamda gerçekleştirilen analizlerde ürünün hasar gören bölgelerinin tespiti daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca her bir tasarım iyileştirmesinin ardından sonlu elemanlar modeli güncellenerek analizlerin tekrar edilmesi ve optimum tasarım sağlanabilmektedir. Düşme testi analizleri ile her bir düşme testi için yeni bir prototip ürünün kullanımına bağlı maliyetler, test maliyetleri ve süre azaltılmaktadır.

5.1 Ankastre Bulaşık Makinasının Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

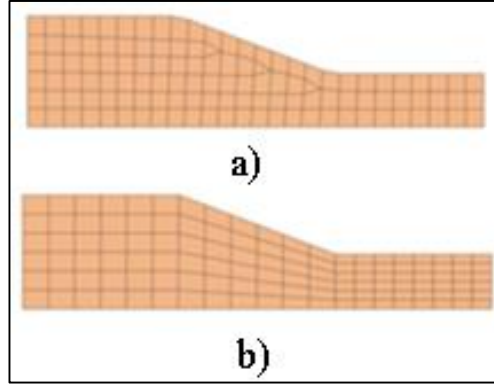
Bu tez kapsamında, ankastre bulaşık makinasının düşme simülasyonu için Hypermesh yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Hazırlanan modelin, fiziksel düşme testlerini doğru olarak simüle edebilmesi için, öncelikle düşme anında darbeye maruz kalan ve enerjiyi yutumlayan paketleme malzemelerinin ve ankastre bulaşık makinasına ait tüm komponentlerin uygun bir biçimde modellenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte makine içerisinde yer alan ve düşme anında atalet kuvvetlerine neden olan parçalar ve bu parçaların bağlantıları uygun biçimde modellenmelidir. Bu nedenle ankastre bulaşık makinasının modellenmesinin oldukça ayrıntılı bir biçimde yapılması gerekmektedir. Öte yandan, Bölüm 2’de detaylı olarak değinilen ve analizin çözüm süresini doğrudan etkileyen zaman adımının uygun değeri, eleman boyutlarının belirli bir değerin altına düşmemesi ile mümkün olmaktadır. Eleman boyutlarının belirli bir değerin üzerinde olması gerektiğinden dolayı, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için gereken süre artmaktadır. Şekil 5.1’de ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 5.1 : Ürüne ait sonlu elemanlar modeli.

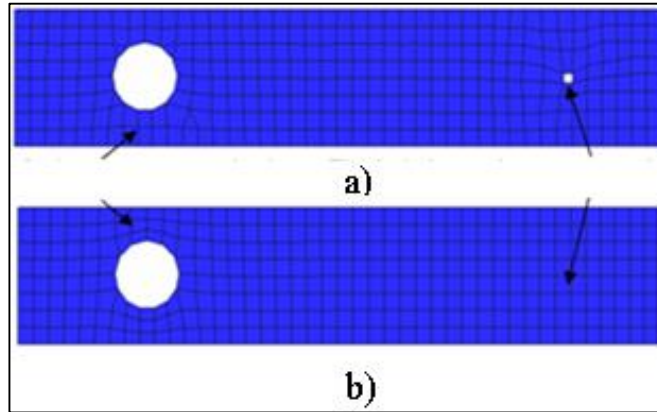
Eksplisit çözücüde ağ modeli oluşturulurken, daha doğru ve hızlı sonuçlar elde edilebilmesi için uyulması gereken bazı kurallar bulunmaktadır. Bunlardan ilki eleman boyutları belirli bir değerin altında olmamalıdır. İmplicit analizlerde üçgen

eleman geçişleri tavsiye edilmezken, eksplisit analizler için bu durum oldukça farklıdır. Bu nedenle daralan kesitlerde eleman boyutlarının belirli bir değerin altına inmemesi için, darbe yönünde üçgen eleman geçişi uygulanması tavsiye edilmektedir [25]. Şekil 5.2’de eleman geçişleri görölmektedir.



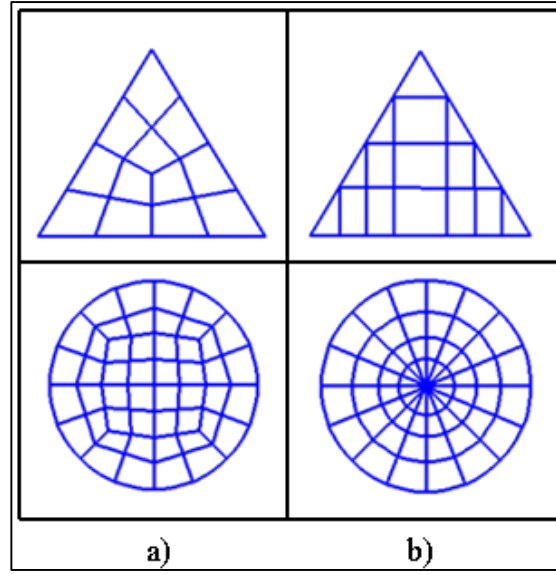
Şekil 5.2 : Eleman geçişi : (a) Eksplisit analiz. (b) İmplicit analiz [25].

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken eleman boyutlarının belirli bir değerin altında olmaması gerekliliğinden dolayı, modelde bulunan oldukça küçük çaptaki deliklerin bu işleme uygun bir hale getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca çözümün doğruluğu için deliklerin çevresinde oluşturulan eleman ağı üçgen eleman içermemeli ve delik ile serbest kenar arasında kalan bölgeler en az üç eleman ile modellenmelidir [25]. Uygun olan ve tavsiye edilmeyen eleman ağı yapıları Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Eleman ağı : (a) Uygun. (b) Tavsiye edilmeyen [25].

Üçgen ve dairesel şekle sahip komponentler modellenirken, üçgen şeklindeki elemanlardan kaçınılmalı ve eleman boyutları eşdeğer olacak şekilde eleman ağı oluşturulmalıdır [33]. Şekil 5.4’de üçgen ve dairesel komponentlere ait uygun ve tavsiye edilmeyen eleman ağı yapıları verilmektedir.



Şekil 5.4 : Eleman ağı : (a) Uygun. (b) Tavsiye edilmeyen [33].

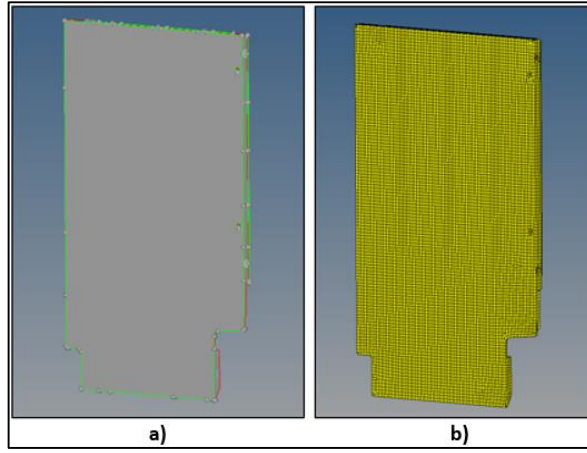
Burada Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te belirtilen kriterler göz önüne alınarak ankastre bulaşık makinasına ait sonlu elemanlar modeli, iç kısımda bulunan sac parçalardan başlanarak oluşturulmuştur. Modelde bulunan temel gruplar, iç ve dış saclar, plastik komponentler, taban grubu ve ambalaj malzemeleri olarak ayrıştırılabilir. Modelde toplamda 706293 adet eleman bulunmaktadır. Verilen bu eleman sayısı bir boyutlu rijit bağlantı elemanları, iki boyutlu dörtgen elemanlar ile üç boyutlu tetra ve hekza elemanları kapsamaktadır. Çizelge 5.1’de sonlu elemanlar modelinde bulunan eleman adeti ve gruplanması gösterilmiştir. Modelde bulunan vida bağlantılarını temsil eden tek boyutlu rijit elemanlar bu çizelgeye dahil edilmemiştir.

Çizelge 5.1 : Ankastre bulaşık makinası modelinde bulunan eleman adetleri.

Grup İsmi	Eleman Adeti
İç ve Dış Saclar	101005
Plastik Komponentler	103979
Taban Grubu	24302
Ambalaj Malzemeleri	414894

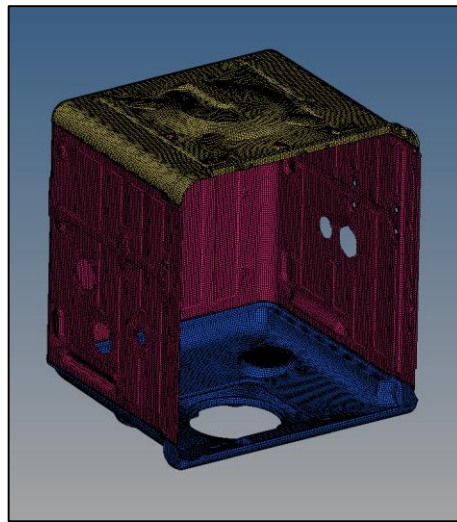
5.1.1 İç ve dış saclar

Ankastre bulaşık makinasına ait sonlu elemanlar modeli, iç ve dış kısımda bulunan sac parçalardan başlanarak oluşturulmuştur. Sac parçalarının et kalınlığının değeri diğer iki boyutuna göre oldukça küçük olduğundan, iki boyutlu olarak modellenebilmektedir. İki boyutlu modelleme için orta yüzey tekniği kullanılarak, parçanın et kalınlığının ortasından geçen bir yüzey oluşturulmakta ve bu yüzey iki boyutlu dörtgen kabuk elemanlar ile modellenmektedir. Bu yöntem ile birlikte parça daha az sayıda eleman ile daha hızlı bir şekilde modellenebilmekte ve çözüm için daha az zamana gerek duyulmaktadır. Şekil 5.5'te dış saclara ait orta yüzey ve sonlu eleman ağı görülmektedir.



Şekil 5.5 : Dış saclar : (a) Orta yüzey. (b) Sonlu Elemanlar Modeli.

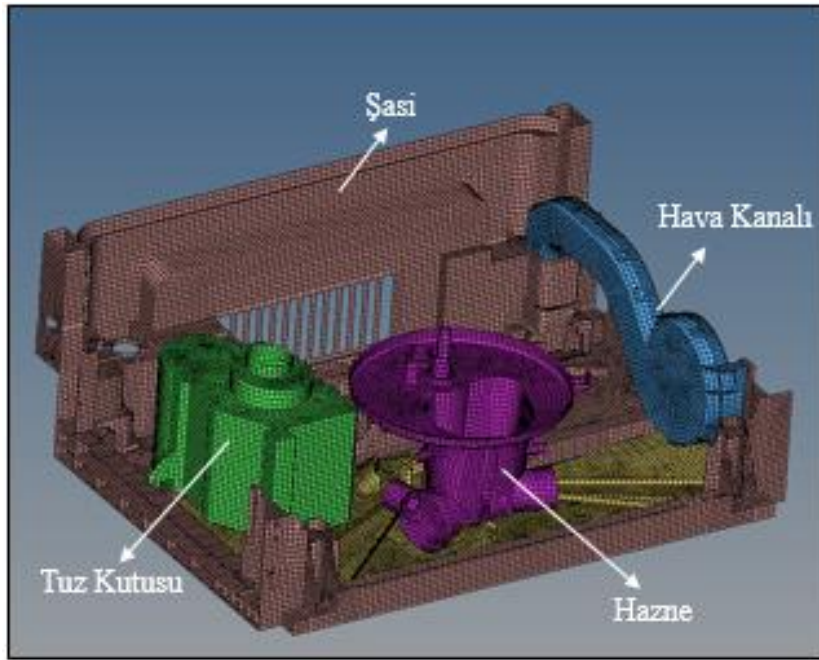
İç kısımda bulunan sacların da aynı şekilde sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. İç saclara ait sonlu elemanlar modeli de Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 : İç saclara ait sonlu elemanlar modeli.

5.1.2 Plastik komponentler

Ankastre bulaşık makinasında, ön pano, şasi, tuz kutusu, hava kanalı, su cebi gibi çeşitli plastik komponentler bulunmaktadır. Bu komponentlerin boyutsal özellikleri sac parçalara benzerlik gösterdiğinden modellemede orta yüzey tekniği kullanılmaktadır. Orta yüzeyler oluşturulurken eleman boyutunun istenilenden daha küçük bir değer almaması için, geometrik bazı sadeleştirilmeler yapılmıştır. Şekil 5.7’de alt şasi, tuz kutusu, su haznesi ve hava kanalı verilmiştir.

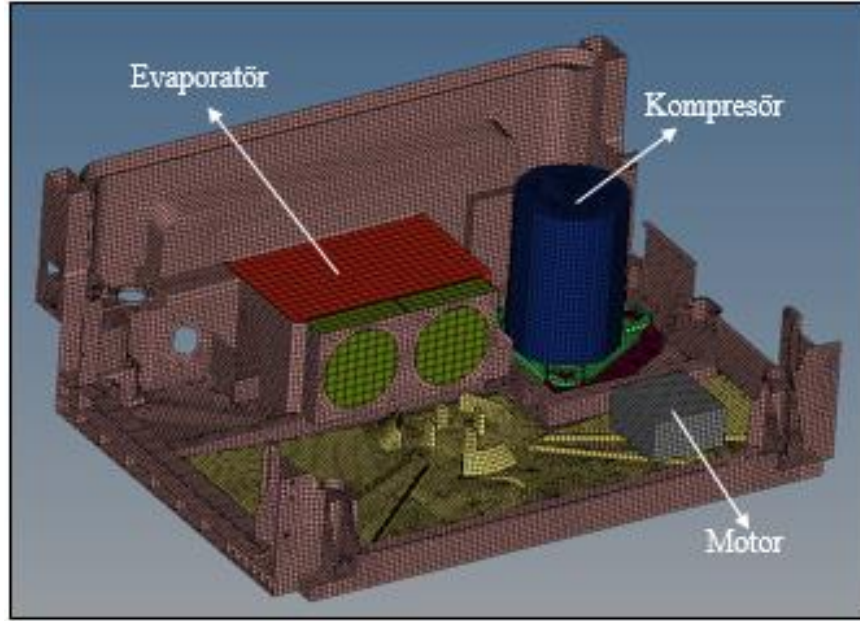


Şekil 5.7 : Plastik komponentler grubu sonlu elemanlar modeli.

5.1.3 Taban grubu

Taban grubu, motor, kompresör ve evaporatörden oluşmaktadır. Ankastre bulaşık makinasının taban bölümünde yer alan bu komponentlerin kütlesi, plastik komponentlere kıyasla oldukça büyük olduğundan, düşme açısından kritik öneme sahiptirler. Çarpma anında taban grubu içerisinde yer alan komponentler üzerinde meydana gelen atalet kuvvetleri, bağlantı noktalarında ve alt kısımda yer alan plastik şasi üzerinde hasara neden olabilmektedir. Bundan dolayı bu komponentlerin kütsel özelliklerini temsil edecek şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Oluşturulan modelde, motor, kompresör ve evaporatör kütsel özellikleri korunup, daha basit bir biçimde modellenerek bağlantı noktalarından sisteme monte edilmiştir. Modellemede üç boyutlu hekza elemanlar kullanılmıştır. Taban grubunda yer alan bu komponentlerin yerleşimi ve model Şekil 5.8’de görülmektedir.

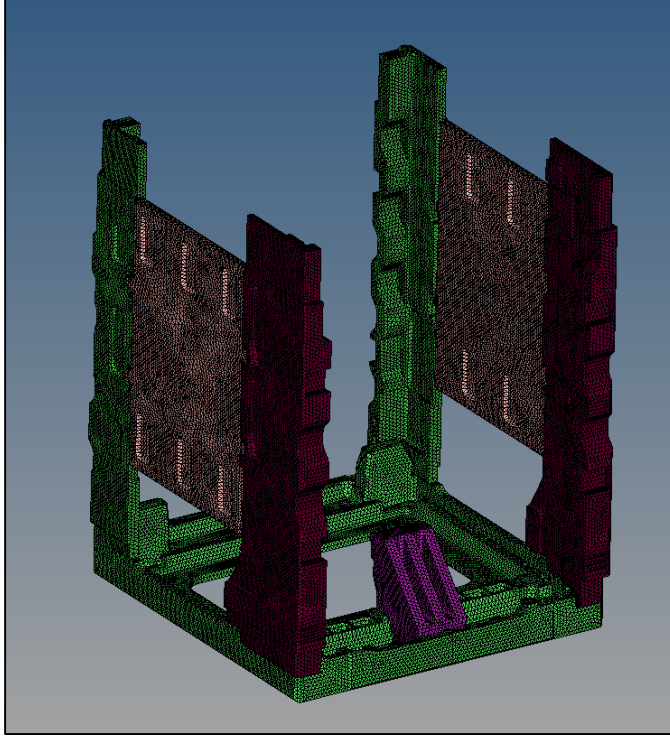


Şekil 5.8 : Taban grubu sonlu elemanlar modeli.

5.1.4 Ambalaj malzemeleri

Ambalaj malzemelerini modellemek için, daha önce Bölüm 4’te de belirtildiği gibi program içerisinde iki farklı eleman çeşidi kullanılabilir. Bunlardan ilki üç boyutlu hekza elemanlardır. Hekza elemanlar ile ambalaj malzemelerinin modellenmesi oldukça zor ve zaman alıcıdır. Hekza elemanlar kullanıldığı takdirde, ambalaj malzemesi geometrisinde önemli derecede sadeleştirmeler yapılması gerekmekte ve bu nedenle ambalaj malzemesi geometrisi gerçek durumdan daha farklı bir hal almakta ve bu sebeple de hatalı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Ambalaj malzemeleri için alternatif diğer eleman çeşidi ise üçgen prizma şeklindeki tetra elemanlardır. Bu elemanlar ile kolayca modelleme yapılabilmekte ve model oluşturmak için daha az zaman harcanmaktadır. Çünkü ambalaj malzemesi geometrisinde daha az sadeleştirme yapılarak analize uygun sonlu elemanlar modeli oluşturulabilmektedir. Fakat bu durumda da sonlu elemanlar modelinde daha fazla sayıda eleman kullanılmakta ve çözüm için gereken süre uzamaktadır. Tetra elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulan ambalaj malzemelerinin makine ile teması tanımlanacağından dolayı eleman boyutları da kritik öneme sahiptir. Makinaya ait komponentlerle temas ilişkisinin doğru bir biçimde tanımlanabilmesi için eleman boyutlarının belirli bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Şekil 5.9’da ambalaj malzemelerine ait sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



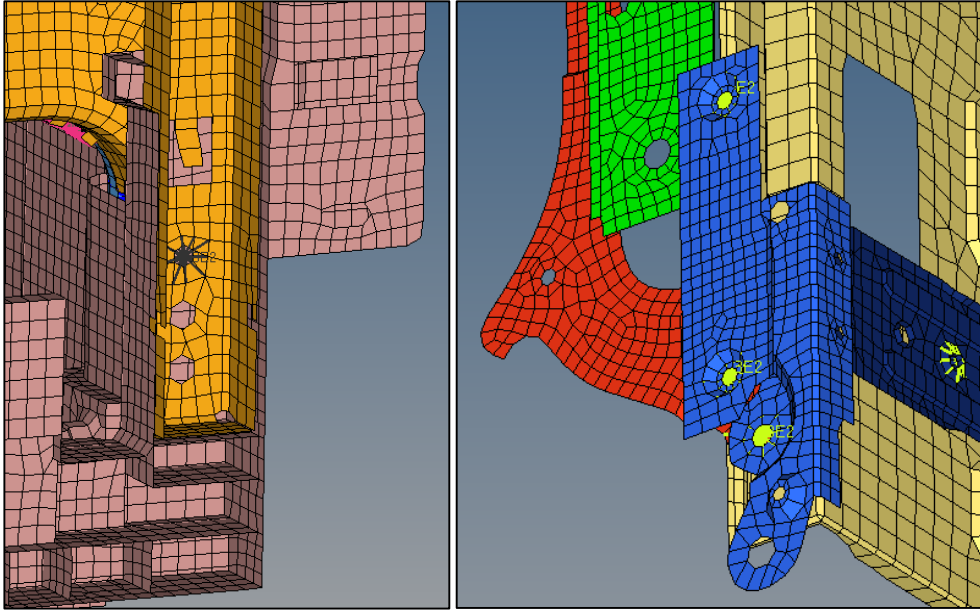
Şekil 5.9 : Ambalaj malzemelerinin sonlu elemanlar modeli.

5.2 Temas, Bağlantı ve Başlangıç Koşullarının Tanımlanması

Ankastre bulaşık makinası componentlerinin sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra, makinanın gerçekte olduğu biçimde montajının yapılması gereklidir. Bu aşamada birbiri ile montaj ilişkisi içerisinde olan parçalar ve montaj bölgeleri tespit edilmiştir.

İlk aşamada, birbirine vida ile monte edilen componentler ele alınmıştır. Vida bağlantıları, hazırlanan ağ modelinde tek boyutlu rijit elemanlar ile modellenmiştir. Birbirine vida bağlantısı ile monte edilen iki componentin bağlantı bölgelerinde bulunan düğüm noktaları, araya yerleştirilen ortak bir noda, rijit elemanlar yardımı ile bağlanmaktadır. Bu durumda bağlantı bölgesindeki elemanlar kinematik olarak aynı hareketi yapmaktadır. Bu sayede vida bağlantıları oldukça kısa sürede, daha az eleman kullanılarak ve daha kolay bir biçimde yapılabilmektedir. Fakat, gerçek fiziksel düşme testlerindeki çarpma anında vidalarda ve bağlantı bölgelerinde meydana gelen deformasyon ve kuvvet iletiminin etkisi, sadece rijit elemanlar kullanılarak tam olarak modellenememektedir. Bunun nedeni, vida bağlantısı yapılan componentlerin, düşme anındaki kuvvetlerin etkisi ile girişim yapmasıdır. Gerçekte, vida bağlantılarının bulunduğu bölgelerde, montaj ilişkisi içerisinde bulunan

komponentler arasında aynı zamanda temas da söz konusudur. Bu bakımdan, olası bir deformasyon neticesinde, montaj haldeki parçaların birbiri içerisine girişim yapması durumu ortaya çıkabilmektedir. Analiz sonucunda hatalara neden olabilecek bu durumu engellemek ve modelin doğruluğunu artırmak için, vida bağlantısı ile birbirine monte edilen parçalar arasında aynı zamanda bağlantı bölgesini kapsayacak biçimde temas da tanımlanmaktadır. Bu sayede bağlantı bölgesindeki girişimler önlenerek, vida bağlantıları gerçek duruma daha uygun bir şekilde simüle edilmiş olmaktadır. Radioss eksplisit çözücüsü içerisinde temas bölgeleri tanımlanırken Tip 7 seçeneği kullanılır. Aşağıda yer alan Şekil 5.10'da vida bağlantısına ait görsel sunulmuştur.



Şekil 5.10 : Vida bağlantı bölgeleri.

Ankastre bulaşık makinasında kullanılan diğer bağlantı şekli de kaynaktır. Özellikle iç kısımda yer alan sac parçaların ve üst kısımda yer alan metal kirişlerin bağlantıları kaynak kullanılarak yapılmaktadır. Bu bağlantıların sonlu eleman modelinde tanımlanması için de Radioss eksplisit çözücüsü içerisinde yer alan Tip 2 bağlantısı kullanılmaktadır. Kaynak bağlantısı modellenirken, birbirine kaynak yapılan yüzeylerdeki elemanlar seçilmekte ve aralarındaki mesafe bağlantının oluşması için gerekli aralıkta olmalıdır. Bağlantı bölgesindeki elemanların girişim yapması veya Tip 2 bağlantısı içerisinde belirlenen değerden büyük olması durumunda, kaynak bağlantısı modellenememektedir. Bu durumda kaynak bağlantı bölgesinde yer alan elemanların, bağlantıya uygun bir hale getirilmesi gerekmektedir.

Öte yandan, düşme analizinin diğer bir önemli noktası ise başlangıç koşullarının tanımlanmasıdır. Başlangıç koşulu olarak, daha önce Bölüm 1’de de belirtildiği gibi standartlarda verilen 25 cm’den düşme ve zorlayıcı koşul olarak belirlenen 40 cm’den düşme durumlarının simüle edilmesi amaçlanmaktadır. Buna göre ankastre bulaşık makinasının hazırlanan sonlu elemanlar modeli, yukarıda belirtilen başlangıç koşullarına uygun olarak hareketine başlamalıdır. Burada 25 cm ve 40 cm yüksekliklerinden serbest düşmeye bırakılan bir cismin, çarpma anında sahip olduğu maksimum hız teorik olarak hesaplanarak, başlangıç şartı olarak tanımlanmaktadır. Ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli rijit zeminden keyfi ve olabildiğince küçük bir yüksekliğe yerleştirilmiştir. Bu sayede oldukça az bir mesafeden, çarpma anında ulaşacağı maksimum hız ile hareketine başlayan ankastre bulaşık makinası, kısa sürede zemin ile temas edecek ve geri sekmeye maruz kalacaktır. Bunun sonucu olarak çözüm süresi önemli ölçüde azalacaktır. Eğer sonlu elemanlar modeli gerçekte olduğu gibi 25 cm veya 40 cm yükseklikten serbest düşme hareketi yapacak şekilde simüle edilirse, çözüm süresi oldukça artacaktır. Çünkü bu durumda, modelin serbest düşmeye bırakılan yükseklikten, zemine kadar olan yolu alması ve çarpıp geri sekmesi için gereken çözüm süresi daha uzun olacaktır.

Başlangıç koşulları tanımlanırken, modele ait tüm elemanlara başlangıç hızı verilmektedir. Bu model için 25 cm ve 40 cm yükseklikten serbest düşme durumlarında sırası ile 2215 mm/s ve 2800 mm/s hız büyüklükleri tanımlanmıştır.

5.3 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Ürüne ait sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra komponentlere ait malzeme özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Bunun için öncelikle komponentlere ait malzeme bilgileri gereklidir. Burada ürüne ait komponentlerden düşme esnasında plastik şekil değişimine uğraması muhtemel alt plastik şasi, iç ve dış saclar gibi komponentlerin elastik ve plastik özellikleri doğru bir biçimde modellenmelidir. Öte yandan ankastre bulaşık makinesi içerisinde yer alan motor, evaporatör ve kompresör gibi düşme anında atalet kuvvetlerine neden olabilecek fakat üzerinde herhangi bir plastik deformasyon beklenmeyen komponentler elastik olarak modellenmiştir. Hypermesh yazılımı içerisinde yer alan Radioss çözücüsünde tüm bu malzemeleri modellemeye uygun farklı malzeme modelleri bulunmaktadır. Aşağıda, ankastre

bulaşık makinası modelinde kullanılacak malzeme modelleri ve bu modellere ait özellikler detaylı olarak verilecektir. Düşme açısından kritik öneme sahip ambalaj malzemelerine ait malzeme modeli ise Bölüm 4’de detaylı olarak verildiğinden bu bölümde sadece özetlenecektir.

5.3.1 Johnson-Cook malzeme modeli

Johnson ve Cook adlı iki bilim adamı tarafından geliştirilen bu malzeme modeli, yüksek miktardaki plastik deformasyonlar, çarpışmalar ve patlamaları modellemeye uygun yapıdadır. Literatürde izotropik malzemelerin modellenmesinde en çok kullanılan yaklaşımlardan biri Johnson-Cook malzeme modelidir. Ayrıca bu malzeme modeli iki ve üç boyutlu eleman tipleri ile de uyumludur. Malzeme modeli içerisinde gerinim hızı, pekleşme (hardening) ve sıcaklık değişimlerinin etkisi de modellenebilmektedir [25].

Ankastre bulaşık makinasının sonlu eleman modelinde yer alan sac parçalar için bu malzeme kartı kullanılmıştır. Bu sayede sac parçalarda meydana gelen gerilmeler, plastik deformasyon miktarı ve şekil değiştirme enerjisi hesaplanabilmektedir. Malzeme modeline ait matematiksel ifade aşağıda yer alan denklem 5.1’de verilmektedir. Buna göre akma gerilmesi üzerinde yüklenen malzeme üzerinde oluşan gerilmeler aşağıdaki denklem 5.1 esas alınarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma = [\sigma_a + b\varepsilon_p^n] \left[1 + \left(c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - T^m] \quad (5.1)$$

Burada verilen ifadedeki σ_a akma gerilmesine karşılık gelip çekme deneyinden elde edilmekte ve gerçek gerilme değerine dönüştürülerek kullanılmaktadır. İfadede yer alan b ve c katsayıları sırası ile pekleşme modülünü ve gerinim hızı katsayısını belirtmektedir. ε_p plastik şekil değiştirme miktarını ve n pekleşme üstelini tanımlamaktadır. $\dot{\varepsilon}$ gerinim hızını ve $\dot{\varepsilon}_0$ referans gerinim hızına karşılık gelir. Referans gerinim hızının altındaki değerlerde, gerinim hızı etkisi hesaba katılmamaktadır [25]. Malzeme modelinde sıcaklık etkisini modellemek için m katsayısı tanımlanmaktadır. Formülasyonda $[\sigma_a + b\varepsilon_p^n]$ terimi pekleşme durumunu göz önünde bulundurarak malzemenin elasto-plastik özelliklerini modellemektedir. $\left[1 + \left(c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]$ terimi gerinim hızının ve $[1 - T^m]$ terimi de sıcaklığın malzemenin mekanik özelliklerine olan etkilerini modellemektedir. Ankastre bulaşık makinesine

ait sonlu elemanlar modelinde, bulunan paslanmaz çelik sacların malzeme özellikleri literatürde bulunmaktadır [36,37]. Ankastre bulaşık makinasında iç kısımda bulunan alt, yan ve üst sacların malzemesi 430, dış kısımda bulunan sac ise 304 paslanmaz çeliktir. Buna göre 304 ve 430 paslanmaz çelik malzemelere ait katsayılar Çizelge 5.2’de verilmektedir. Çizelge 5.2’de yer almayan parametreler için ise malzeme modeli içerisinde bulunan öntanımlı değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.2 : 304 ve 430 sacı için Johnson-Cook malzeme parametreleri [36,37].

	304 Sacı	430 Sacı
Yoğunluk	7,78 e-09 t/mm ³	7,8 e-09 t/mm ³
Elastiklik Modülü	210000 MPa	210000 MPa
Poisson Oranı	0,300	0,300
σ_a	292 MPa	247 MPa
b	1012	440
n	0,820	0,446

5.3.2 Elastik malzeme modeli

Ankastre bulaşık makinasında yer alan metal saclar, plastik parçalar ve ambalaj malzemeleri dışında kalan komponentlerin malzeme özelliklerinin tanımlanmasında elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model malzemelere ait plastik şekil değişimi bölgesindeki deformasyon özelliklerini modellememektedir. Bu nedenle, model içerisinde plastik şekil değişimi özellikleri araştırılmayan ve sadece kütle özelliklerinin tanımlanması amaçlanan motor, evaporator, kompresörün modellenmesinde elastik malzeme modeli kullanılmıştır.

Elastik malzeme modeli, lineer elastik bölge içerisinde yani akma sınırına kadar deforme olan malzemeleri doğru bir biçimde modellerken, akma sınırı üzerinde yüklenen ve plastik deformasyona uğrayan malzemeler için hatalı sonuçlar verir. Radioss eksplisit çözücüsünde yer alan en basit malzeme modeli olan bu model

izotropik malzemelerin modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Hazırlanan modelde, motor, evaporator, kompresörün üzerinde oluşacak plastik deformasyondan ziyade bu komponentlerin çarpma anındaki kütsel özelliklerinden kaynaklı atalet kuvvetleri önem arz etmektedir. Daha önce de değinildiği üzere basitleştirilmiş sonlu eleman modelleri oluşturulan bu komponentlerin, gerçek kütlelerinin elde edilebilmesi için, kart içerisine gerçek değerlerinden bir miktar farklı yoğunluk değerleri girilmiştir.

5.3.3 Elasto-Plastik malzeme modeli

Elasto-plastik malzeme modeli Hyperworks programı içerisinde yer alan Radioss çözücüsünde izotropik malzemelerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan diğer bir malzeme modelidir [38]. Bu malzeme modeli deneysel verilerin tablo şeklinde girildiği elasto-plastik davranış modellemede tercih edilmektedir. Bu model içerisinde malzemenin elastik bölgedeki davranış E elastik modülü girilerek tanımlanır. Aynı şekilde ν poisson oranı da model içerisinde tanımlanmaktadır. Öte yandan malzemenin plastik bölgedeki davranışını modellemek için deneysel veriler tablo halinde model içerisine girilmektedir. Malzemenin hasar bölgesi tanımlanırken, malzemenin hasara başladığı gerinim değeri EPS_{maks} kart içerisinde tanımlanmalıdır [25]. Öte yandan bu malzeme modeli için gerçek gerilme-gerinme eğrilerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu durumda mühendislik değerlerinin gerçek değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Gerçek gerilme ve gerçek gerinmenin hesaplanmasında aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır [25].

$$\epsilon_{gerçek} = \ln(1 + \epsilon_{müh}) \quad (5.2)$$

$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{müh}(1 + \epsilon_{müh}) \quad (5.3)$$

Burada verilen ifadelerde, $\sigma_{müh}$ ve $\epsilon_{müh}$ sırası ile mühendislik gerilmesi ve gerinmesini tanımlamaktadır. $\sigma_{gerçek}$ ve $\epsilon_{gerçek}$ ise gerçek gerilme ve gerinmeye karşılık gelmektedir.

Elasto-plastik malzeme modeli ankastre bulaşık makinasında bulunan plastik komponentlerin malzeme özelliklerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bu malzeme modeli sadece iki boyutlu elemanlara uyumluluk göstermektedir. Ankastre bulaşık makinasındaki alt şasi, ön pano, tuzluk, hazne gibi komponentlerin malzeme

modellemesinde bu model kullanılmıştır. Ankastre bulaşık makinasında kullanılan plastik malzemeler Arçelik A.Ş. bünyesinde geliştirilen ve Polyar olarak da adlandırılan CaCO_3 katkılı polipropilen ve ABS plastik malzemelerdir. Özellikle makinanın alt konumda bulunmasından dolayı düşme açısından kritik öneme sahip şasinin malzemesi polyar detaylı olarak modellenmiştir.

5.4 Analiz Sonuçları

Ankastre bulaşık makinasının standartlarda belirtilen düşme yüksekliği 25 cm olarak verilmiştir. Yani makinanın 25 cm yükseklikteki testlerden geçmesi üretim onayı için yeterlidir. Öte yandan 40 cm yükseklikten düşme testlerinde makinanın hasar görmesi durumu ürünün üretim onayını etkilememekle birlikte, 40 cm yükseklikten düşmelere karşı dayanıklı olup olmadığı ve buna paralel olarak bir optimizasyona gerek duyulup duyulmadığı araştırılmıştır. Buna göre analizler, öncelikle 25 cm'den düz düşme ve kenarları üzerine 10° açılı düşme durumları için gerçekleştirilmiştir. Ardından aynı şekilde 40cm'den düz düşme ve kenarları üzerine 10° açılı düşme durumları için de analizler yapılmıştır.

Analiz sonuçları değerlendirilirken komponentler üzerinde oluşan gerilme değerleri incelenmiştir. Komponentler üzerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımına bakılarak komponentlerin plastik şekil değişimine uğrayıp uğramadıkları yorumlanabilir. Maksimum şekil değiştirme enerjisi kriteri olarak da adlandırılan Von Mises gerilmesi malzemenin çok eksenli gerilme halindeki eşdeğer gerilmesine karşılık gelir. Buna göre çok eksenli yükleme durumunda oluşan eşdeğer gerilme, malzemenin akma gerilmesini aştığında o noktada plastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Bu kriter sünek malzemelerin akması için yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir [25]. Çok eksenli gerilme durumunda Von Mises gerilmesi aşağıda verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5.4)$$

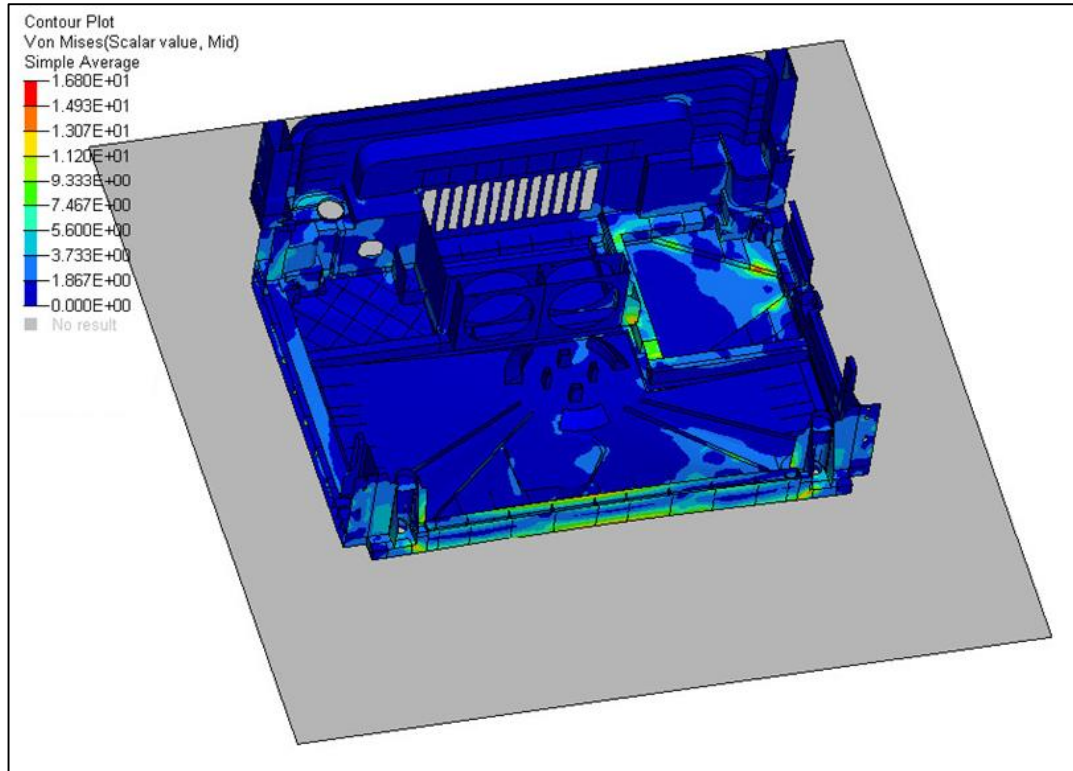
Yukarıdaki denklemde verilen ifade üç eksenli yükleme durumu için geçerli en genel ifadeyi göstermektedir. Burada yer alan σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmelere karşılık gelmektedir. Öte yandan iki boyutlu yükleme durumu için ise denklem 5.5 kullanılır.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (5.5)$$

Von Mises gerilmesi, hidrostatik gerilme durumunda şekil değişimine uğramayacağı varsayılan metal malzemeler için oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir. Fakat plastik ve köpük malzemeler için aynı durum geçerli olmayabilmektedir.

5.4.1 25 cm yükseklikten düşme analizi sonuçları

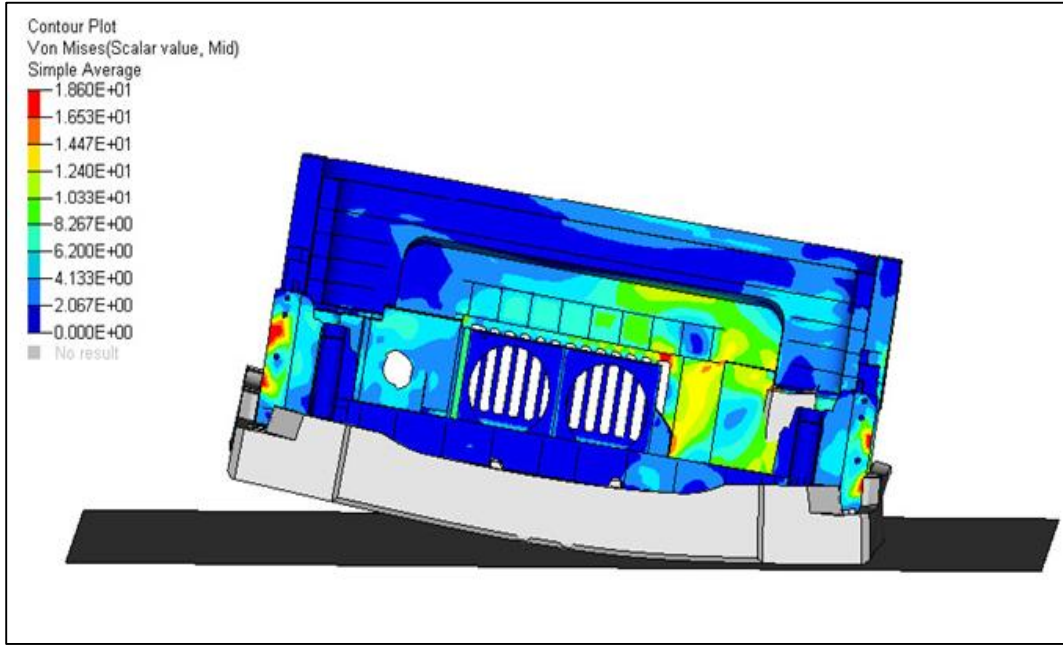
Bu bölümde makinanın 25 cm yükseklikten düşme analizi yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Burada öncelikle düşme durumunda darbe kuvvetlerine maruz kalan alt plastik şasi ve sac parçalardan imal edilen komponentler incelenmiştir. Ayrıca paketlenme malzemesi olarak kullanılan strafor üzerinde oluşan gerilme dağılımı ve deformasyon miktarı da belirlenmiştir. 25cm yükseklikten düz düşme durumunda alt kısımda bulunan plastik şasi üzerinde oluşan maksimum gerilmenin 16.8 MPa olduğu görülmüştür. Şasi malzemesi olarak kullanılan polyar malzemenin akma dayanımı 21 MPa olduğundan dolayı, şasinin hasara uğraması beklenmemektedir. 25 cm yükseklikten düz düşme sonucunda alt şasi de oluşan gerilme dağılımı Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11 : 25 cm yükseklikten düz düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.

Yukarıda yer alan Şekil 5.11’de alt şaside yüksek gerilme oluşan bölgenin kompresörün şasiye bağlandığı nokta olduğu görülmüştür. Ayrıca ön kısımda makinanın devrilmesini engellemek için yerleştirilen straforun şasi üzerinde zorlanmaya neden olduğu da görülmektedir. Fakat düşme sonucu strafor takoz nedeniyle şasiye iletilen kuvvetler şasi üzerinde bir hasara yol açmamaktadır. Açılı düşme durumlarında ön kısımda bulunan bu strafor takozun etkisi görülmemektedir.

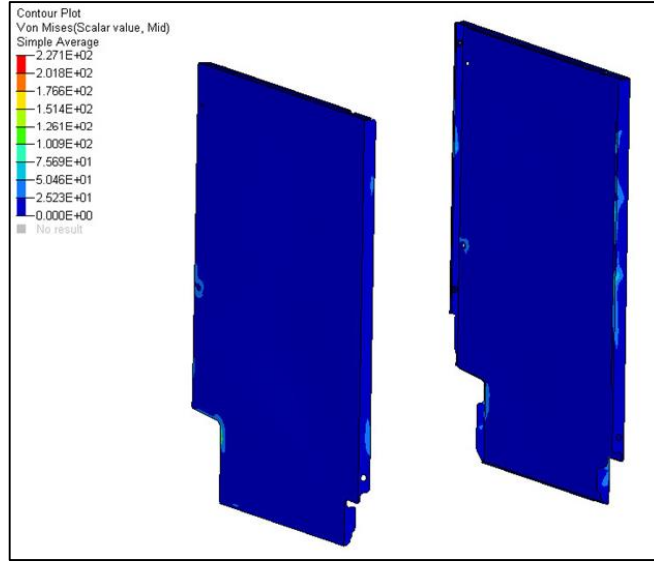
25 cm yükseklikten kenarları üzerine 10° açılı düşme durumlarındaki analiz sonuçları incelendiğinde ise şasi üzerinde oluşan maksimum gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Buna göre sağ kenar üzerine düşme durumu 25 cm yükseklikten düşme senaryoları içerisinde şasi için en kritik senaryodur. Aşağıda yer alan Şekil 5.12’de 25 cm yükseklikten düşme sonucu şasi üzerinde oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.12 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.

Bu durumda şasi üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri 18.6 MPa olarak görülmektedir. Buna göre 25 cm’den düşme durumlarında akma dayanımı 21 MPa olan polyar malzemeden imal edilmiş şasinin hasara uğraması beklenmemektedir.

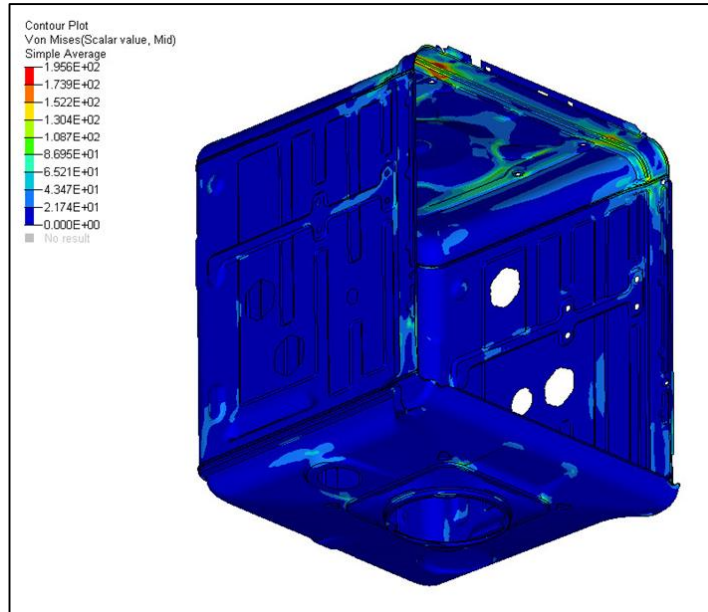
Plastik şasi üzerinde oluşan gerilmeler incelendikten sonra sac parçaların hasara uğrayıp uğramadığı kontrol edilmiştir. Şekil 5.13’de dış sacların makinanın 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşürülmesi sonucu oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu dış saclarda oluşan gerilmeler.

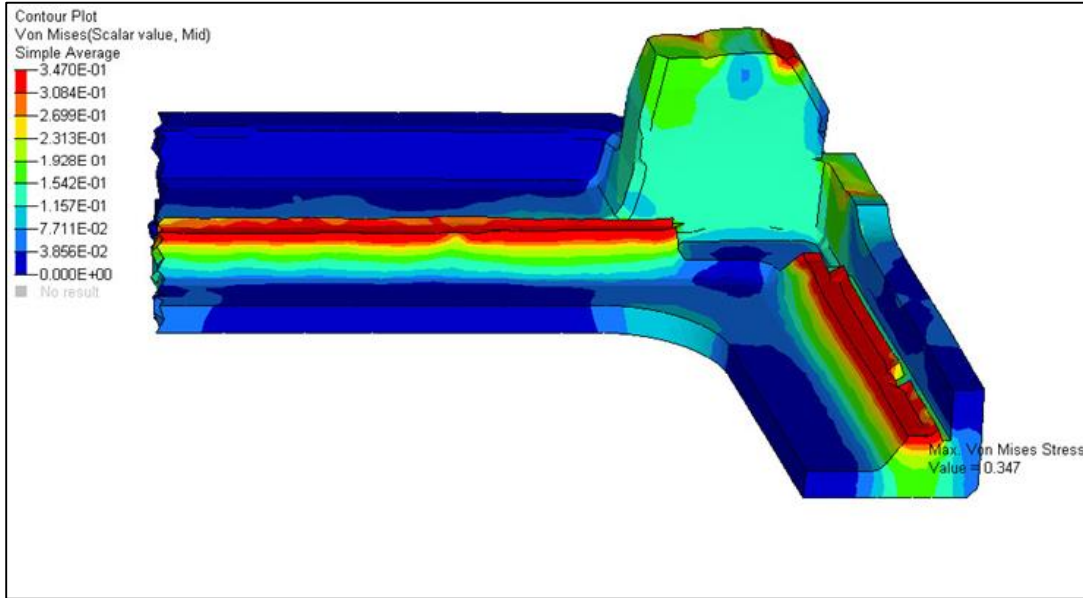
Şekil 5.13’de görüldüğü üzere dış saclar üzerinde maksimum 227 MPa gerilme görülmektedir. Dış saclara ait 304 sacın akma dayanımının 292 MPa olduğu bilindiğinden herhangi bir plastik deformasyon riski beklenmemektedir.

Öte yandan iç kısımda bulunan sacların hasar durumu da incelenmiştir. Düşme durumunda iç kısımda yer alan sacların hasar görme riski dış tarafta bulunan saclara göre daha azdır. Aşağıda sunulan Şekil 5.14’te iç sacların maksimum gerilme oluşan andaki gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.14 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu iç saclarda oluşan gerilmeler.

Bu sonuçlar, iç saclar üzerinde maksimum 196 MPa gerilme göstermektedir. İç saclara ait 430 sacının akma dayanımı 247 MPa olduğundan düşme anında iç kısımda bulunan sac parçaların plastik deformasyona uğraması da beklenmemektedir. Son olarak alt kısımda yer alan paketleme malzemesi üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Paketleme malzemesinin maksimum deformasyona uğradığı durumda ortaya çıkan maksimum gerilme değeri, makinanın sağ kenar üzerine düşmesi senaryosu için alınmıştır. Buna göre strafor üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri 347 kPa olarak okunmuştur. Buna göre paketleme malzemesinin %58 hacimsel şekil değişimine uğradığı anlaşılmaktadır. Düşme uygulamaları için paketleme malzemesinin deformasyonunun %65'den fazla olmaması istenmektedir. Şekil 5.15'de paketleme malzemesinin analiz sonucunu içeren görseli yer almaktadır.



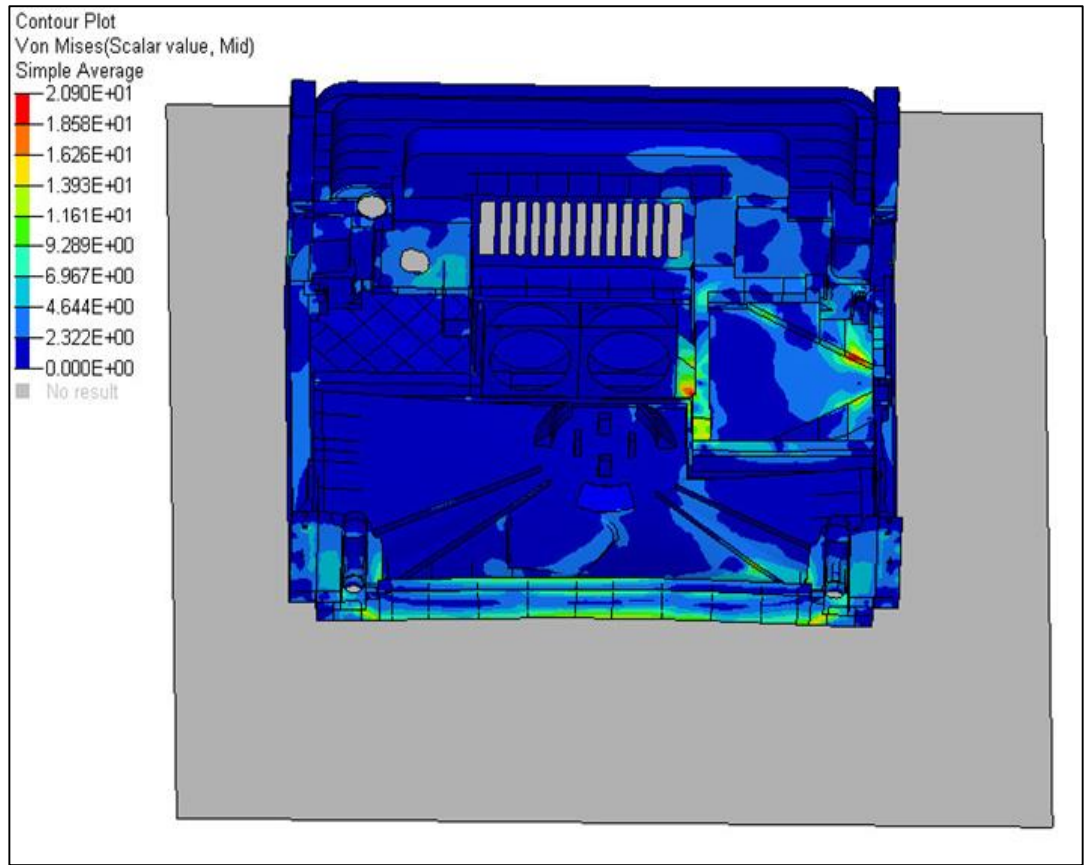
Şekil 5.15 : 25 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu straforda oluşan maksimum gerilme.

Analiz sonuçları incelendiğinde, modellenen makinanın standartta belirlenen 25 cm yükseklikten düşürülmesi durumunda herhangi bir hasar görmeyeceği öngörülmektedir.

5.4.2 40 cm yükseklikten düşme analizi sonuçları

25 cm yükseklikten yapılan düşme testi analizleri gerçekleştirildikten sonra sonlu elemanlar modelindeki başlangıç koşulları değiştirilerek makinanın 40 cm yükseklikten düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları yorumlanırken 25

cm için kullanılan metod tekrarlanmıştır. Buna göre düşme durumunda makinanın hasar görmesi için en az riskli senaryo olan düz düşme ile en fazla hasar risk durumu olan sağ kenar üzerine düşme durumlarına ait sonuçlar verilmiştir. Öncelikle alt kısımda yer alan şasinin 40 cm yükseklikten düz düşme durumundaki hasar durumu incelenmiştir. Bu durumda şasi üzerinde görülen maksimum gerilme değeri 20.9 MPa olarak görülmektedir. Bu değerin şasi malzemesi polyarın akma dayanımı olan 21 MPa değerine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. 40 cm yükseklikten düz düşme durumunda alt şasinin analiz sonucuna ait görsel aşağıda Şekil 5.16'da verilmiştir.



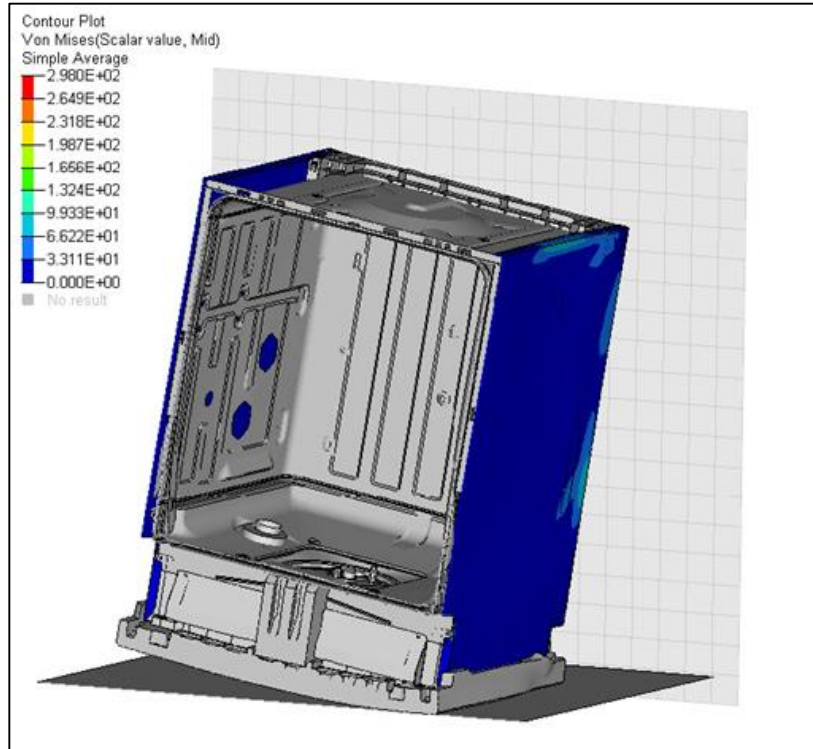
Şekil 5.16 : 40 cm yükseklikten düz düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi kompresör bölgesi yüksek gerilmelerin yoğunlukta olduğu bölgedir. Daha sonra 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme durumunda maksimum gerilme değeri 23 MPa olarak belirlenmiştir. Burada akma dayanımının üzerinde bir gerilme durumu ortaya çıkmıştır. Yani şasi üzerinde kalıcı deformasyonlar oluşması kaçınılmazdır. Gerilmenin yoğun olarak görüldüğü bölgeler arkadaki parmaklıklı yapıyı da kapsamaktadır. 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme analizine ait görsel Şekil 5.17'de verilmiştir.



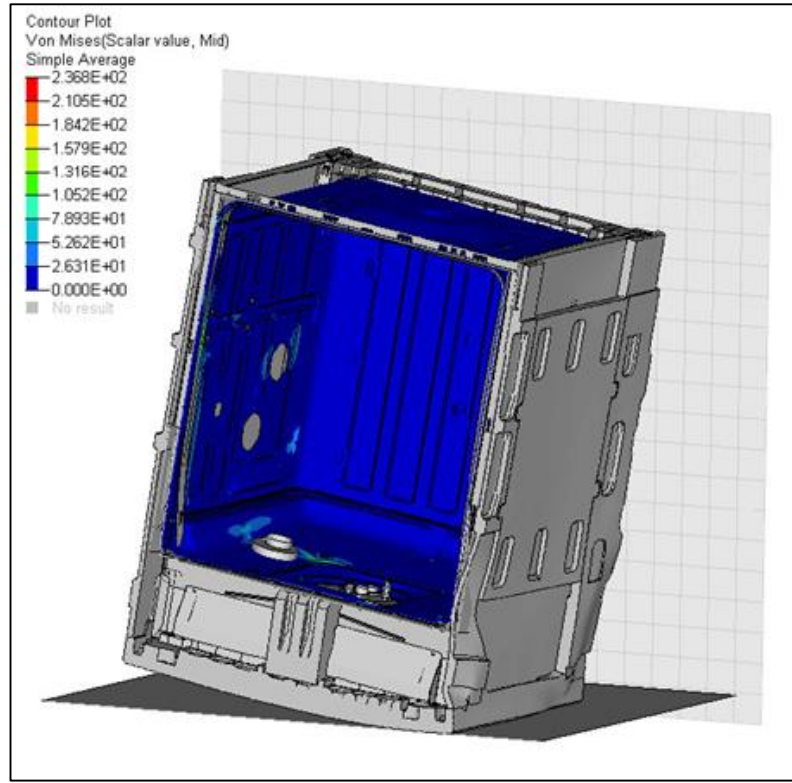
Şekil 5.17 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu şaside oluşan gerilmeler.

Alt kısımda yer alan şasinin durumu belirlendikten sonra iç ve sac parçaların hasar durumları araştırılmıştır. Buna göre dış kısımda yer alan sac parçalar üzerinde maksimum 298 MPa gerilme değeri görülmüştür. Dış saclara ait malzemenin akma değeri 292 MPa olduğundan bu saclar üzerinde kalıcı deformasyon riski oluşmaktadır. Dış saclarda oluşan gerilme dağılımını gösteren analiz sonuçları Şekil 5.18’de verilmiştir.



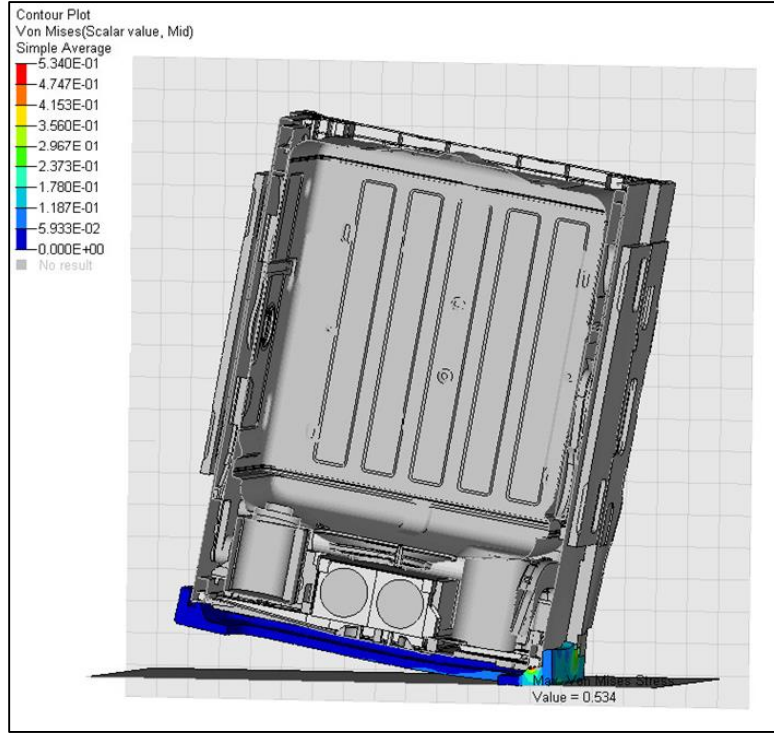
Şekil 5.18 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu dış saclarda oluşan gerilmeler.

Öte yandan iç kısımda yer alan sacların sağ kenar üzerine düşme durumundaki hasar durumu incelendiğinde maksimum 237 MPa gerilme değerine ulaşıldığı görülmektedir. İç saclara ait 430 sacının akma dayanımının 247 MPa olduğu bilindiğinden iç saclarda kalıcı deformasyon riski öngörülmemektedir. Fakat akma dayanımına oldukça yakın gerilmelere ulaşılması hasar riski bulunduğunu gösterir. Şekil 5.19’da iç sacların 40 cm yükseklikten düşme analizleri sonucunda elde edilen gerilme dağılımı görseli verilmiştir. Buna göre alt sacın tuzluk ve hazne ile bağlandığı noktalarda gerilmelerin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca sağ kenar üzerine düşmeden dolayı iç saclar üzerinde eksenel zorlanma kuvvetlerinin yanında eğilmeye bağlı zorlanmalarda görülebilmektedir.



Şekil 5.19 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu iç saclarda oluşan gerilmeler.

Son olarak, alt kısımda yer alan paketleme malzemesi üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri ve deformasyonlar incelenmiştir. Bu durumda sağ kenar üzerine düşmede strafor üzerinde maksimum 534 kPa gerilme görülmüştür. Bu değer straforun %71 oranındaki gerinim değerine karşılık geldiği görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, paketleme uygulamalarında %65’in üzerinde şekil değişimleri istenmemektedir. 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucunda strafora oluşan maksimum gerilme değerini gösteren analiz sonucu Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20 : 40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu straforda oluşan maksimum gerilme.

6. ANKASTRE BULAŞIK MAKİNASI FİZİKSEL DÜŞME TESTİ

Bu bölümde fabrika ortamında yapılan fiziksel düşme testleri, kullanılan test cihazı ve test prosedürü anlatılmıştır. Fiziksel düşme testleri ile ürünlerde nakliye sırasında meydana gelebilecek olası düşme durumlarında hasarların öngörülmesi için gerçekleştirilen testlerdir. Bu bölümün son kısmında fiziksel düşme testlerine ait sonuçlar verilmiştir.

6.1 Deneysel Yaklaşım

Burada sunulan çalışma kapsamında sonlu elemanlar modeli oluşturularak düşme analizi yapılan ankastre bulaşık makinasının, sayısal modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanması amacı ile, Arçelik A.Ş. Ankara Bulaşık Makinası İşletmesi'nde yer alan düşme test düzeneği kullanılarak, fiziksel düşme testleri gerçekleştirilmiştir. Burada yer alan test düzeneği ile paketlenmiş haldeki ürünlerin istenilen yükseklik ve açılarda düşme testleri yapılması mümkün olmaktadır. Test düzeneği aşağıda, Şekil 6.1'de görülmektedir. Test düzeneğinde meydana gelebilecek olası kazaların önlenmesi için çit ile çevrilmiştir.



Şekil 6.1 : Düşme testi düzeneği.

Test sistemi test edilecek ürünü alt kısımda yer alan kolları yardımı ile istenilen yüksekliğe kaldırmaktadır. Açılı düşme durumlarında da istenilen açı bu kolların yardımı ile verilmektedir. Düşme esnasında bu kollar ürünün düşme hızından daha yüksek bir hızla alt kısımda yer alan kanallara girmektedir. Böylece düşme esnasında kolların ürün ile teması kesilmektedir. Tüm bu işlemler görevli operatör tarafından güvenli bir biçimde gerçekleştirilmektedir.

Bu tezin konusu olan ankastre bulaşık makinası prototipi ile testler gerçekleştirilmiştir. Ankastre bulaşık makinası prototipi paketlenmiş halde teste hazır hale getirilmiştir. Şekil 6.2’de test edilen ankastre bulaşık makinası görülmektedir.



Şekil 6.2 : Düşme testine hazır haldeki ankastre bulaşık makinası.

Ankastre bulaşık makinası fiziksel düşme testleri gerçekleştirilirken öncelikle 25 cm yükseklikten düşme durumu test edilmiştir. Bunun nedeni standartta belirtilen yüksekliğin 25 cm olmasıdır. İlk olarak ürün 25 cm yükseklikten düz düşme senaryosunda test edilmiştir. Daha sonra kenarları üzerine 10° açılı düşme durumları test edilmiştir. Aynı şekilde 40 cm’den düşme durumu içinde aynı prosedür izlenmiştir. Her bir test senaryosunun ardından ürünün paketleme malzemesi çıkarılarak hasar durumları incelenmiştir. Ayrıca her senaryo öncesinde de ürün kullanılmamış paketleme malzemesi ile kaplanarak testler yapılmıştır. Bunun nedeni kullanılmış paketleme malzemesinin kullanılmamış paketleme malzemesine göre

daha rijit bir yapıda olması nedeniyle makine üzerinde hasara neden olabilecek mekanik özellikler göstermesi riskidir. Ayrıca ürün paketlenme malzemesi Şekil 6.2’de görüldüğü üzere köpük dışında karton malzeme ile de çevrelenmiştir. Fakat ürünün sonlu eleman modelinde karton modellenmemiştir. Kartonun düşme anındaki enerji yutumu özelliği köpük malzemeye oranla oldukça düşük olduğundan dolayı ihmal edilebilmektedir. Ayrıca ürünün ön kısmındaki köpükler arasında yer alan tahta parçası da, sonlu eleman modeline dahil edilmemiştir. Bu tahta parçasının düşme testleri açısından kayda değer bir önemi bulunmamaktadır. Bu tahta parçaları gerçek durumda ürünlerin birlikte taşınırken hasar görmelerini engellemek için kullanılmaktadır.

Burada sunulan çalışma kapsamında bir adet ankastre bulaşık makinası prototipi kullanılmıştır. Fakat üretim aşamasında ideal durumu görmek için her bir test senaryosunda farklı makinaların test edilmesi gerekmektedir. Yine de sonlu eleman analizlerindeki düşme testi sonuçlarını doğrulama açısından bu testler yeterli olmuştur.

Burada ürünün ilk düşme durumundaki durum en doğru sonucu vermektedir. Bunun nedeni ürünün diğer senaryolarda tekrarlı darbelere maruz kalması neticesinde birbiri üzerine eklenen gerilme ve deformasyonlar görülecektir. Bu sebepten dolayı ilk test haricindeki testlerin analiz sonuçları ile karşılaştırılması farklı sonuçlar elde edilmesine neden olabilmektedir. Fakat yine de makine üzerinde deformasyona uğrayan ve kırılan bölgelerin tespiti ve köpük malzeme üzerinde oluşan deformasyonlar incelenerek bazı öngörülerde bulunulabilmektedir.

6.2 Sonuçlar

Fiziksel düşme testlerine ait sonuçlar makinanın her bir düşme senaryosu sonrasında paketlenme malzemesinin çıkarılarak makinanın ve strafor malzemesinin göz ile kontrol edilmesini içermektedir. Göz ile tespiti yapılan hasar bölgelerinde meydana gelen deformasyonlar bir cetvel yardımı ile de ölçülebilmektedir. Buna göre göz ile kontrol işlemi sırasında bazı hasarların gözden kaçabilme riski bulunmaktadır. Bunun için hasara uğrayabilecek bölgeler ve komponentler için bazı öngörülerde bulunmak gerekmektedir. Bunun için ürünün sonlu eleman düşme analizleri de değerlendirilebilmektedir.

6.2.1 25 cm yükseklikten fiziksel düşme testi sonuçları

Test sonuçları incelendiğinde, 25 cm yükseklikten düz düşme durumunda makine üzerinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Bu testin hemen ardından paketlenme malzemeleri çıkarılarak makinanın alt kısmında yer alan plastik şasi incelenmiştir. Şasi üzerinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Şasi üzerinde yer alan komponentler ve bağlantıları da herhangi bir hasara uğramamıştır. Şekil 6.3’de test sonrası plastik şasiye ve komponentlere ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 6.3 : 25 cm düz düşme sonucunda plastik şasi ve komponentler.

Bulaşık makinasının komponent bağlantıları dikkatli bir biçimde incelenmiş, herhangi bir hasar tespit edilmemiştir. 25 cm’den düz düşme durumunda iç ve dış saclarda da herhangi bir deformasyon görülmemiştir. Benzer şekilde sırası ile 25 cm’den kenarlar üzerine 10° derece açılı düşme durumları test edilmiştir. Kenarlar üzerine düşme testi yapıldığında sağ kenar ve arka kenar üzerine düşme durumları daha riskli olarak görülmektedir. Özellikle sağ kenar üzerine düşme senaryosunda köpük malzeme üzerinde yırtık bölgeler tespit edilmiştir. Sağ kenar üzerine düşme durumunda köpük malzeme üzerinde meydana gelen deformasyon aşağıda yer alan Şekil 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6.4 : 25 cm sağ kenar üzerine düşme sonucundaki köpük malzeme.

Makinanın iç ve dış saclarının hasar durumu da detaylı olarak incelenmiştir. 25 cm yükseklikten açılı olarak yapılan düşme testlerinde iç saclarda herhangi bir hasar görülmemiştir. Makinanın fiziksel düşme testlerinde de sonlu elemanlar analizlerinde olduğu gibi, iç kısmında bulunan hareketli sepet makinaya monte edilmemiştir. Makinanın düşme testleri sonucunda iç sacların durumuna ait görsel aşağıda Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Düşme testleri sonucunda iç sacların hasar durumu.

Sonuç olarak, 25 cm yükseklikten fiziksel düşme testlerinde makinanın alt plastik şasi, iç ve dış sacları ile şasi üzerine yerleştirilen komponentler ve bu komponentlerin bağlantılarında herhangi bir hasar görülmemiştir.

6.2.2 40 cm yükseklikten fiziksel düşme testi sonuçları

25 cm yükseklikten düşme senaryolarının tamamlanmasının ardından makinanın 40 cm yükseklikten düşme testleri yapılmıştır. 40 cm yükseklikten yapılan testlere de önce düz düşme senaryosu ile başlanmıştır. 40 cm yükseklikten yapılan düşme testlerinde de aynı makine, her bir testten sonra paketleme malzemesi değiştirilerek kullanılmıştır. 40 cm yükseklikten düz düşme durumunda alt kısımda yer alan köpük malzeme üzerinde meydana gelen deformasyonlar artmıştır. Ayrıca köpük malzeme üzerinde oluşan yırtılma bölgesi de derinleşmiştir. 40 cm yükseklikten düz düşme durumunda alt kısımda yer alan köpük malzemeye ait görsel Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6 : 40 cm düz düşme sonucundaki köpük malzeme.

40 cm yükseklikten düz düşme durumunda alt şasinin durumu incelendiğinde kompresör bölgesinde hasar görülmüştür. Kompresör bağlantı bölgesinin düşme açısından kritik bölge olduğu, sonlu eleman analiz sonuçlarından da bilinmektedir. Bu nedenle kompresör bağlantı bölgesi dikkatli bir biçimde incelenmiştir. Kompresörün alt şasiye monte edildiği bölümde kırılma meydana gelmiştir. 40 cm yükseklikten düz düşme durumunda kompresör bağlantı bölgesinde meydana gelen kırılma Şekil 6.7’de görülmektedir.



Şekil 6.7 : 40 cm düz düşme sonucunda alt şaside oluşan kırılma bölgesi.

Bu aşamadan sonra testlere açılı düşme senaryoları ile devam edilmiştir. 40 cm yükseklikten arka kenar üzerine düşme durumunda evaporatorün yerleştirildiği bölgede yer alan parmaklıklı yapıda çatlaklar oluşmuştur. Şekil 6.8’de alt şasi de meydana gelen çatlak görülmektedir.



Şekil 6.8 : 40 cm arkaya düşme sonucunda alt şaside oluşan çatlak bölgesi.

40 cm yükseklikten sağ kenar üzerine düşme sonucu ön kapağın gövdeye bağlandığı menteşe bölümünde deformasyon oluşmuştur. Tekrarlı düşmelere ve yorulmaya da bağlı olarak oluşabilecek bu deformasyon menteşenin işlevini yitirmesine neden

olmuştur. Aşağıda yer alan Şekil 6.9'da ön kısımda yer alan menteşe bağlantı bölgesinde meydana gelen deformasyon görülmektedir.



Şekil 6.9 : 40 cm sağ kenar düşme sonucunda ön bölümde oluşan deformasyon.

7. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında ankastre bulaşık makinasının fabrika ortamında fiziksel düşme testleri ve sonlu eleman paket programı kullanılarak düşme testinin modellenmesi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Beyaz eşya sektöründe paketlenme malzemesi olarak kullanılan ve basma durumunda enerji yutumlama özelliği yüksek olduğundan dolayı düşme testleri açısından kritik öneme sahip strafor malzemenin yüksek çarpma hızlarındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Strafor malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi açısından basit düşme testi düzeneğinin kurulması öncül bir çalışma olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli oluşturularak analizler yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, makinanın fabrika ortamında yapılan fiziksel düşme testleri ile karşılaştırılmıştır. Sunulan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Beyaz eşya sektöründe paketlenme malzemesi olarak kullanılan 20, 24, 26 ve 30 kg/m³ yoğunluktaki strafor malzemelerinin düşük yükleme ve yüksek çarpma hızlarındaki mekanik özellikleri belirlenmiştir.
- Deney sonuçlarından elde edilen veriler incelendiğinde, gerinim hızı arttıkça aynı gerinim miktarına karşılık gelen gerilme değeri artmaktadır. Özetle, strafor malzemeler yüksek gerinim hızlarında daha direngen özellikler göstermektedir.
- 200, 500 ve 1000 mm/dak düşük yükleme hızlarındaki mekanik özellikler benzerlik göstermektedir. Aynı şekilde 25, 40 ve 70 cm yükseklikten düşme durumunda karşılaşılan yüksek çarpma hızlarındaki mekanik özellikler de birbirine yakındır.
- Düşme testi düzeneğinde bulunan ivmeölçerden elde edilen verilerin salınımlı bir yapıya sahip olmasının nedeninin, düşen tablanın çarpmanın etkisiyle doğal frekansında tahrik olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.
- Düşme testi düzeneğinin sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapılan

analizlerden ve kurulan test düzeneğinden elde edilen kuvvet-deformasyon verileri kıyaslandığında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

- Ankastre bulaşık makinasının sonlu elemanlar modeli kurularak standartta belirtilen 25 cm yükseklikten düz ve açılı düşme durumları için analiz sonuçlarında makine üzerinde hasar görülmemiştir. Zorlayıcı koşul olarak belirlenen 40 cm yükseklikten düşme simülasyonları için ise makine üzerinde hasar riskleri görülmüştür.
- Makinanın fiziksel düşme testlerinde 25 cm yükseklikten düşme senaryolarında her bir durumda inceleme yapılmıştır. Tekrarlı düşme durumu olmasına rağmen, sonlu elemanlar modelinde yapılan analizlerde olduğu gibi, makine üzerinde herhangi bir hasar görülmemiştir. Öte yandan makinanın 40 cm yükseklikten yapılan fiziksel düşme testlerinde makine üzerinde hasar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar da analizlerle uyumludur.

Sonuçta yapılan çalışma kapsamında ankastre bulaşık makinası, düşme testleri açısından üretim onayı almıştır. Bu çalışma göz önüne alınarak sonraki araştırma ve geliştirme çalışmalarının tetiklenmesi açısından bazı önerilerde bulunulabilir. Bu öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ankastre bulaşık makinasında kullanılan paketleme malzemesinin boyutsal optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Yapılacak bu çalışma ile minimum hacimde paketleme yapılması sağlanabilir.
- Optimizasyon çalışması yapılırken strafor malzemenin mekanik özelliklerinin oldukça yüksek doğrulukta modellenmesi gerekmektedir. Bunun için strafor malzemenin mekanik özelliklerinin daha doğru bir biçimde modellenmesi için standart düşme testi kulelerinde testler gerçekleştirilebilir. Ayrıca strafor malzemenin sonlu eleman paket programı içerisinde farklı malzeme modelleri araştırılabilir.
- Benzer araştırmalar farklı sıcaklıklarda da gerçekleştirilebilir.
- Düşme analizleri sonucunda ankastre bulaşık makinasına ait komponentlerin hasar durumları Von Mises gerilme kriteri esas alınarak incelenmiştir. Von Mises kriteri metal malzemeler için yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine karşın, plastik ve köpük malzemeler için yüksek doğrulukta sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle bu malzemeler için daha yüksek doğrulukta sonuçlar veren farklı kriterler araştırılabilir.

- Fiziksel düşme testinde kullanılan ankastre bulaşık makinası üzerine ivmeölçer yerleştirilerek elde edilen veriler, analiz sonuçlarından elde edilen ivme verileri ile kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Packaging With Styropore.** (2006). BASF, Ludwigshafen, Germany.
- [2] **Görücüoğlu, B.** (2005). *Çamaşır Makinası Düşme Testi ve Simülasyonu.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Balaban, H.** (2006). *Beyaz Eşya Sektöründe Uygulanan Düşürme Testlerinin Bilgisayarda Simülasyonu.* (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [4] **Martinez, J., Garcia, M. A., Vicencio, J. L. M., Miranda, H.** (2011). Using Computer Aided Engineering Processes in Packaging Design Development, *Altair Engineering*.
- [5] **Kumar, S., Kaushik, K., Sharma, A.** (2011). Design Performance Prediction through Digital Engineering, *Simulation Driven Innovation*.
- [6] **Neumayer, D., Chatiri, M., Hoermann, M.** (2006). Drop Test Simulation of a Cooker Including Foam Packaging and Pre-stressed Plastic Foil Wrapping, *9th European LS-DYNA Conference*, 18-33.
- [7] **Nagy, A., Ko, W. L., Lindholm U.S.** (1964). Mechanical Behaviour of Foamed Material under Dynamic Compression, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 10, pp. 127-134.
- [8] **Duskov, M.** (1997). Material Research on EPS20 and EPS15 Under Representative Conditions in Pavement Structures, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, pp. 147-181.
- [9] **Hornberger, L., Might, T., Mohareb, N., Pirie, T.** (1997). Dynamic Properties of Recycled EPS Foam, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 36:6, 917-930.
- [10] **Ossa, A., Romo, M. P.** (2009). Micro- and Macro-Mechanical Study of Compressive Behavior of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam, *Geosynthetics International*, 16, No. 5, 327–338.
- [11] **Avalle, M., Belingardi G., Ibba A.,** (2007). Mechanical Models of Cellular Solids:Parameter Identification From Experimental Tests, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 3-27.
- [12] **Shivakumar, N., Deb, A., Chou, C., Chipatta, H.** (2014). A Methodology for Characterization of the Strain-Rate Dependent Behaviour of PU Foam, *SAE Int. J. Manf.* 7(3).
- [13] **Ghosh, A., Hatti, P.** (2005). Packing Foam Characterization and Model Validation, *Altair CAE Users Conferance*.

- [14] **Öztürk, U.E.** (2008). *Mechanical Behavior of Low Density Polymeric Foams Under Multiple Loading and Unloading*. (Doktora Tezi). Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [15] **Croop, B., Lobo, H.** (2009). Selecting Material Models for the Simulation of Foams in LS-DYNA, *7th European LS-DYNA Conference*.
- [16] **Gerçeker, B.** (2012). *Drop Test Simulation of a Munition with Foams and Parametric Study on Foam Geometry and Material*. (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [17] **ASTM D1621.** (2000). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*, ASTM International, USA.
- [18] **ASTM D5628.** (2010). *Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart*, ASTM International, USA.
- [19] **ASTM D6817.** (2015). *Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam*, ASTM International, USA.
- [20] **ASTM D5276.** (2009). *Standard Test Method for Drop Test of Loaded Containers by Free Fall*, ASTM International, USA.
- [21] **ATGM 9-DT-0040.** (2001), *Düşme Testi Deney Talimatı*, ATGM Arçelik A.Ş., İstanbul.
- [22] **Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., Xenaki, V.C.** (1999). Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation, *Geotechnics International*.
- [23] **Follansbee, P.S.** (1992). High Strain-Rate Testing. High Strain Rate Compression Testing, *ASM Handbook*.
- [24] **Meyers, M.A.** (1994). Dynamic Behaviour of Materials, *John Wiley and Sons*.
- [25] **RADIOSS.** (2014). *RadioSS Theory Manual 13.0, Large Displacement Finite Element Analysis*, USA.
- [26] **Bathe, K.J.** (1982). *Finite Element Procedures In Engineering Analysis*, Prentice-Hall Inc., USA .
- [27] **Mills, N.J.** (2007). *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*, Oxford : Butterworth Heinemann.
- [28] **Gibson, L.J., Ashby, M.F.** (1997). *Cellular Solid Structure and Properties*, Cambridge Press.
- [29] **Rusch, K.C.** (1969). Load-Compression Behaviour of Flexible Foams, *Journal of Applied Polymer Science*, 13, 2297-2311.
- [30] **Rusch, K.C.** (1970). Energy Absorbing Characteristics of Foamed Polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 14, 1113-1147.
- [31] **Meinecke, E.A., Schwaber, D.M .** (1970). Energy Absorbing in Polymetric Foams-I. Prediction of Impact Behaviour from Instron Data for Foams with Rate-Independent Modulus, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.14, No. 9, pp. 2239-2248.

- [32] **Horvath, J.S.** (1995). Geofoam Geosynthetic, *Horvath Engineering, Scardale, NY*.
- [33] **Altair Radioss User's Guide Release 13.0.** (2014). Altair Engineering Inc.
- [34] **Sirbu, A.D.M., Farkas, L.** (2013). Programing the Transient Explicit Finite Element Analysis with Matlab, *U. P. B. Sci. Bull, Series-D*, Vol. 75, Iss. 2.
- [35] **Arkan, M.A.S.** (1995). Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, *Makina Mühendisleri Odası Arşivi*.
- [36] **Liyan, Y.E., Xifeng, L.I., Chen, J.** (2013). Numerical Simulation and Experimental Study of 304 Metastable Austenitic Stainless Steel in Cup Drawing, *National Engineering Research Center of Die & Mold CAD*, Shangai Jiao Tong University.
- [37] **Björkström, D., Farkas, L.** (2008). FEM Simulation of Electrohydraulic Forming, *Kungliga Tekniska Högskolan, T-03*.
- [38] **Özcan, Z.S., Sökmen, K.F., Güner A., Akbaba, U., Yazıcı, M.** (2014). Yolcu Koltuklarının Sonlu Elemanlar Analizlerinde, Elastik Plastik Malzeme Modeli ile Johnson Cook Malzeme Modelinin Karşılaştırılması ve Test Sonuçları ile Doğrulanması, *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Sabri ERASLAN

Doğum Yeri ve Tarihi : Karacabey, 1990

E-Posta : eraslansa@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği