

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EV TİPİ BİR FIRININ DÜŞME TESTİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolga ASA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EV TİPİ BİR FIRININ DÜŞME TESTİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tolga ASA
(503121236)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Zeynep PARLAR

Teslim Tarihi: 29 Ocak 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121236 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tolga ASA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“EV TİPİ BİR FIRININ DÜŞME TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Zeynep PARLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI**
İstanbul Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca yardımını eksik etmeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Zeynep PARLAR'a, bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan Arçelik A.Ş. ARGE Direktörlüğüne, tecrübesiyle yol gösteren Kutay EDİS'e, testlerin gerçekleştirilmesindeki yardımlarından dolayı Kadir USTA ve Sena DAVASLIGİL'e teşekkür ederim.

Ocak 2015

Tolga ASA
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür.....	2
1.1.1 Düşme testi hakkında yapılmış çalışmalar	2
1.1.2 Standartlar	4
1.1.3 Deney talimatı	7
2. DÜŞME TESTİNDE DARBE ETKİSİNDE KALAN MALZEMELER.....	9
2.1 Genleştirilmiş Polistren	9
2.1.1 Mekanik davranışı.....	10
2.1.2 Şekil Değiştirme Hızının Etkisi	13
2.1.3 Darbe Test Düzenekleri.....	14
2.2 Metal Malzemeler	16
3. FIRIN DÜŞME TESTİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ	17
3.1 Sonlu Eleman Yaklaşımı.....	17
3.1.1 Explicit Algoritmada Zaman Adımı	18
3.1.2 Newmark Methodu.....	18
3.1.3 Merkezi Farklar Algoritması.....	20
3.2 Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Malzeme Modelleri	21
3.2.1 Genleştirilmiş Polistren Parçalar İçin Kullanılan Model	21
3.2.2 Johnson Cook Malzeme Modeli	22
3.2.3 Elastik Malzeme Modeli	24
3.3 Oluşturulan Sonlu Eleman Modeli.....	25
3.3.1 İç ve Dış Saclar	27
3.3.2 Fan Grubu	31
3.3.3 Polistren Parçalar	31
3.3.4 Hareketli Raf Sistemi	34
3.3.5 Kapak Grubu	35
3.3.6 Çoklu Bölge Yaklaşımı	36
4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI.....	39
4.1 Sayısal Modelin Test İle Doğrulanması.....	42
4.1.1 40 Cm'den Taban Üzerine Düz Düşme Testi	42
4.1.2 40 Cm'den Düz Düşme Testinin Sayısal Olarak Modellenmesi	44
4.2 40 Cm'den Taban Ön Kenar Üzerine Düşme	49
4.3 40 Cm'den Taban Sağ Kenar Üzerine Düşme	52

4.4 70 Cm'den Taban Üzerine Düz Düşme.....	53
5. DENEYSEL YAKLAŞIM.....	55
5.1 40 Cm'den Taban Ön Kenar Üzerine Düşme.....	57
5.2 40 Cm'den Taban Sağ Kenar Üzerine Düşme.....	58
5.3 70 Cm'den Düz Düşme	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AŞ	: anonim şirket
EPS	: genleştirilmiş Polistren
g	: gram
Hz	: hertz
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
kg	: kilogram
kPa	: kilopaskal
m³	: metreküp
MPa	: megapaskal
m/s	: metre/saniye
Tübitak MAM	:Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ürün ağırlığına göre düşme testi yüksekliği [10].	7
Çizelge 2.1 : Fırında kullanılan EPS malzemenin fiziksel özellikleri [12].	13
Çizelge 2.2 : Instron Ceast 9350 darbe test cihazı teknik özellikleri [15].	15
Çizelge 2.3 : DC04 sacın mekanik özellikleri [16].	16
Çizelge 2.4 : DX53 sacın mekanik özellikleri.	16
Çizelge 3.1 : M2_PLAS_JOHNS_ZERIL malzeme kartı değerleri [20].	24
Çizelge 3.2 : M1_ELAST malzeme kartı için kullanılan değerler.	25
Çizelge 3.3 : Fırın ağ modelinde kullanılan eleman adetleri	26
Çizelge 4.1 : Düşme yüksekliklerine göre yere çarpma hızı.	39
Çizelge 4.2 : Gerçekleştirilen sayısal analizler.	41
Çizelge 4.3 : Test No:1 sonrası kapak ve alt sac arasındaki boşluk	43
Çizelge 4.4 : 40 cm'den düz düşürme sonucu kapak ve alt sac arasındaki boşluk....	48
Çizelge 4.5 : 40 cm'den düz düşürme deney ve sayısal model karşılaştırması.	48
Çizelge 4.6 : 40 cm'den taban ön kenar üzeri düşme analizi için çözüm süresi	49
Çizelge 5.1 : Deneysel yaklaşımda gerçekleştirilen testler.	56
Çizelge 5.2 : Test No:2 sonrası kapak ve alt sac arasındaki boşluk.	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: ASTM D5276 standartına göre düşme testinde yüzeyler.....	5
Şekil 1.2	: ASTM D5276 standartına göre bırakma düzeneği.....	6
Şekil 1.3	: Gerçekleştirilecek olan düşme pozisyonları.....	8
Şekil 2.1	: Polistren malzemenin baz ve genişletilmiş hali [12].	9
Şekil 2.2	: Genleştirilmiş polistren malzemenin uzama-gerilme eğrisi [13].	10
Şekil 2.3	: 20 kg/m ³ yoğunluğundaki EPS'nin uzama-gerilme eğrisi [12].....	11
Şekil 2.4	: Genleştirilmiş polistren malzemenin uzama hızına bağlı uzama-gerilme eğrisi.....	12
Şekil 2.5	: EPS yoğunluk-akma gerilmesi ilişkisi [14].....	12
Şekil 2.6	: Instron Ceast 9350 darbe test cihazı.....	15
Şekil 3.1	: Fırının montaj halinin görseli.....	26
Şekil 3.2	: Dış sacların orta yüzey modeli.....	27
Şekil 3.3	: Dış sacların ağ modeli.....	28
Şekil 3.4	: a. Darbe analizleri için önerilen eleman yapısı. b. Statik analizler için önerilen eleman yapısı. c. Fırın dış sacında buna uygun olarak gerçekleştirilen eleman geçişi.....	28
Şekil 3.5	: İç saclar ve iç sacların ağ modeli.....	29
Şekil 3.6	: Kurulan ağ modelindeki vida bağlantıları.....	29
Şekil 3.7	: Vida bölgesindeki temas.....	30
Şekil 3.8	: İç saclardaki vida bağlantılarının ağ modeli.....	30
Şekil 3.9	: İç saclardaki kaynak bağlantısının ağ modeli.....	31
Şekil 3.10	: Fan grubunun ağ modeli.....	31
Şekil 3.11	: Bir parçanın hexahedral ve tetrahedral elemanlarla modellenmiş hali [22].....	32
Şekil 3.12	: Polistren parçaların ağ modeli.....	33
Şekil 3.13	: Taban ve yan köpük arasındaki temas bölgesi.....	33
Şekil 3.14	: Hareketli raf sistemi ve ağ modeli.....	35
Şekil 3.15	: Kapak grubunun üç boyutlu çizimi ve ağ modeli.....	36
Şekil 3.16	: Çoklu Bölge Yaklaşımı'nın çalışma prensibi.....	37
Şekil 3.17	: Çoklu Bölge Yaklaşımı'nda temas bölgelerindeki kuvvetlerin iletimi..	38
Şekil 4.1	: Model No:1.....	40
Şekil 4.2	: Model No:1'in çözümünün gerilme dağılımı, a: 0 sn anı, b: 0.007 sn, c: 0.014 sn.....	40
Şekil 4.3	: Model No:1'in çözümünün maksimum şekil değiştirme noktası.....	41
Şekil 4.4	: 40 cm'den düz düşme sonucu taban sacındaki eğilme.....	42
Şekil 4.5	: Fan milindeki eksen kaçıklığı.....	43
Şekil 4.6	: Kapak ve alt sac arasındaki boşluk.....	43
Şekil 4.7	: 40 cm'den düz düşme sonucu genleştirilmiş polistren malzemenin son hali.....	44
Şekil 4.8	: Arka sactaki gerilme dağılımı.....	45

Şekil 4.9 : Arka sactaki plastik şekil değişimleri.....	45
Şekil 4.10 : Arka ve iç saclardaki deliklerin düşmeden önceki ve sonraki durumu	46
Şekil 4.11 : Alt sactaki plastik şekil değişimleri.....	46
Şekil 4.12 : Alt sactaki $t=0,012$ ve $t=0,04$ sn anındaki esnemeler.....	47
Şekil 4.13 : $t=0,04$ sn anı için kapak ve alt sac arasındaki boşluk.....	47
Şekil 4.14 : Test ürününün ve sayısal modelin yerden geri sekme sürelerinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.15 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde fırının çarpma konumu.....	50
Şekil 4.16 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde EPS ambalaj malzemesinde hesaplanan gerilme dağılımı.....	50
Şekil 4.17 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde iç sacların arkasındaki sacta hesaplanan gerilme dağılımı.....	51
Şekil 4.18 : Hareketli raf mekanizmasında hesaplanan maksimum gerilme.....	52
Şekil 4.19 : 40 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu hesaplanan şekil değişimi.....	52
Şekil 4.20 : 40 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu EPS malzemede oluşan ezilmeler.....	53
Şekil 4.21 : 70 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu yan sacta görülen açılmalar.....	53
Şekil 5.1 : Düşme test düzeneği.....	55
Şekil 5.2 : Düşme testine hazırlanmış ürün.....	57
Şekil 5.3 : 40 cm'den ön kenar üstüne düşme sonucu genişletilmiş polistrende oluşan kırılma.....	58
Şekil 5.4 : 40 cm'den sağ kenar üzerine düşme sonucu alt sacta oluşan eğilme.....	59
Şekil 5.5 : 40 cm'den sağ kenar üzerine düşme sonucu genişletilmiş EPS parçada görülen kırılma.....	59
Şekil 5.6 : 70 cm'den düz düşme sonucu tavan sacında oluşan ayrılma.....	60
Şekil 5.7 : 70 cm'den düz düşme sonucu yan saclarda görülen EPS izleri.....	60
Şekil 6.1 : Sayısal yaklaşımla EPS parçada hesaplanan şekil değişiminin test ile karşılaştırılması.....	61
Şekil 6.2 : Sayısal yaklaşımla taban sacında hesaplanan şekil değişiminin test ile karşılaştırılması.....	62

SEMBOL LİSTESİ

σ_a	:akma dayanımı
$\dot{\sigma}_{pl}^0$	:0 Kelvin'deki genleştirilmiş polistrenin çökme gerilmesi
Δu	:deplesman adımı
b	:pekleşme katsayısı
c_s	:ses hızı
c	:şekil değiştirme hızı katsayısı
ε_p	:plastik şekil değiştirme miktarı
$\dot{\varepsilon}$	:şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	:referans şekil değiştirme hızı
F	:uygulanan yük vektörü
I	:sistemin iç kuvvet vektörü
K_t	:rijitlik matrisi
k	:bolzmann sabiti
l_c	:en küçük eleman kenar boyutu
h	:zaman adımı
m	:sıcaklık etkisi üsteli
n	:pekleşme üsteli
T_g	:camlaşma sıcaklığı
T	:sıcaklık
v_{act}	:aktif hacim

EV TİPİ BİR FIRININ DÜŞME TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Nakliye sırasında bir ürünün düşme riski sadece son kullanıcı noktasında değil ürün paketlenildikten sonraki her an için bulunmaktadır. Olası bir düşme nedeniyle hasar görerek kullanılamaz hale gelecek ürün, satışa hazır bir mamülün satılamaz hale gelmesi anlamına geleceği için kaynak kaybına yol açacaktır. Yüksek sayıda üretim yapan işletmelerde küçük oranda bile bu hasarın görülmesi toplamda ciddi maliyetlere yol açmaktadır.

Nakliye sırasında hasarı önlemek için beyaz eşya sektöründe geliştirilmiş polistren (EPS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşme hasarını önleyici tasarımlar ve malzeme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu konuda düşme testi önemli bir tasarım girdisini oluşturmaktadır. Buna ek olarak düşme testi bir ürüne üretim onayı verilmesinde de önemli bir aşamadır. Bu testte fabrikadan çıkmaya hazır bir ürün kullanılması ve testin sık sık gerçekleştirilmesi nedeniyle testin masrafı oldukça fazladır. Testin doğal bir kısıtı ise çarpma sırasında ürünün dinamiklerinin ve ürünü oluşturan parçaların hareketlerinin ambalaj malzemesi nedeniyle tam olarak gözlemlenememesidir.

Bahsedilen bu maliyet etkeni ve daha detaylı inceleme imkanı, fırının düşme testinin sayısal olarak modellenmesi fikrini doğurmuştur.

Çalışma kapsamında ilk olarak literatür çalışması gerçekleştirilmiş ve düşme testi için detaylı sayısal modellerin beyaz eşya sektöründe yaygın olmadığı görülmüştür. Çalışmanın diğer bir motivasyonunu bu oluşturmaktadır. Literatür çalışmasının ardından sayısal modelin Hypermesh programı kullanılarak modelleneceği ve çözücünün Radioss olacağı belirlenmiştir.

Fırında düşme sırasında darbe etkisinde kalacak temel malzemeler geliştirilmiş polistren ve fırının çoğunu oluşturan çelik saclardır. Sistemdeki elektronik komponentlerin bir kısmı göz ardı edilirken, motor gibi diğer parçalara göre daha fazla kütleyle sahip parçalar modellenmiştir. Sayısal model sonucu saclardaki plastik deformasyonları görebilmek için Radioss çözücündeki malzeme modelleri incelenmiş ve uygun malzeme modeli belirlenerek fırında kullanılan sacların bu malzeme kartına uygun parametreleri belirlenmiştir.

Genleştirilmiş polistrenin mekanik davranışının uzama hızına bağlı olması ve özel yapısı sayısal olarak modellenmesindeki en büyük zorluklardır. Genleştirilmiş polistrenin sayısal olarak modellenmesi hakkında da detaylı literatür çalışması yapılmış ve Radioss'ta kullanılabilecek olası malzeme modelleri belirlenerek en uygununu belirlemek amacıyla ön sayısal modeller kurulmuştur. Bunun sonucunda malzemenin uzama-gerilme eğrisini modele girmeye imkan sağlayan Law 33 malzeme modelinde karar kılınmıştır.

Deneyisel alışmalar ve sayısal modelin oluşturulması paralel olarak yürütülerek sayısal modelin gerçek duruma olabildiğince yakın olması sağlanmıştır. Bu kapsamda prototip olarak hazırlanmış bir fırina farklı pozisyonlarda düşme testi uygulanmış ve sonuçlar sayısal modelin çıktılarıyla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının çıktısı olarak düşme testinin bilgisayar ortamında daha tasarım aşamasındayken gerçekleştirilmesini sağlayacak bir sayısal modeli kurulmuştur. Kurulan model testler ile doğrulanmıştır. Sayısal model, gerçekleştirilecek gerçek düşme testlerin sayısını azaltarak maliyet avantajı sağlayacak hem de daha tasarım aşamasında düşmeye uygun tasarım yapılmasını sağlayacağı için sonradan oluşması olası hasarları ve gereksiz emek kaybını önleyecektir. Sayısal modelin bir diğer çıktısı ise polistren malzemenin tasarımına girdi teşkil edecek olmasıdır. Sayısal modelde gerçekleştirilecek optimizasyon işlemleri sayesinde optimum polistren malzeme miktarını belirlemek mümkün olacaktır. Bu sayede hem gereksiz malzeme kullanımının nne geilecek hem de ürünün ambalajı gereğinden büyük olmayacağı için nakliye masrafları azalacaktır.

MODELING THE DROP TEST OF HOUSEHOLD OVEN WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

A product's falling risk during transportation is not only available on the end user spot but is also available at any moment after the packaging stage. An incidental fall of a product will cause incremental cause because of the damage on a ready for sale product. In an entity with a high production capacity, forementioned damages even in a low ratio of the total production volume, shall cause serious expenditures.

In order to prevent the damages that occur in the course of transportation, polystyrene (EPS) is commonly used in the domestic appliances sector. Moreover, designs and materials which are preventing falling damage are being developed by the studies. Drop test is an essential data for designs and additionally it is a substantial stage for manufacturing approval. A forecited test is notably expensive for using products that are ready to be released and for being held frequently. Due to the packing materials, it is not possible to observe movements of the pieces and product dynamics during the impact.

Mentioned expense factor leaded to the idea of numerical modeling of the oven drop test which will enable detailed examination opportunities. It is possible to improve a product in the design phase by a validated numerical model. It will make design phase more faster and cheaper. It will be possible to analyse a part design for a drop test without any real production. This will be most protitable outcome of the study.

In this thesis, a literature study is carried out and it is seen that detailed numerical modeling for drop test is not common in domestic appliances sector which constitutes another motivation of this thesis. Following the literature study, it is determined that numerical model will be made on Hypermesh, a finite element modelling software, and that solver will be Radioss which is coded by Altair.

Expanded polystyrene and sheet steels are the basic materials that shall be subject to the impact during oven drop test. While certain electronic components in the system are disregarded, parts with a greater mass are modeled, such as motors. In order to see plastic deformations on the sheets, material models in Radioss solver are examined. Suitable material model is determined and accordingly, relevant parameters for this material card are identified for the sheets that are used in the oven. Glass and plastic parts is also modelled for calculate the oven mass correctly.

Mechanical behaviour of the expanded polysytrene is depending on the strain speed which is the biggest difficulty for the numerical modeling thereof. Air in an EPS material is another problem in modelling of that. Mechanical behaviour of a polymer foam affect directly from interior air and this situation makes modelling of EPS complicated. A detailed literature study is carried out for numerical modeling of the polysytrene. Potential material models that are usable in the Radioss are determined and in order to detect the most convenient one, pro numerical models are made. As a

consequence, Law 33 material model is deemed pertinent which enables to insert stress-strain curve in the model. Material model with an ability to catch strain rates on EPS is also studied. Absence of test machine, test for specify mechanical properties could not be made. However, experimental studies showed that numerical model is catch the test results of drop test from 40 cm very well. In consequence of that, this thesis triggered another research topic about designing a test machine for determine the strain rates effects on EPS.

Experimental studies and numerical model formulation are made simultaneously thus numerical model is as close as possible to the actual case. Within this scope, various drop tests with different positions are implemented to a prototypical oven and the results are compared with the numerical model outputs. Numerical model is justified with the test. Deformation areas and sizes that are calculated with the numerical model are similar to the test results. Crushes which are spotted on the EPS after the test are determined in the same area in the numerical model. Moreover, the period between the first crush of the stove to the floor and bounce thereof is recorded with a camera and it is seen that the mentioned period is calculated notably close in the numerical model. The rebound period is 0,034 secs according to the camera records which is calculated as 0,030 secs in the numerical model.

Comparison of the numerical results with the test results shows that numerical model catches deformations on the metal sheet parts very well. A condition to approve on the drop test of an oven is no visual damage on the product. Considering of that, numerical model with good accuracy on sheet parts will be very useful for the future studies.

Another check mark for the drop test is that oven must work properly. An example for this situation is observed during tests by seeing misalignment of fan engine shaft. This misalignment is measured 6 mm in test and calculated 5,5 mm in numerical model. This comparison is also showed precision of numerical model.

As an outcome of this thesis, a numerical model is made which enables a drop test to be performed in computer environment which is yet on designing stage. This numerical model shall not only reduce the number of actual drop tests and provide an advantage in terms of expenditures but also enables finding out designs that are suitable to fall in designing stage thus potential damages and redundant endeavours will be prevented. Another outcome of the numerical model is that it shall set a precedent to the design of polystyrene material. Through optimization processes realized in the numerical model, it will be possible to determine the optimum polystyrene material amount. By this means, unnecessary material use shall be obviated and transportation costs shall decrease due to the adequate size of the package of the product.

A justified numerical model for drop test is obtained along with this study. In order to improve this numerical model, glass material's mechanical characteristics shall be modeled accurately with a numerical model. By this means, glass breakage, which is a common risk for the goods with a broad glass area such as stoves, can be modeled realistically and convenient designs can be made faster with low costs.

In the thesis, another open for improvement aspect is to obtain EPS material's characteristics depending upon strain rate. Stress-strain curve which is acquired for the static charge of the model is substantially similar to the test results that are made on 40 cm. For the higher falling cases, EPS material's characteristics for higher strain rate conditions shall be obtained.

It is seen on the results that EPS components do not properly squeeze even in the flat drop test. Numerical results shows that inner sides of EPS component squeeze more than outer sides. Side walls are reason of of this situation. More developed EPS design can be acquirable by this knowledge. EPS material can be transfer to the outer sides of part from the inner sides.

High speed impact test device, a costly and a limited gadget in Turkey, will be produced with a sensitive measuring range due to another study arising from this thesis. Crash and fall resistant products will be manufactured along with this device and also, materials with impact damping capacity will develop faster. Experiments have shown that currently used materials are prone to lose their damping abilities in repetitive impact conditions. In case a product appears to have no damage after the first falling test, it is likely to have damages after the second or third falling tests. Falling tests will be carried out in a faster and sensitive manner and accordingly materials with higher damping ability will be produced through this device.

It will also improve the material characteristics which are used in a numerical model, thusly margin of error on the numerical model will be decreased.

According to this study results, improvements on the EPS piece design, will not only decrease the amount of EPS and reduce the costs but also will increase the resistance of the product to a fall. Impact resistant package design will decrease the thickness of a sheet metal in the stove and consequently will reduce manufacturing and material costs.

To sum up, this master thesis is done in cooperation with Arcelik Inc. and the finite element analysis of drop test for an ongoing oven design project is performed. By the results of this work cost reduction can be obtained by material topology optimization and design support can be given for parts of the oven. Numerical model is validated with experiments and the finite element model is acquired for the new oven design. This numerical model shall not only reduce the number of actual drop tests and provide an advantage in terms of expenditures but also enables finding out designs that are suitable for drop test during designing stage. Thus potential damages and redundant endeavours will be prevented.

1. GİRİŞ

Beyaz eşya ürünlerinin nakliyesi sırasında düşme riski sadece son alıcı noktasında değildir. Uluslararası nakliye edilme sürecinde çok sayıda araca yüklenip indirildiği için fabrikadan çıktıktan sonraki her anda bu risk bulunmaktadır. Bu durumu incelemek üzere belirli standart düşme testleri bulunmaktadır. Düşme testine tabi tutulacak ürünler, son haline getirilmiş olarak ve koruyucu malzeme ile desteklenerek nakliye edilmeye hazır halde iken test edilmektedir. Testteki amaç, ürünün nakliye sırasında düşmesi halinde oluşabilecek hasarları tespit etmek ve buna göre gerekli tedbirleri alarak olası hasarları önlemektir. Düşme sırasında ürünün alacağı darbeyi sönümlemek amacı ile geliştirilmiş polistren kullanılmaktadır. Bu nedenle, koruyucu olarak kullanılan geliştirilmiş polistren için optimum malzeme kalınlığını bulmak da testin önemli çıktılarından birisidir.

Düşme testi, ürüne üretim onayı verilmesinde de önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Bu testi bilgisayar ortamında sayısal olarak modellemek maliyet avantajı sağlayacağı gibi sonuçların daha detaylı incelenmesini de kolaylaştıracaktır. Örneğin; gerçek bir düşme testinde hem ürüne yerleştirilebilecek ölçüm aletleri kısıtlıdır, hem de ürünün iç kısımlarında yer alan parçaların düşme sırasındaki hareketlerini görsel olarak izleyebilmek mümkün değildir. Bunun yanı sıra, tasarıma sonradan eklenebilecek parçalar için de düşme testi yapılması gerektiği düşünülürse maliyet katlanarak artmaktadır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilecek düşme testi ile sonuçlar hem daha detaylı incelenebilecek hem de daha düşük maliyetle ve daha kısa sürede elde edilebilecektir. Ek olarak, hazırlanan sonlu elemanlar modeli sayesinde ürüne tasarım aşamasında müdahale imkanı doğacaktır. Bu durum tasarım sürecini daha kolay ve hızlı yapmakla beraber düşme testi sonucu elenecek tasarımlar önceden belirlenecek ve gereksiz iş gücü kaybı önlenecektir.

Firma bünyesinde sabit raf mekanizmasına sahip fırın imal edilmektedir. Ancak tepsi konumunun otomatik olarak ayarlanabileceği hareketli raf sistemine sahip fırınlar tasarım aşamasındadır. Çalışma kapsamında bu yeni tasarlanan hareketli raf sistemine sahip olacak ev tipi bir fırının düşme testi, sayısal olarak modelleneyecektir. Analiz

alışması sayesinde hareketli raf sistemine sahip bir fırının tasarımı bitmeden bilgisayar ortamında düşme testi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, hazırlanan modele bazı değışiklikler yapılarak hareketli raf mekanizmasına odaklanmış statik veya modal analiz gerçekleştirmek mümkündür. Bu sayede prototip aşamasında iken yeni tasarımdaki tehlikeli bölgeler tespit edilebilecektir. Sayısal modeli doğrulamak için muhafazalı ve nakliye hazır fırına düşme testi uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde koruyucu olarak kullanılacak polistren için hasarın oluşmayacağı minimum malzeme kalınlığının belirlenmesi de hazırlanan model sayesinde mümkün olacaktır.

1.1 Literatür

1.1.1 Düşme testi hakkında yapılmış çalışmalar

Literatürde düşme testi hakkına yapılmış çalışmalar özellikle cep telefonu için çok sayıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, beyaz eşyaların düşme testi üzerine sayısal model hazırlamaya odaklanmış çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

Arçelik A.Ş. ve İTÜ işbirliği ile Görücüoğlu'nun hazırladığı “Çamaşır Makinası Düşme Testi Deney Ve Simulasyonu” yüksek lisans tezi bir beyaz eşya ürününe düşme testi gerçekleştirdiği için bu çalışma için önemli bir başvuru noktasıdır [1]. Çalışmada ileri ve geri farklar yöntemi arasındaki farklılıklara değinilmiş ve bilgisayar modeli oluşturma aşamaları sırasıyla anlatılmıştır. Hazırlanan modeldeki eleman boyutlarının büyük olması nedeniyle parça özelinde gerilme değerlerini hesaplamak mümkün olamamıştır, fakat sistemin genel davranışını görebilmek ve yeni bir tasarıma başlayabilmek için yeterli bir hesap gerçekleştirilmiştir.

Beyaz eşya ürünleri üzerine olmasa da düşme testi hakkında yapılmış diğer bir çalışma Gerçeker'in “Köpük Malzeme Entegre Edilmiş Mühimmat Düşürme Testleri Simülasyonları Ve Köpük Malzemelerin Boyutsal Optimizasyonu” isimli yüksek lisans tezidir [2]. Bu çalışma askeri mühimmatların nakliye ve depolanması sırasında olası düşme durumu bilgisayar ortamında modellenmiştir. Mühimmatlardaki köpük malzeme bu çalışmada modellenmiş ve köpüğün modellenmesi sırasında karşılaşılan zorluklara değinilmiştir. Gerçekleştirilen fırın çalışmasında da köpük malzemenin koruyucu olarak kullanılması nedeni ile sayısal modelin kullanılmasında karşılaşılan problemlerin çözülmesinde Gerçeker'in çalışması oldukça yol gösterici olmuştur.

Gerçeker'in çalışmasının ana hedefi mühimmatın nakliyesi sırasında kullanılan köpük geometrisinin numerik yöntemler ile belirlenmesidir. Bu amaçla farklı köpük geometrileri sayısal olarak incelenerek en uygun olanı seçilmiştir. Ayrıca, sayısal çözüm için gerekli olan malzeme özelliklerinin literatürde bulunmasının zor olduğuna değinilmiş ve bu özellikler deneysel olarak tespit edilmiştir. Bir düşme kulesi kullanılarak köpüğün yüksek hızlı çarpma durumundaki davranışı belirlenmiştir.

Neumayer, Chatiri ve Höermann'ın hazırlamış olduğu "Drop Test Simulation of a Cooker Including Foam Packaging and Pre-stressed Plastic Foil Wrapping" isimli çalışmada bir fırının düşme testi ele alınmıştır [3]. Bu çalışmada fırın detaylı olarak modellenmiş ve EPS parçalara ek olarak ön gerilmeli halde en dışta yer alan plastik folyo da dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında bazı parçalar ağ yapısı ile modellenmektense noktasal kütle olarak sayısal modele yerleştirilmiştir. Yapılan test sonucunda EPS parçalarda meydana gelen hasarların sayısal modelde de riskli bölgeler olarak ortaya çıktığı görülmüştür.

Posch ve Sageder'in gerçekleştirmiş olduğu çalışmada bulaşık makinesinin paslanmaz çelik olan iç saclarının polipropilen malzemeye dönüştürülmesi amaçlanmıştır [4]. Yeni malzeme alternatifi için bilgisayarda sayısal model hazırlanarak düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı düşme yönlerinde ve açılarında analizler tekrarlanmıştır. Analizlerde bulaşık makinesinin dışındaki EPS parçalar modellenmiş ve şekil değiştirme hızına bağlı olarak değişen mekanik özellikleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak hazırlanan sayısal modelin yardımıyla malzeme dönüşümü gerçekleştirilmiş ve maliyet avantajı sağlanmıştır.

Öztürk'ün Arçelik A.Ş. ile birlikte hazırladığı "Düşük Yoğunluklu Polimer Köpük Malzemelerin Birden Fazla Yükleme Altındaki Mekanik Davranışı" doktora çalışmasında köpüklerin yüksek hızlı darbelerdeki davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir[5]. Çalışmada yüksek hızlı darbe test makinesi tasarlanmış ve köpük malzeme için gerçekleştirilen darbe testleri hazırlanan test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Öztürk'ün çalışmasında geliştirilmiş polistiren ve polietilen köpük malzemelerin tek eksen, kayma, hidrostatik yükleme gibi farklı yükleme koşulları için mekanik deneyleri gerçekleştirilmiş ve malzeme özellikleri detaylı olarak tespit edilmiştir. Bulunan malzeme özellikleri ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel çıktılar ile karşılaştırılmıştır. Özellikle tekrarlı yükleme durumlarında malzemenin enerji

sönümleme ve reaksiyon kuvvet değerlerindeki değişimler üzerine odaklanılarak literatürde o ana kadar bulunmayan veriler elde edilmiştir.

Lönn ve Navred'in hazırladığı “Yumuşak İçecek Paketi Düşürme Testi” çalışması hem düşme testi için bir ağ yapısı hazırlandığı hem de bu modelin gerçek bir düşme testi ile doğrulanmasını içerdiği için benzer konuda yapılmış yararlı bir çalışmadır [6]. Lönn ve Navred bu çalışmada içecek ve içecek kabı arasındaki ilişkiyi gerçeğe oldukça yakın bir şekilde modellemiştir. Parça üzerindeki şekil değişimlerinde sayısal modelinin sonuçları ile deney sonuçları arasında ciddi bir farklılık olmadığını belirlemişlerdir. Test sonuçlarında genellikle alt yüzeyden hasar gören paket ile uyumlu olarak, sayısal analiz sonuçlarında da yüksek gerilme değerleri alt yüzeyde hesaplanmıştır. Sonuç olarak modelin geliştirilmesinin sızdırmazlığı sağlayan bağlantı ve malzeme modelinin geliştirilmesi ile mümkün olacağı belirtilmiştir.

Martinez ve Vicencio'nun gerçekleştirdiği “Using Computer Aided Engineering Processes in Packaging Design Development” isimli çalışma bir çamaşır makinesinin ambalaj konstrüksiyonunun optimizasyonuna odaklanmıştır [7]. Bu çalışmada ağ yapısı deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Kullanılan genişletilmiş polistren malzeme için çarpma hızına uygun malzeme özellikleri deneyler ile belirlenmiştir. Ardından gereksiz polistren malzeme kullanımını önlemek ve optimum malzeme geometrisini elde etmek için ağ yapısında bir tasarım hacmi tanımlanarak optimizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Martinez ve Vicencio'nun çalışmasında sonuç olarak farklı düşme alternatifleri için tasarlanan genişletilmiş polistren geometrisiyle tekrar çözdürülmüş ve düşüş açısına bağlı olarak tepki kuvvetlerinde %3-30 arası azalma hesaplanmıştır.

Literatür incelemesi sonucu son yıllarda düşme ve çarpma testlerinin sayısal olarak modellenmesi çalışmalarının arttığı görülmüştür. Fakat beyaz eşya sektöründe bu çalışmalar ambalaj malzemesini modellemenin zorluğu ve ürünleri oluşturan parçaların geometrilerinin karmaşıklığı nedeniyle kısıtlı kalmıştır. Bir fırının ayrıntılı olarak ağ modelinin oluşturulması ve bu ağ modelinin test ile doğrulanması hakkında bir çalışmanın bu nedenle faydalı olacağı düşünülmüştür.

1.1.2 Standartlar

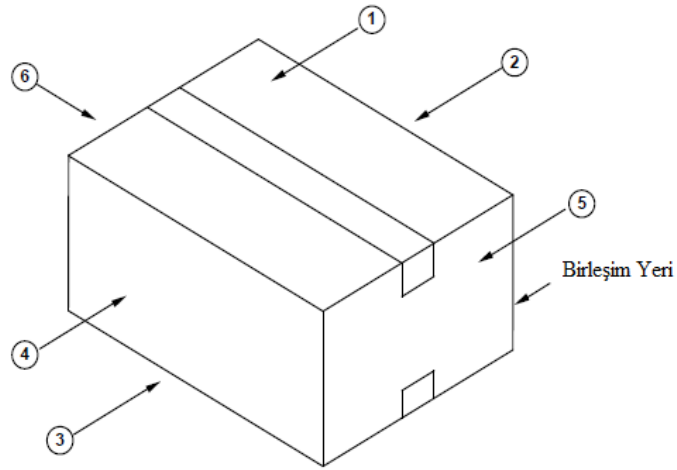
Paketlenen ürünler için düşmenin yanı sıra titreşim ve sıvı geçirgenliği için de standartlar bulunmaktadır. Ancak, ASTM D5276 “Muhafazalı Ürünün Serbest Düşme

Testi Test Methodu” ile ASTM D880 “Nakliye Muhafazası ve Sistemleri Darbe Testi Standart Test Metodu” standartları düşme ve darbe testlerine odaklandığı için bu tez çalışması için oldukça önemlidir [8, 9].

ASTM D5276 standardı, muhafazalı ürünlerin serbest düşme sırasında karşılaşılabilecek ani yüklemelere dayanabilirliğini ölçmek amacıyla hazırlanmıştır. Aynı zamanda farklı muhafazaların performanslarını karşılaştırmak için de kullanılmaktadır.

Standartta göre ürün son haline getirilerek alıcıya teslim edileceği şekilde paketlenmelidir. Ayrıca bir düşme test düzeneği hazırlanmalı ve bu düzenek test numunesinin belirlenen açılarda düşürülmesine imkan tanınmalıdır. Bırakma mekanizması sisteme herhangi bir kuvvet uygulamamalıdır. Çarpma yüzeyi zemine paralel ve çarpma etkisiyle şekil değiştirmeyecek kadar rijit olmalıdır.

Şekil 1.1’de dikdörtgenler prizması şeklindeki bir ürün için yüzeylerin nasıl tanımlandığı görülmektedir. Ürüne tam karşıdan bakan bir gözlemciye göre yüzeyler numaralandırılmıştır. Buna göre, üst yüzey 1, gözlemcinin sağında kalan yüzey 2, alt yüzey 3, solunda kalan yüzey 4, karşısında kalan yüzey 5 ve arkada kalan yüzey 6 olarak isimlendirilir. Çalışma kapsamında hazırlanan fırının düşme testi için bu yüzeyler, fırının kullanım konumuna göre isimlendirilmiştir.



Şekil 1.1 : ASTM D5276 standartına göre düşme testinde yüzeyler.

Aynı standart düşme testine başlamadan önce kesin bir hasar kriteri kabulü yapılmasını önerir. Fırın için bu gözle görülür herhangi bir hasar olmaması ve fırının çalışmasında herhangi bir sorun olmaması olacaktır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen testler prototip bir model üzerinden gerçekleştirildiği için testler sonrasında ürünün

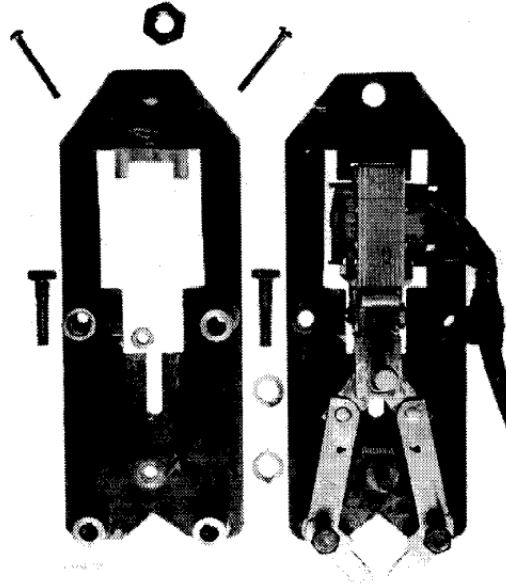
alışması kontrol edilmemiş, çalışma saclar ve diğerk mekanik parçalar üzerine odaklanmıştır.

Temel bir test olan düz düşme testi için ASTM D5276 standartı çarpma anında ürünün taban yüzeyi ve zemin arasında 2 dereceden fazla bir aı olmamasını şart koşmaktadır.

Kenar zerine düşmeler için ise benzer bir şekilde çarpma kenarının zemin ile 2 dereceden fazla aı yapmaması gerekmektedir.

Standartta düşme yüksekliğı hakkında herhangi bir öneri olmamakla beraber test raporunda yer alacak yükseklik değerinin düz düşmeler için tabandan, kenar düşmeleri için ise zemine en yakın kenardan ölçülmesi gerektiğı belirtilmiştir.

ASTM D5276 standartı test yapılacak ürüne bırakma sırasında herhangi bir kuvvet uygulamayan kanca ve bırakma mekanizmaları önermektedir. Önerilen bırakma mekanizması şekil 1.2’de görülebilir. rn kaldırılırken bu sistem alt kısımda bulunan tutucuları bir yay yardımıyla kapalı tutmakta ve bu tutucu mekanizması test uygulanacağı zaman dışarıdan bir tahrik ile açılmaktadır.



şekil 1.2 : ASTM D5276 standartına göre bırakma düzeneğı.

5. bölüm olan Deneysel Yaklaşım bölümünde çalışma dahilindeki testlerde kullanılan test düzeneğı görülebilir.

Diğerk bir standart olan ASTM D880 kodlu darbe testi standartı ASTM D5276’ye göre daha geniş olarak darbeye kalma riski mevcut olan tüm yüzeyler için bir test metodu

getirmiştir. Bu standartta muhafaza parçalarının ürüne yerleştirilmeden önceki durumları için de test önerileri mevcuttur. Önerilen test düzeneğinde ürüne bir ilk hız verilebileceği belirtilmiştir. Düzenekteki çarpma yüzeyinin özelliklerinin standartları ASTM D5276 standardı ile benzerdir.

Belirtilen bu standartlar düşme testi düzenekleri için bir kriter belirtmekle beraber düşme yüksekliği için bir kabul yoktur. Bu nedenle Arçelik A.Ş. bünyesinde yapılan düşme testleri ve test firmalarının deney talimatları incelenmiştir. Sonuç olarak düşme testinin gerçekleştirileceği yükseklikte ağırlıkla değişen bir kabul olduğu görülmüştür. Benzer testlerde ürün ağırlığına göre gerçekleştirilen düşme yükseklikleri Çizelge 1.1’de görülebilir.

Çizelge 1.1 : Ürün ağırlığına göre düşme testi yüksekliği [10].

Ağırlık	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

Çalışmada kullanılan fırın 50 kg’dır. Genel yükseklik kabulüne göre bu ağırlıktaki bir ürün için düşme testi 25 cm olması gerekmektedir. Fakat firma bünyesindeki araştırmalara göre nakliye sırasında karşılaşılan hasarların 40 cm ve üzeri düşme testi yükseklikleriyle benzerlik göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamındaki testler ve sayısal modellerin çözümleri 40 ve 70 cm yükseklikten gerçekleşecek düşme durumu için ele alınacaktır.

1.1.3 Deney talimatı

Arçelik A.Ş. bünyesinde de nakliye sırasında karşılaşılabilecek durumları modelleyen testler hazırlanmış ve bu testler talimatlarla standartlaştırılmıştır.

Ambalajlı haldeki ürünlere uygulanan temel testler ASTM standartlarındakilere benzer şekilde düz düşme ve açılı düşme testleridir. Bu testler sonucunda üründe, çalışmasını ve görselliğini etkileyen bir hasar bulunmamalıdır. Bu testlerin dışında

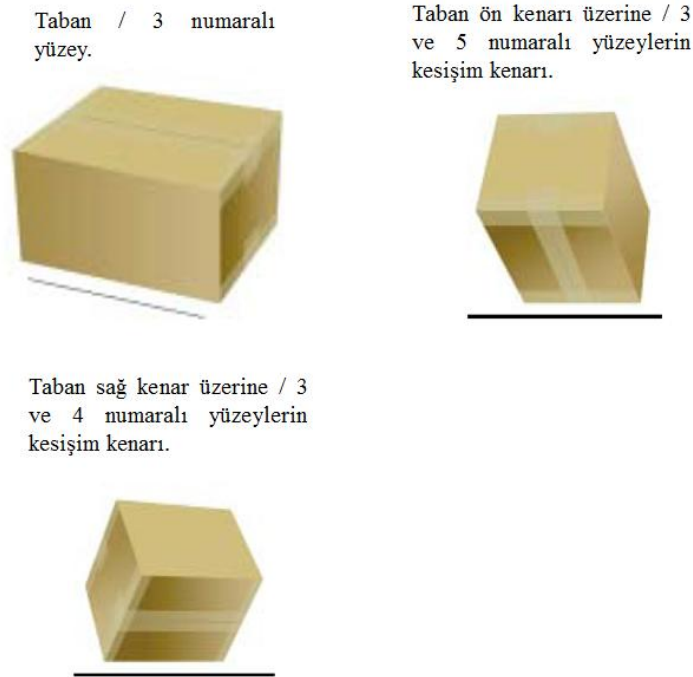
Çarpma, istif, sıkıştırma ve titreşim testleri de nakliyeye hazır paketli ürünlere yapılmaktadır.

Titreşim testinde amaç ürünün nakliye sırasında maruz kalacağı yol koşullarını oluşturmaktır. Bu amaçla ürün nakliyeeye hazır bir şekilde ambalajlı olarak ve mşteriyeye teslim edilecek olan aksesuarlarıyla birlikte hazırlanır. Ardından rn 15-30 Hz frekans ve 1-2 m/sn² aralığında test edilir. Test süresi ürünün nakliye edileceği mesafeye göre belirlenmektedir. Buna göre yakın mesafeler için 30 dakika, uzun mesafeler için ise 60 dakika süreyle test devam ettirilir [11].

Düşme testinde ürünün düşürüleceği yükseklik ürünün ağırlığına göre belirlenmektedir. Buna göre hafif ürünlere daha yüksek bir mesafeden düşme testi uygulanırken, ürün ağırlaştııka düşme yüksekliği azalmaktadır.

Arçelik Fırın İşletmesi'nde ürünlere düşme testi gerçekleştirilirken ürün sırasıyla, taban üzerine düz olarak, n kenar üzerine ve sağ kenar üzerine düşürülmektedir. Kenar zerine düşürme testlerinde ürün ile zemin arasında 10⁰ aı olması sağlanmaktadır.

şekil 1.1'de belirtilen yüzey numaralarına göre düşme testinin gerçekleştirileceği konumlar şekil 1.3'de bulunmaktadır.



şekil 1.3 : Gerçekleştirilecek olan düşme pozisyonları.

2. DÜŞME TESTİNDE DARBE ETKİSİNDE KALAN MALZEMELER

2.1 Genleştirilmiş Polistren

Genleştirilmiş polistren malzemeler enerji sönümleme yetenekleri nedeniyle paketlenme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte kolaylıkla hasar görebilir ve çoklu darbeler için uygun değildir. Çalışmada kullanılan fırının ambalajında da nakliye sırasında kullanılmak üzere köpük malzeme olarak genleştirilmiş polistren (EPS) kullanılmıştır.

Bu tür malzemelerin üretimine ve değişkenlerine kısaca değinmek ağ yapılarının modellenmeleri açısından da faydalı olacaktır.

Ambalaj olarak kullanılan genleştirilmiş polimer malzemelerin içeriğinde 2 bileşen vardır. Rijit veya elastik olabilen ana matris malzeme ve bahsedilen bu matris malzemenin aralarını dolduran gaz malzeme.

Genleştirilmiş polimer morfolojisinde yer alan hücrelerin açık veya kapalı formda olmasına göre bu gaz, hücrelerin içerisinde hapsolabilir veya üretimde matris malzemeye şekil verdikten sonra yapıdan ayrılabilir. Şekil 2.1’de aynı miktarda polistren malzemenin baz ve genleştirilmiş halinin hacim karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.1 : Polistren malzemenin baz ve genleştirilmiş hali [12].

Matris malzemenin esnek veya rijit olması enerji sönümleyici bir malzeme için önemli bir parametre olan malzemenin darbe sonrası geri esneyerek eski halini kazanma

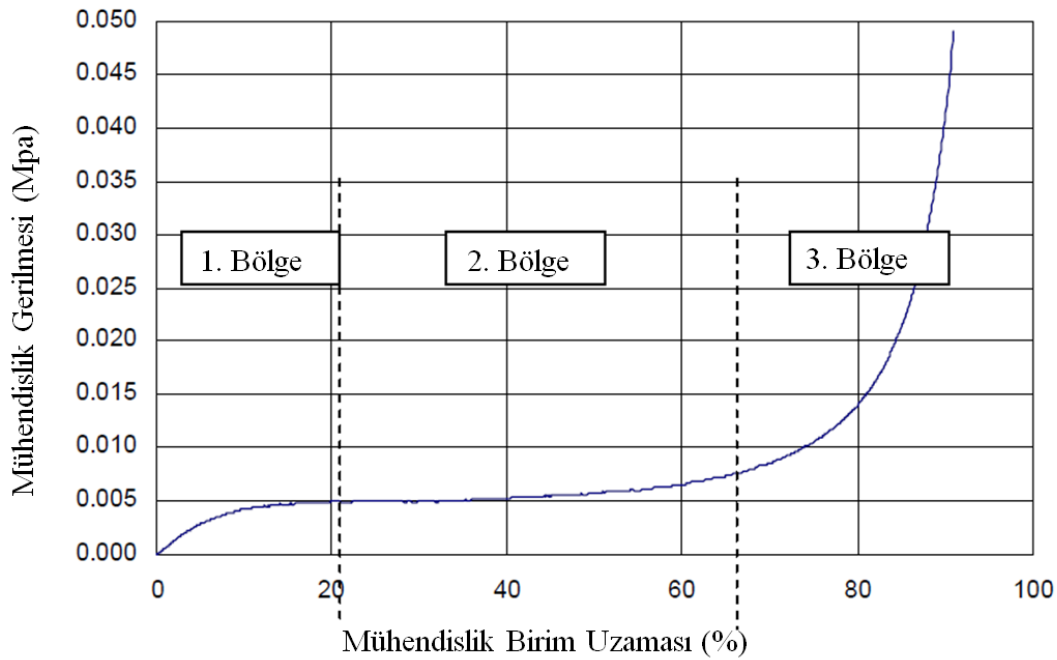
yeteneğini etkilemektedir. Örneğin; bu çalışma kapsamında kullanılmış olan polistren içeren genleştirilmiş malzemede geri esneme yeteneği oldukça düşüktür. Bunun aksine polietilen ve polipropilen kullanılarak üretilen bir ambalaj malzemesinde, uygun bir konstrüksiyonun da yardımıyla geri esneme yeteneği yüksek olan yapılar elde edilebilmektedir.

2.1.1 Mekanik davranışı

Genleştirilmiş polistren malzemeler kuvvet karşısında anizotropik davranış göstermektedir. Sıkıştırma yönünde sergiledikleri yüksek enerji sönüm yeteneğine ve dayanıklılığa rağmen kesme ve çekme yönünde dayanımları oldukça düşüktür.

Çarpma testlerinin çoğunda olduğu gibi bu çalışmada da polistren malzeme basma yani sıkıştırma yönünde çalışmaktadır. Bu nedenle polistren malzemenin sıkışma yönündeki davranışını sayısal modelde kabul edilebilir bir hata payıyla modellemek çalışmanın birincil hedeflerindendir.

Malzemenin sıkıştırma yönündeki uzama-gerilme ilişkisi 3 bölgeye ayrılabilir.



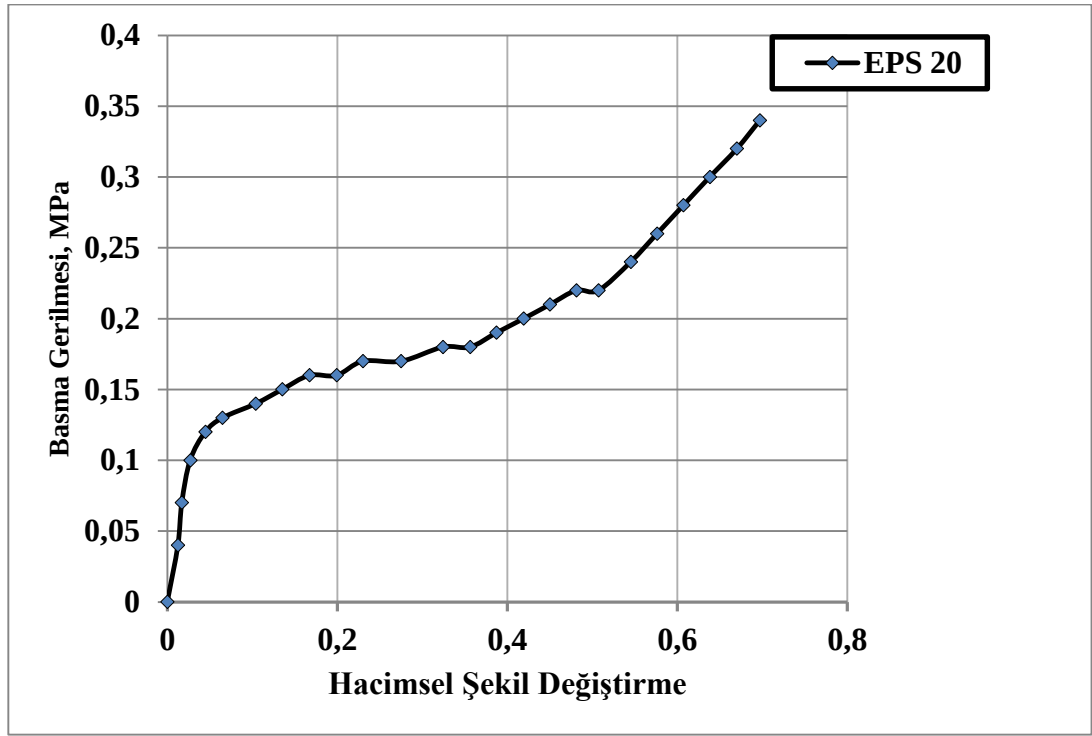
Şekil 2.2 : Genleştirilmiş polistren malzemenin uzama-gerilme eğrisi [13].

Şekil 2.2’de yer alan eğrinin birinci bölgesinde matris malzemenin baskınlığı vardır. Bu bölümde matris malzeme sıkışmakta ve şekil değiştirmekte iken genleştirilmiş polistrenin içerisinde bulunan gaz molekülleri henüz sıkışmaya başlamamıştır.

Plato olarak adlandırılan ikinci bölgede ise genişletilmiş polistrendeki boşluklarda bulunan gaz, yapının morfolojisine göre açık kanallardan çıkmış veya matris malzemenin oluşturduğu hücreleri parçalayarak atmosfere karışmıştır. Bu bölgenin uzun olması köpüğün enerji sönüm yeteneğini etkileyen önemli bir etkidir.

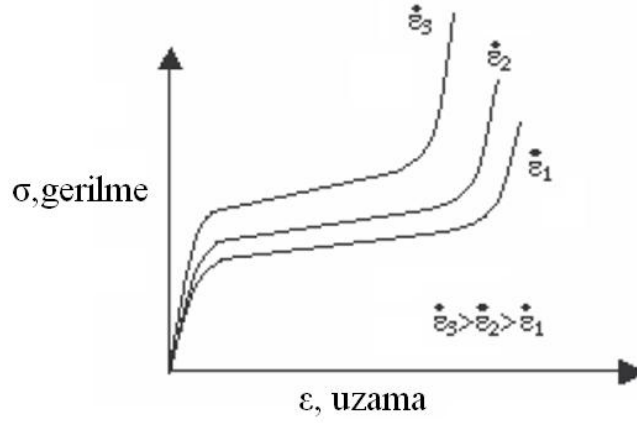
Üçüncü bölgede ise artık genişletilmiş polistrendeki gaz boşalmış ve matris malzeme sıkışmaya başlamıştır. Bu bölge matris malzemenin mekanik özellikleri ile benzerlik göstermektedir.

Çalışma kapsamındaki fırının ambalajında 20 kg/m^3 yoğunluğundaki genişletilmiş polistren kullanılmıştır. Bu malzemenin uzama-gerilme eğrisi Şekil 2.3'te görülebilir. Bu eğri hazırlanan sonlu eleman modelindeki malzeme modelinde de kullanılmıştır.



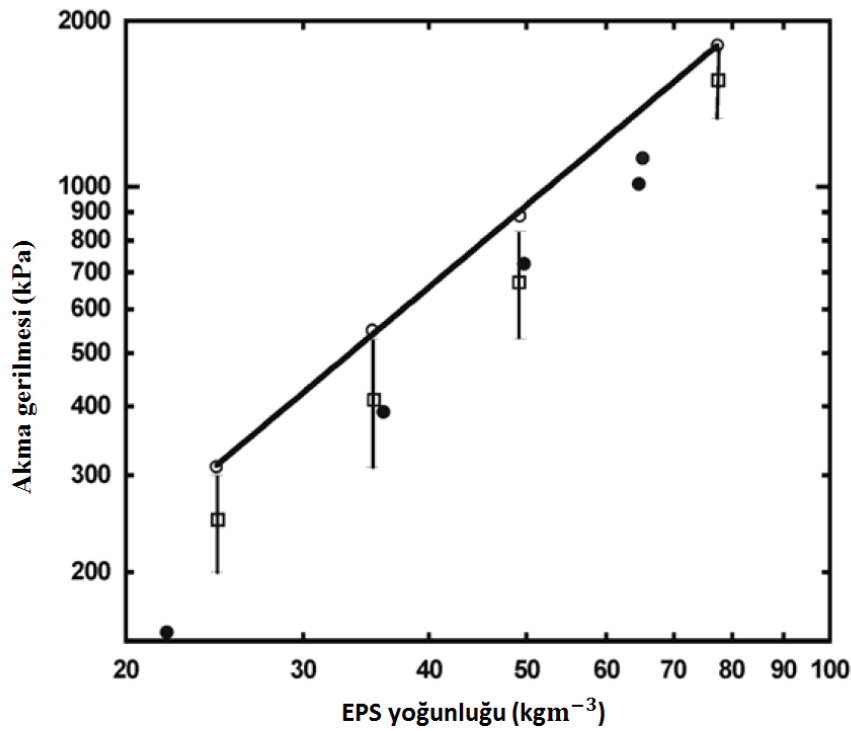
Şekil 2.3 : 20 kg/m^3 yoğunluğundaki genişletilmiş polistrenin uzama-gerilme eğrisi [12].

Genleştirilmiş polistren malzemenin modellenmesindeki ayrı bir zorluk ise uzama-gerilme eğrisinin uzama hızına bağlı olmasıdır. EPS malzemelerde sıkışma hızı arttıkça malzemenin direnci artmakta ve aynı sıkışma miktarında daha yüksek gerilme görülmektedir. Şekil 2.4'te bu durumun gerilme-uzama eğrisi görülebilir.



Şekil 2.4 : Genleştirilmiş polistren malzemenin uzama hızına bağlı uzama-gerilme eğrisi.

EPS'nin akma gerilmesinin yoğunluk ile değişimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi yoğunluk arttıkça akma dayanımı da artmaktadır.



Şekil 2.5 : EPS yoğunluk-akma gerilmesi ilişkisi [14].

Düşme testi benzeri çarpma testlerinde EPS türü malzemelerin modellenmesindeki en önemli iki zorluk bu malzemelerin uzama-gerilme ilişkilerinin şekil değiştirme hızına bağlı olması ve gaz içeren yapılarıdır. Örneğin; yüksek hızda sıkıştırılan EPS malzeme aynı sıkıştırma miktarına quasi-statik olarak getirildiğinde daha düşük gerilme oluşmaktadır. Şekil değiştirme hızının etkisi hız yükseldikçe artmaktadır ve çok

yüksek hızlarda malzemenin statik durumunun malzeme özelliklerinin kullanılması sayısal analizlerde hatalara yol açabilir. Fırında kullanılan 20 kg/m³ yoğunluğundaki EPS'nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de yer almaktadır.

Çizelge 2.1 : Fırında kullanılan EPS malzemenin fiziksel özellikleri [12].

Yoğunluk	20 kg/m ³
%10 sıkıştırma durumunda basma gerilmesi	110-140 kPa
Elastiklik Modülü	3.5-4.5 MPa
Paketlemeler için kabul edilebilir basma gerilmesi	39 kPa
Kesme Dayanımı	124-154 kPa
Çekme Dayanımı	230-330 MPa

2.1.2 Şekil Değiştirme Hızının Etkisi

Genleştirilmiş polistrenin malzeme özelliklerinin şekil değiştirme hızına çoğu malzemeye göre daha bağlı olmasının iki ana nedeni vardır.

İlk neden malzemedeki odacıkların çemberlerini oluşturan polimer malzemenin özelliklerinin şekil değiştirme hızıyla değişmesidir. Eyring'e göre polimer bir malzemenin akma dayanımının şekil değiştirme hızıyla değişimi Denklem (2.1) ile ifade edilir.

$$\sigma_a = \frac{kT}{v_{act}} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{C_3}\right) \quad (2.1)$$

Denklemde σ_a polimer malzemenin akma dayanımı [MPa], k bolzmann sabiti, T sıcaklık [K], v_{act} aktif hacim [mm³], $\dot{\epsilon}$ deformasyon hızıdır [mm/sn]. C_3 ise sıcaklığa bağlı bir değişkendir.

İkinci nedeni ise malzemenin davranışının, yapı içindeki akışkanın şekil değiştirme sırasındaki davranışına bağlı olmasıdır. Beyaz eşya ambalajları da dahil olmak üzere

çoğu durumda bu akışkan havadır ve köpükteki açık hücre yapısı nedeniyle şekil değiştirme sırasında hücreler sıkışarak hava dışarı çıkmaktadır.

Bu iki etkenin birleşimi dikkate alınarak polimer köpük malzemenin dayanımı için sayısal bir ifade belirlenebilir. Literatürde yapılan genel bir kabule göre polimer köpüklerin dayanımı şekil değiştirme hızının logaritmasına göre lineer olarak artmaktadır. Bunu denklem olarak yazarsak;

$$\dot{\sigma}_{pl} = (\dot{\sigma}_{pl})^0 \left(1 - \frac{AT}{T_g}\right) \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}}\right) \quad (2.2)$$

Denklemden $(\dot{\sigma}_{pl})^0$ ifadesi 0 Kelvin'deki polimer köpüğün çökme gerilmesini, T_g ise polimerlere ait bir özellik olan camlaşma sıcaklığını, [MPa] belirtmektedir.

Literatürde EPS malzemenin düşük, orta ve yüksek hızlı şekil değiştirme hızlarına göre gerilme davranışına ilişkin çalışmalar vardır. Fakat malzemenin davranışının yoğunlukla da ilişkili olması ve geniş şekil değiştirme hızı aralığı nedeniyle tam olarak istenen veriyi bulmak zordur. Bu nedenle EPS'ye yüksek hızlı darbe deneyi uygulanabilecek test düzenekleri araştırılmıştır.

2.1.3 Darbe Test Düzenekleri

EPS malzemelerin özelliklerinin yüksek hızlı şekil değiştirme durumlarında farklı olduğu anlaşıldıktan sonra gerçeğe daha yakın bir sayısal model elde edebilmek için EPS malzemenin gerçekleştirilecek test koşullarındaki malzeme özelliklerini deney ile elde edilmesi düşünülmüştür. Çalışmanın birincil amacı olmadığı ve çalışma süresini uzatacağı gerekçesiyle bir deney düzeneği tasarlanmamış, bunun yerine testin gerçekleştirilebileceği bir test merkezi araştırılmıştır.

Sonuç olarak malzemelerin darbe yükleri altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla düşme kulesi olarak da adlandırılan darbe test düzeneklerinin piyasada mevcut olduğu bulunmuştur. Belirli bir yükseklikten düşen ağırlığın etkisini incelenmesinin yanı sıra ağırlığa istenilen hızın verilmesi de bu cihazlarda mümkündür.

Araştırıldığında Türkiye'de Instron firmasının darbe test cihazlarının bulunduğu öğrenilmiştir. Fırın düşme testi çalışması dahilinde oluşması muhtemel 1 metreye

kadar yüksekten bırakma durumunu modelleyen Ceast 9350 modeli Şekil 2.6’da görülebilir.



Şekil 2.6 : Instron Ceast 9350 darbe test cihazı.

Cihazın temel mekanik özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.2’de görülebilir.

Çizelge 2.2 : Instron Ceast 9350 darbe test cihazı teknik özellikleri [15].

Darbe Hızı	0.77 – 4.65 m/s
Düşme Yüksekliği	0.03 – 1.10 m
Düşme Kafası Ağırlığı	2 – 70 kg

Düşme testinde fırın 20-70 cm arasında bir yükseklikten bırakılmaktadır ve EPS malzemenin bu sırada maruz kalacağı şekil değiştirme hızının etkisini görmede Ceast 9350 test cihazı yeterli olmaktadır.

Türkiyede bu ve benzer kapasitedeki muadil darbe test cihazlarının Tubitak MAM, İTÜ Malzeme Fakültesi ve Tubitak Bursa Test ve Analiz Laboratuvarında olduğu tespit edilmiştir. Fakat cihazlarda genellikle plastik malzemelerin darbe altında kırılma testleri gerçekleştirildiği için EPS'yi sıkıştırmakta gerekli ek parça bulunmamaktadır. Bu nedenle test gerçekleştirilememiştir.

Bunun sonucunda çalışılan fırın düşme testinin sayısal olarak modellenmesi çalışması, polimer köpük malzemelerin darbe yükleri altındaki davranışının incelenmesi için gerekli test cihazının tasarlanması çalışmasını da tetiklemiştir. Bu çalışma da 2014 yılı itibarıyla İTÜ ve Arçelik A.Ş. işbirliği ile yürütülmektedir.

2.2 Metal Malzemeler

Fırında ısıya maruz kalan sacalr DC04 kalitesindedir. Bu kalite saclar derin çekme işlemine uygun, düşük karbonlu ve beyaz eşya üretimine uygun saclar olarak nitelendirilmektedir. Mekanik özellikleri Çizelge 2.3'te yer almaktadır.

Çizelge 2.3 : DC04 sacın mekanik özellikleri [16].

	Maksimum Akma Gerilmesi (Mpa)	Kopma Gerilmesi (Mpa)	Kopma Uzunluğu (%)
DC04	210	270-350	38

Diğer saclar ise DX53 kalite sactır. Bu saclar soğuk şekil vermeye uygun, galvanize çelikler olarak nitelendirilmektedir. Mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 : DX53 sacın mekanik özellikleri.

	Akma Gerilmesi (Mpa)	Kopma Gerilmesi (Mpa)	Kopma Uzunluğu (%)
DX53	140-260	270-380	38

3. FIRIN DÜŞME TESTİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

3.1 Sonlu Eleman Yaklaşımı

Sayısal model kurulmaya başlanmadan önce kullanılacak algoritmanın seçilmesi gerekmektedir. Yapılan bu tercihe göre piyasada bulunan ticari sonlu elemanlar analizi yazılımlarının arasından uygun bir çözücü tercihi yapılmış ve model bu çözücüye uygun olarak hazırlanmıştır.

Sonlu elemanlar metotunda algoritma tercihi için iki seçenek bulunmaktadır. İlki her zaman adımı için tekrarlı çözüm gerektiren implicit, ikincisi ise buna ters olarak tekrarlı adımdan olabildiğince kaçınan explicit algoritmadır. Explicit çözümde model küçük zaman adımları için çözülerek sonraki adımın sonucu önceki adımdan gelen bilinen veriler sayesinde bulunmaktadır. Implicit algoritma da ise model tekrarlı yaklaşımla çözülerek sonuca yaklaşılmaktadır.

Çarpma, darbe gibi yüksek hızlı analizler için küçük zaman adımı gerektiği için explicit çözücü kullanmak gerekmektedir. Statik analizler için ise implicit algoritma avantajlı olmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında hazırlanan sonlu elemanlar modelini çözmek için explicit algoritma kullanan bir çözücü kullanılacaktır. Explicit çözümün en önemli dezavantajı küçük zaman adımları nedeniyle nihai sonuca oluşmanın uzun sürmesidir. İlerleyen bölümde implicit algoritmanın temeli ve kullanılan explicit çözücünün algoritması anlatılacaktır.

Implicit yöntem temel olarak Newton-Raphson Metot'una dayanmaktadır. Buna göre;

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de, K_t rijitlik matrisini, F uygulanan yük vektörünü, I sistemin iç kuvvet vektörünü ve Δu deplasman adımını belirtmektedir. (3.1) denklemi dinamik problemlere uygun olarak geliştirilebilir [17].

3.1.1 Explicit Algoritmada Zaman Adımı

Explicit analizler için zaman adımı önemli bir değişkendir. Teorik olarak analizdeki zaman adımının kritik bir zaman adımında küçük olması gerekmektedir. Aksi durumda denklemin çıktılarında gerçekte olmayan hatalar görülecektir. Hazırlanan modeli çözdürürken hesaplanan zaman adımının modelin sonlu eleman ağındaki tüm frekansları uyaracak kadar küçük olması gereklidir. Bu da ancak şok dalgasının ağıdaki hiçbir eleman düğümünü kaçırmamasıyla mümkündür.

Kritik zaman adımı;

$$\Delta t \leq \frac{l_c}{c} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de l_c en küçük eleman boyutunu, [mm], ve c ses hızını, [mm/sn], belirtmektedir.

Gerçekleştirilen pratik uygulamalarda zaman adımı hazırlanan modeli çözdürürken gerekli olan süreyi etkilediği için önemlidir. Gereğinden küçük eleman boyutu çok küçük zaman adımına yol açacak, bu da çözüm süresini uzatacaktır. Örnek vermek gerekirse bu çalışma sırasında hazırlanan bilgisayar modelinin çözümündeki zaman adımı 10^{-8} sn mertebesinde.

3.1.2 Newmark Methodu

Gerçekleştirilen çalışmada bilgisayar modelini çözmek için Radioss çözücüsü kullanılmıştır. Radioss'un işleyişi Newmark Methodu yöntemine dayanmaktadır.

Sistemin belirli bir zaman olan $t_{n+1} = t_n + h$ anındaki durumu Taylor Formülü kullanılarak Denklem (3.3) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} f(t_n + h) = & f(t_n) + hf'(t_n) + \frac{h^2}{2}f^{(2)}(t_n) + \dots \\ & + \frac{h^s}{s}f^{(s)}(t_n) + R_s \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$R_s = \frac{1}{s!} \int_{t_n}^{t_n+h} f^{(s+1)}(\tau) [t_n + h - \tau]^s d\tau \quad (3.4)$$

Bu sayede t_n anındaki durum bilinmek şartıyla t_{n+1} anındaki yer değişimi ve hızı hesaplamak mümkün olmaktadır. Denklem 3.3'ü düzenlersek;

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{u}(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau)\ddot{u}(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

Denklem 3.5 ve 3.6’da yer alan integraller numerik olarak hesaplanabilir. Buna göre;

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{u}(\tau) d\tau = (1 - \gamma)h\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} + r_n \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau)\ddot{u}(\tau) d\tau \\ = \left(\frac{1}{2} - \beta\right) h^2 \ddot{u}_n + \beta h^2 \ddot{u}_{n+1} + r'_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

Bulunan integral açılımlarını Denklem (3.3)’e yerleştirirsek;

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + (1 - \gamma)h\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} \quad (3.9)$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) h^2 \ddot{u}_n + \beta h^2 \ddot{u}_{n+1} + r'_n \quad (3.10)$$

γ ve β değerleri değişkendir ve bu değişkenlere bağlı olarak farklı algoritmalar elde edilebilir [17].

$\gamma = 0, \beta = 0$ için için farkalr algoritması oluşmaktadır. Zaman adımı değeri önem taşımaktadır ve kritik bir değerde olmalıdır. Sürekli kararsızdır.

$\gamma = 1/2, \beta = 0$: Merkezi farklar algoritması. Koşullu olarak kararlı.

$\gamma = 1/2, \beta = 1/2$: Fox ve Goodwin algoritması.

$\gamma = 1/2, \beta = 1/6$: Lineer ivmelenme.

$\gamma = 1/2, \beta = 1/4$: Ortalama ivmelenme

Hazırlanan bilgisayar modelini çözmek için kullanılan Radioss çözücüsü Merkezi Farklar Algoritması kullandığı için bu algoritma daha detaylı olarak incelenecektir.

3.1.3 Merkezi Farklar Algoritması

Bölüm 3.1.2’de bahsedildiği gibi Merkezi Farklar Algoritması $\gamma = 1/2, \beta = 0$ şartında oluşmaktadır. Denklem (3.10)’u düzenlersek;

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{1}{2}h_{n+1}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad (3.11)$$

$$u_{n+1} = u_n + h_{n+1}\dot{u}_n + \frac{1}{2}h^2\ddot{u}_n \quad (3.12)$$

h_{n+1} , t_n ve t_{n+1} arasındaki zaman adımıdır. Denklem (3.11) ve (3.12)’den oluşan denklem takımından zaman adımını sabit tutarak ivme değerini çekersek.

$$\ddot{u}_n = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{h^2} \quad (3.13)$$

Benzer şekilde yarım zaman adımı kadar ilerisi için hız değeri hesaplanabilir.

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right) = \frac{1}{h_{n+1}}(u_{n+1} - u_n) \quad (3.14)$$

İvme ve zaman değerleri de aynı şekilde belirtilebilir.

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{h_{n+\frac{1}{2}}}\left(\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{u}_{n-\frac{1}{2}}\right) \quad (3.15)$$

$$h_{n+\frac{1}{2}} = \frac{h_n + h_{n+1}}{2} \quad (3.16)$$

İleri zaman adımındaki hız ve yer değiştirmeler bu sayede geçmiş değerlerden hesaplanabilir.

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} + h_{n+\frac{1}{2}}\ddot{u}_n \quad (3.17)$$

$$u_{n+1} = u_n + h_{n+1}\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

Çözümün doğruluğu zaman adımının karesi ile orantılıdır. Eğer zaman adımı değeri yarıya indirilirse hata miktarı çeyreğine inecektir. Zaman adımı her çevrimde değişebilir [17].

3.2 Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Malzeme Modelleri

3.2.1 Genleştirilmiş Polistren Parçalar İçin Kullanılan Model

EPS malzemenin mekanik özellikleri Bölüm 2.1.1’de anlatılmıştır. Bahsedildiği gibi EPS malzemeyi bu karmaşık mekanik davranışı nedeniyle bilgisayarda sayısal olarak modellemek zordur.

Daha önce açıklandığı şekilde bilgisayar modelinde explicit çözücü olarak Radioss kullanılacaktır. Bu çözücünün malzeme modelleri incelendiğinde köpük malzemenin olası 3 model olduğu görülmüştür.

Malzeme kartı bakımından en kullanışlı model LAW33 numaralı Visko-Elastik Plastik Köpük Malzeme modelidir. Bu model köpük malzemenin uzama-gerilme eğrisini modele girme imkanı tanımaktadır. Fakat şekil değiştirme hızına bağlı olarak gerilme değeri hesaplamak mümkün değildir. Ek olarak köpüğün içindeki hava oranı da modelde verilerek sönüm etkisi modellenebilmektedir fakat köpük sıkıştıktan sonra havanın çıkışı gözardı edilmektedir. Düşük yoğunluklu, kapalı hücreli ve kolaylıkla plastik şekil değişimine uğramayan malzemeler için tavsiye edilmektedir.

Visko-Elastik Plastik Köpük modele bir alternatif LAW28 numaralı Petek Malzeme modelidir. LAW33’e benzer şekilde bu modelde de uzama-gerilme eğrisini modele girilebilmektedir. Bu modelde eğer varsa malzemenin farklı eksenlerdeki mekanik özelliklerini yansıtmada bir önceki LAW33 malzeme modelinin önüne geçmektedir. Bu modelde de şekil değiştirme hızının malzeme üzerindeki hesaba katılmamaktadır. Tez çalışmasında EPS malzeme çoğunlukla basmaya maruz kalacağı için farklı eksenlerde mekanik özellikler ihmal edilmiştir.

Petek malzeme modelinin modifiye edilmiş hali LAW50 numaralı Sıkıştırılabilir Köpük malzeme modeli iyi bir alternatif olmaktadır. Bu modelde ek olarak şekil değiştirme hızının etkileri de modele ayrı bir tablo olarak girilebilmektedir.

Hazırlanan ağ modelinde LAW33 numaralı Visko-Elastik Plastik Köpük Malzeme modeli kullanılmıştır. Üretici verilerinden alınan uzama-gerilme eğrisi bu malzeme

modeli sayesinde ağ modelinde kullanılmıştır. Kullanılan EPS malzemenin uzama hızına bağlı uzama-gerilme eğrileri literatürde yer almadığı için uzama hızı etkilerini dikkate alan malzeme modelleri kullanılmamıştır.

3.2.2 Johnson Cook Malzeme Modeli

Johnson ve Cook'un oluşturduğu malzeme modeli yüksek hızlı çarpışmalar ve patlamaları sayısal olarak modellemeye olanak sağlamaktadır. Bu modelde pekleşme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklık etkileri modellenenbilmektedir [18].

EPS dışındaki malzemelerin çoğunu oluşturan çelik saclar için Johnson-Cook malzeme modeli hazırlanan sayısal modelde kullanılmıştır. Bu malzeme modeli plastik bölgedeki malzeme davranışını modellemek için sonlu elemanlar analizi programlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart elastik modelin yanı sıra bu malzeme modelinde akma sınırını belirtmek ve bu sayede şekil değiştirme enerjisiyle oluşacak sönüm etkisini hesaba katmak mümkündür. Ayrıca plastik şekil değişiminin miktarı da hesaplanabilecektir.

Modele girdi olarak akma dayanımını belirtmemizle bu gerilmenin altındaki gerilme değerleri için lineer elastik bir malzeme davranışı olmaktadır. Akma dayanımının üzerindeki gerilmelerde ise malzeme plastik şekil değişimine uğramaktadır. Gerilme değeri ise Denklem (3.19) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma = [\sigma_a + b\varepsilon_p^n] \left[1 + \left(c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - T'^m] \quad (3.19)$$

Denklemde;

σ_a , akma gerilmesini [MPa],

b, pekleşme katsayısını,

ε_p , plastik şekil değiştirme miktarını [mm],

n, pekleşme üstelini,

c, şekil değiştirme hızı katsayısını (0 için şekil değiştirme hızı etkisi hesaba katılmamaktadır),

$\dot{\varepsilon}$, şekil değiştirme hızını [mm/sn],

$\dot{\epsilon}_0$, referans şekil değiştirme hızını [mm/sn] (bu değerin altında deformasyon hızı etkisi hesaba katılmamaktadır),

$$T' = \frac{T - T_{oda}}{T_{erime} - T_{oda}}, \text{ T anlık sıcaklık [K],}$$

m, sıcaklık etkisi üstelini (0 değeri için sıcaklık etkisi dikkate alınmamaktadır), belirtmektedir [19].

$[\sigma_a + b\epsilon_p^n]$ terimi pekleşme nedeniyle oluşan sertleşmeyi dikkate alan elasto-plastik terimdir. $\left[1 + \left(c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right]$ terimi şekil değiştirme hızına bağlı viskoz etkileri, $[1 - T'^m]$ terimi sıcaklık etkisini belirtmektedir.

Denklemden kullanmak üzere malzeme özelliği olarak akma gerilmesi, pekleşme katsayısı, pekleşme üsteli, şekil değiştirme hızı katsayısını ve sıcaklık etkisi üstelinin bulunması gerekmektedir. Bu değerler deneysel veya yaygın olarak kullanılan malzemeler için literatürden bulunabilir. Johnson ve Cook'un ilgili makalesinde de yaygın olarak kullanılan metal mühendislik malzemeleri için hesaplanmış olan katsayılar mevcuttur.

Elasto-plastik kısımda kullanılan katsayılar çekme testi yapılarak elde edilen veriler ile tespit edilebilir. Hazırlanan düşme testi çalışmasında termal ve şekil değiştirme hızına bağlı etkiler çelik için ihmal edilmiştir.

Buna göre Radioss çözücüsünde M2_PLAS_JOHNS_ZERIL malzeme kartı plastik şekil değiştirme miktarı hesaplanacak olan çelik saclar için kullanılacaktır. Malzeme kartında kullanılan değerler Çizelge 3.1'de bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 : M2_PLAS_JOHNS_ZERIL malzeme kartı değerleri [20].

Yoğunluk	7,8 e-09 ton/mm ³
Elastiklik Modülü	210000 MPa
Poisson Oranı	0,300
a, akma dayanımı	162 MPa
b	598
n	0,6

3.2.3 Elastik Malzeme Modeli

EPS ambalaj malzemesi ve çelik saclar fırın ağ modelinin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Modelde yer alan kapak grubunda alüminyum, poliamid ve cam parçalar da bulunmaktadır. Bu parçalar sadece elastik bölgedeki davranışlarını modelleyen Radioss'ta yer alan M1_ELAST malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir.

Bu parçalarda olması muhtemel olan plastik şekil değişimleri kullanılan malzeme kartı nedeniyle hesaplanamayacaktır. Fakat bu malzeme kartını kullanan parçaların adedi ve boyutunun fırının tümüne göre az olması nedeniyle modelin doğruluğunda kayda değer bir kayıp yaşanmamıştır. Alüminyum ve poliamid parçalar akma dayanımları aşılmadığı sürece kullanılan M1_ELAST malzeme kartıyla doğru olarak modellenmiş olacaktır. Cam parçalar ise fırın kütlelerini tam olarak modelde yansıtabilmek için modellenmiştir. Camın özel malzeme davranışlarının M1_ELAST malzeme kartı ile modellenemeyeceği dikkate alınmalıdır. Cam kırılması gibi düşme testinde oluşabilecek hasarlar için uygun bir malzeme modeli geliştirilmesi bu çalışmanın geliştirilebilecek bir yönüdür.

Çizelge 3.2'de alüminyum, poliamid ve cam parçalar için kullanılan M1_ELAST malzeme kartı değerleri bulunmaktadır.

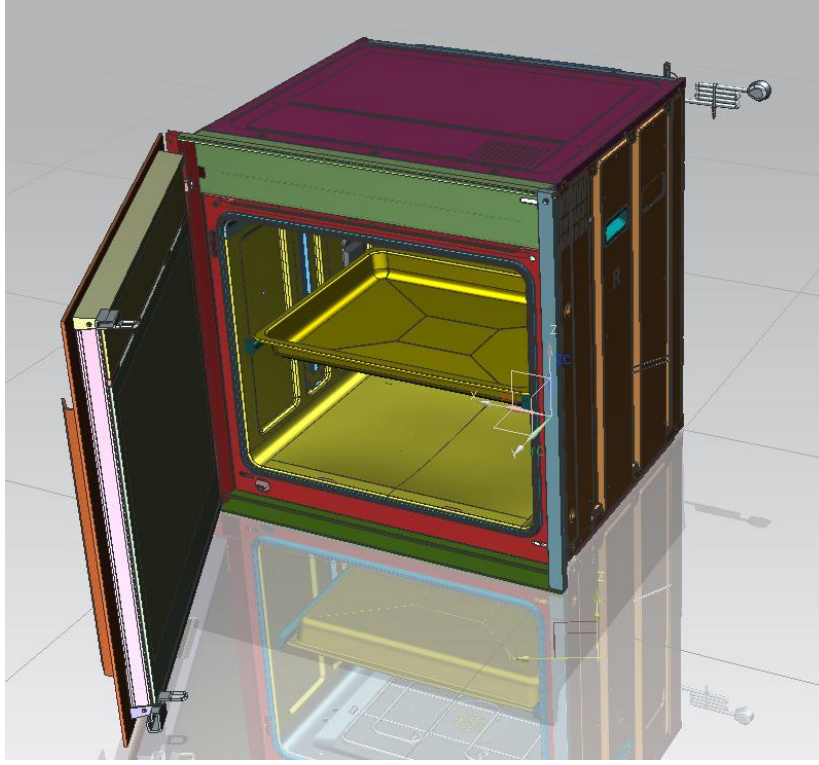
Çizelge 3.2 : M1_ELAST malzeme kartı için kullanılan değerler.

Malzeme Adı	Yoğunluk [ton/mm ³]	Elastiklik Modülü [MPa]	Poisson Oranı
Aluminyum	2,7 e-09	70000	0,280
Poliamid	1,4 e-09	3000	0,390
Cam	2,4 e-09	68000	0,190

3.3 Oluşturulan Sonlu Eleman Modeli

Hazırlanan sayısal modelde amaç modelin olabildiğince gerçek teste uygun olmasıdır. Bu nedenle fırın sisteminin ayrıntılı bir şekilde ağ yapısı ile modellenmesi gerekmektedir. Bu model oluşturma aşaması analiz çalışmasının en fazla zaman ve maliyet alan aşaması olmaktadır. Fırın sisteminin ayrıntılı modellenme aşaması ve yukarıdaki bölümlerde bahsedilen zaman adımıdan kaynaklı eleman boyutundaki kısıtlamalar nedeniyle bu aşamanın süresi daha da artmıştır.

Gerçekleştirilen proje kapsamında mevcut durumda üretilen bir ankastre fırına hareketli raf sistemi yerleştirilmiştir. Ankastre fırının yapısı genel olarak sac ağırlıklıdır. Sonlu eleman modelini oluşturmaya da bu sac parçalardan başlanmıştır. Sistemdeki sac parçalar iç saclar ve dış saclar olarak ikiye ayrılabilir. Fırında bulunan elektronik parçalar, hareketli raf mekanizması gibi parçalar bu iki sac grubunun arasında bulunmaktadır. Fırının montaj halindeki üç boyutlu çiziminin görseli Şekil 3.1’de yer almaktadır.



Şekil 3.1 : Fırının montaj halinin görseli.

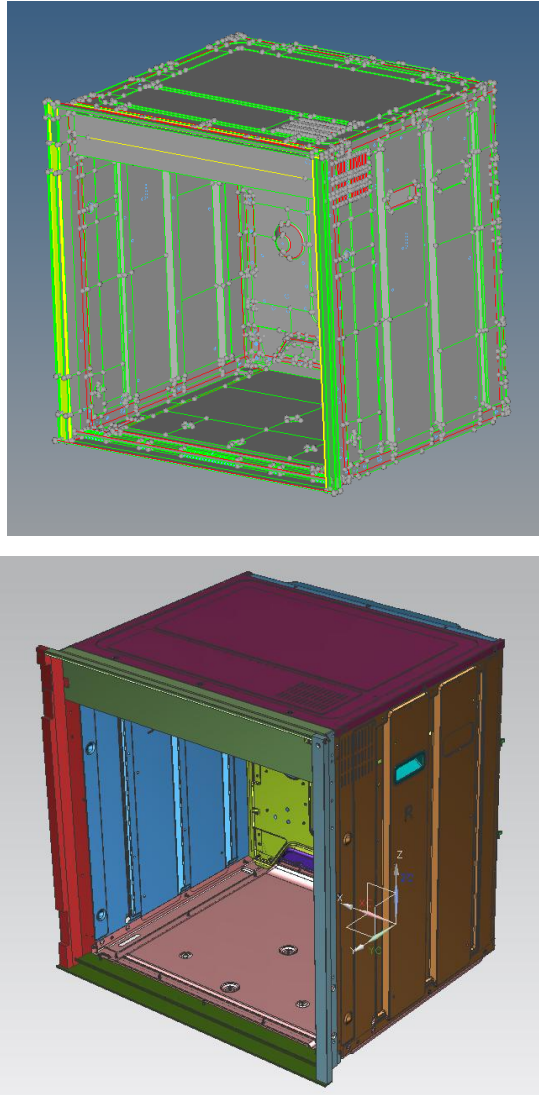
Fırın ağ modeli toplam 717399 adet eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Elemanlar montaj gruplarına göre dağılımı Çizelge 3.3’te bulunmaktadır. Vidaları modelleyen rijit elemanlar çizelgede yer almamaktadır.

Çizelge 3.3 : Fırın ağ modelinde kullanılan eleman adetleri

Grup İsmi	Eleman Adeti
Dış Saclar	98804
İç Saclar	56291
Fan	24300
Kapak	50741
Hareketli Raf Mekanizması	292958
Polistren Ambalaj	188450

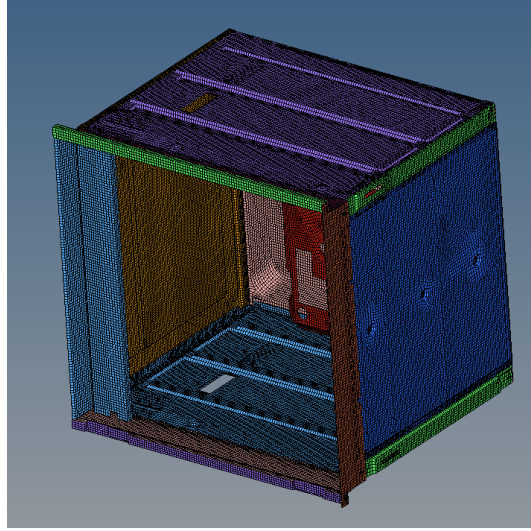
3.3.1 İç ve Dış Saclar

Sac parçaların modellenmesinde diğer parçalara göre en önemli avantaj kalınlıklarının parça boyunca hemen hemen aynı olması nedeniyle iki boyutlu olarak modellenebilmesidir. Bu yöntemde sac parçanın kalınlığının ortasından geçen bir yüzey oluşturulmakta ve bu yüzey 2 boyutlu elemanlar ile modellenmektedir. Parçanın ortalama kalınlığı model çözülürken hesaba katılmaktadır. Bu yöntem sayesinde daha az eleman kullanılarak model hazırlanabilmekte ve model hazırlama zamanı kısalmaktadır. Dış saclar için hazırlanan orta yüzey modeli şekil 3.2’de yer almaktadır.



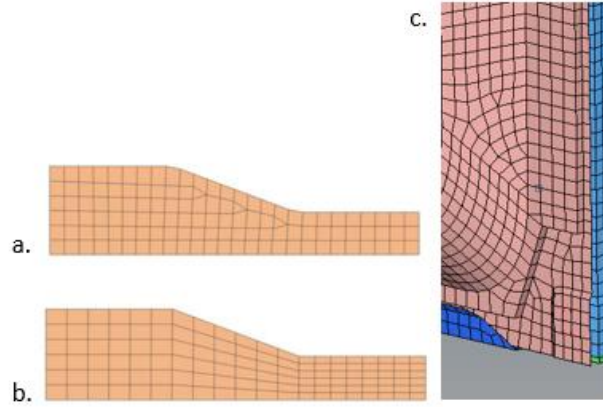
Şekil 3.2 : Dış sacların orta yüzey modeli

Şekil 3.3’te görüldüğü gibi hazırlanan orta yüzey modeli daha düzgün bir ağ dağılımı için küçük yüzeylere bölünmüştür. Ağırlıklı olarak quad elemanlar kullanılmıştır. Dış saclar toplam 98800 eleman kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 3.3 : Dış sacların ağ modeli

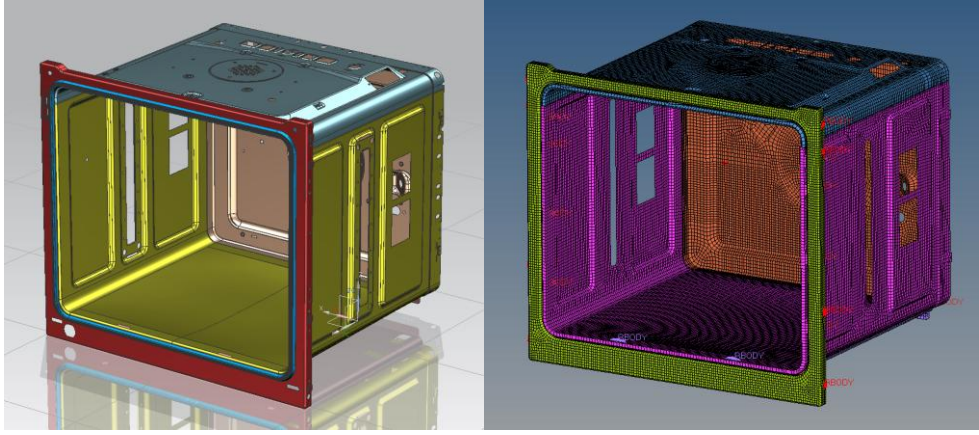
Statik yapısal analizlerde üçgen elemanlar istenmezken çarpma, darbe veya düşme gibi yüksek hızlı hareketleri içeren testlerde bu durum tam terstir. Üçgen elemanlardan kaçınmak için gerçekleştirilen eleman geçişlerini uygulamaktansa eleman boyutunu korumak üzere darbe yönünde üçgen eleman uygulamak tavsiye edilmektedir. Sonlu eleman modelindeki geçişler bu durum gözönüne alınarak gerçekleştirilmiştir[21]. Bu durum ve fırın modelinde buna uygun gerçekleştirilen eleman geçişi Şekil 3.4’te görülebilir.



Şekil 3.4 : a. Darbe analizleri için önerilen eleman yapısı. b. Statik analizler için önerilen eleman yapısı. c. Fırın dış sacında buna uygun olarak gerçekleştirilen eleman geçişi.

Fırında pişirilecek olan ürünün yerleştirildiği alan olan iç saclar dış saclar ile benzer bir yapıya sahiptir. Bu sacların da orta yüzeyi tespit edilerek ağ yapısı oluşturulmuştur.

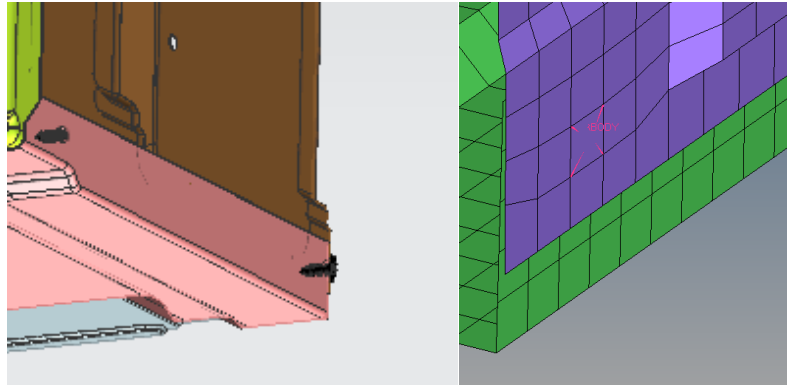
Ürünün görseli ve oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.5’te görülmektedir. İç sacların tümü 2 boyutlu olan toplam 55678 eleman ile modellenmiştir.



Şekil 3.5 : İç saclar ve iç sacların ağ modeli.

3.3.1.1 Saclar arasındaki bağlantılar

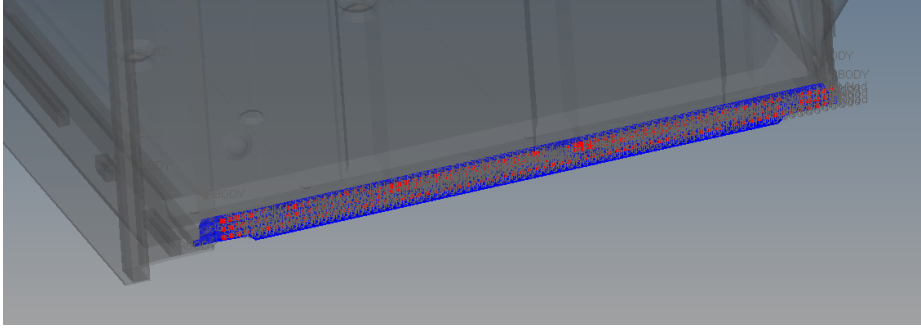
Dış saclardaki çoğu bağlantı vida yardımıyla yapılmaktadır. Bu bağlantılar ağ yapısı oluşturulurken rijit bağlantılar kullanılarak modellenmiştir. Rijit bağlantı sacların karşılıklı eleman noktalarını birbirine rijit olarak bağlamakta ve kinematik olarak aynı hareketi yapmalarını sağlamaktadır. Yapılan bu uygulamanın gerçek testten en büyük eksikliği vidanın esnemesinin hesaba katılmamasıdır. Fakat bu etkiyi, vidanın modellenmesi durumu ile karşılaştırıldığında eleman sayısı ve model hazırlama süresi bakımından vidayı rijit eleman kullanarak modellemenin daha avantajlı olduğu görülmüştür.



Şekil 3.6 : Kurulan ağ modelindeki vida bağlantıları.

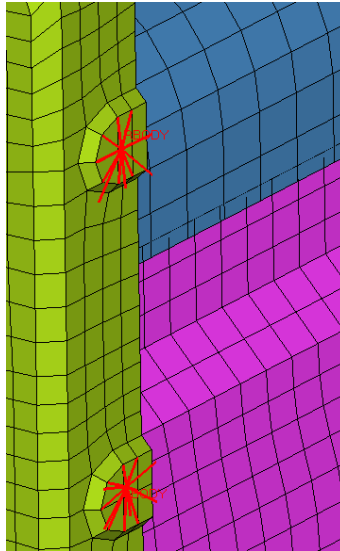
Vida bağlantılarının olduğu bölgelerde saclar üstüste yerleştirildiği için bu bölgelerde saclar arası temas tanımlanmadığı takdirde analiz sonuçlarında saclar arasında girişim

görölme riski vardır. Ayrıca vida bölgelerinde saclar arasında tanımlanacak bir temas, saclar arasında yüzeyler üzerinden de kuvvet aktarımını sağlayarak gerçeğe daha yakın bir model sağlayacaktır. Özellikle sacların alt bölümlerinde düşme sonucu plastik deformasyon riski olduğu için girişimin önlenerek, iki sacın yüzeylerinin birbirine temas etmesi daha net sonuç alınmasını sağlayacaktır. Dış saclardaki vida bölgelerinde oluşturulan temas Şekil 3.7’de görölmektedir. Bu temas türü Radioss çözücüsünde Tip 7 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.7 : Vida bölgesindeki temas.

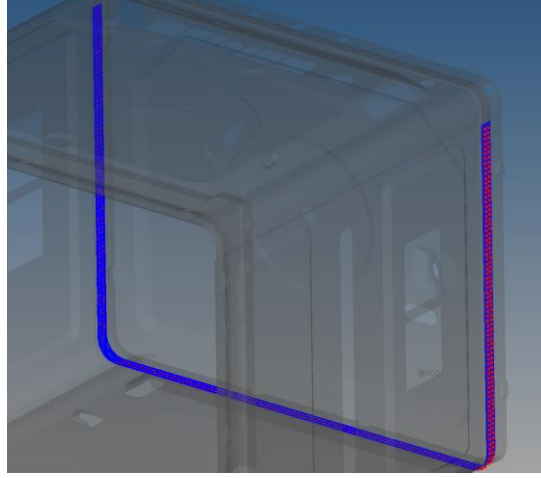
Dış saclardaki vida bağlantıları gibi iç saclardaki vida bağlantıları da rijit elemanlar kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 3.8 : İç saclardaki vida bağlantılarının ağ modeli.

Dış saclardan farklı olarak içteki saclar arkada yer alan yapıya kaynaklanmaktadır. Sayısal olarak bunu modelleyebilmek için Radioss çözücüsünde Tip 2 temas türü

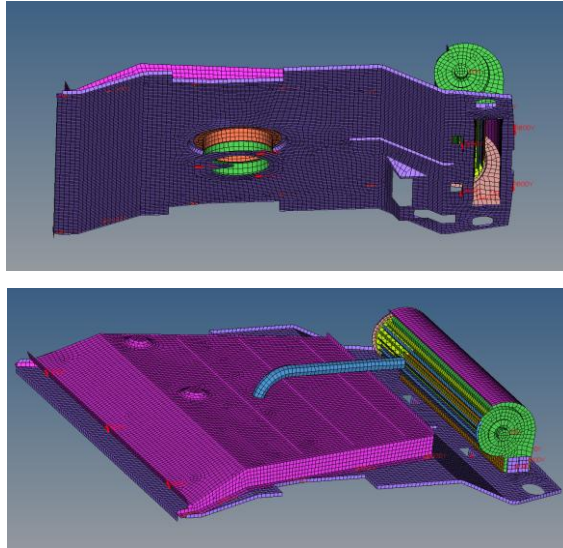
olarak geçen bağılı temas (tied contact) kullanılmıştır. Kaynak yüzeyi Şekil 3.9’da görülebilir. Fırın modelinde bunlara benzer toplam 96 adet temas modellenmiştir.



Şekil 3.9 : İç saclardaki kaynak bağlantısının ağ modeli.

3.3.2 Fan Grubu

Sac parçalardan oluşan fan grubunun da orta yüzey modelleri kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuş ve modele eklenmiştir. Fan grubunun ağ modeli Şekil 3.10’da bulunmaktadır. Bu ağ modelinde 2400 adet eleman bulunmaktadır.



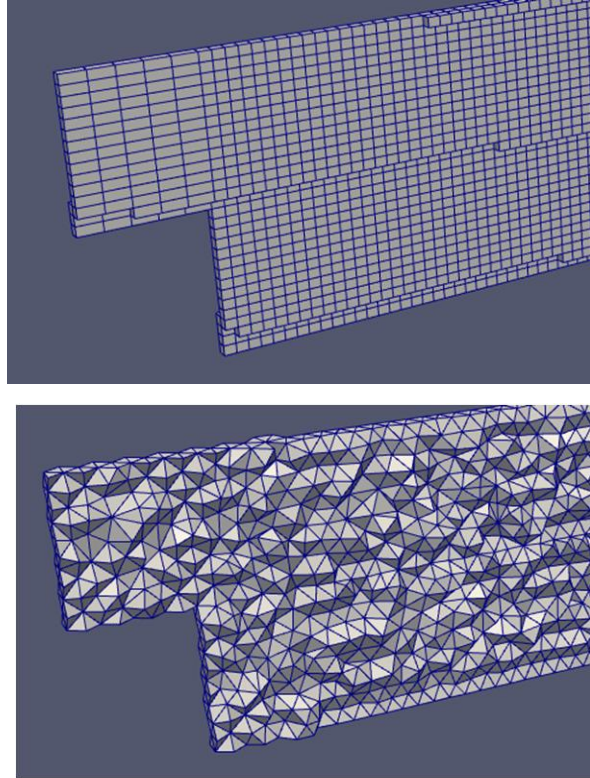
Şekil 3.10 : Fan grubunun ağ modeli.

3.3.3 Polistren Parçalar

Ürünün nakliyesinde kullanılan EPS geometrik yapısı nedeniyle dikdörtgen 6 yüzlü (hexahedral) elemanlar ile modellenememiş, bu yüzden üçgen tabanlı piramit

elemanlar (tetrahedral) kullanılarak modellenmek zorunda kalmıştır. Kullanılan bu elemanların en önemli eksisi modeldeki eleman sayısını arttırarak çözüm süresini uzatmasıdır. Şekil 3.11’de görülen EPS parçanın hacmi $35 \times 10^6 \text{ mm}^3$ ’tür. Kenar uzunluğu 5 mm olan piramit elemanlarla modellenen bu parçada yaklaşık olarak 36×10^5 eleman bulunmaktadır. Kıyaslama yapılması açısından belirtmek gerekirse bütün fırın modelinde 42×10^5 eleman bulunmaktadır. Sac parçalarda kullanılan orta yüzey ile modelleme tekniğinin, yapısı nedeniyle EPS parçalarda uygulanamaması ve piramit elemanların kullanılması eleman sayısını arttırmıştır.

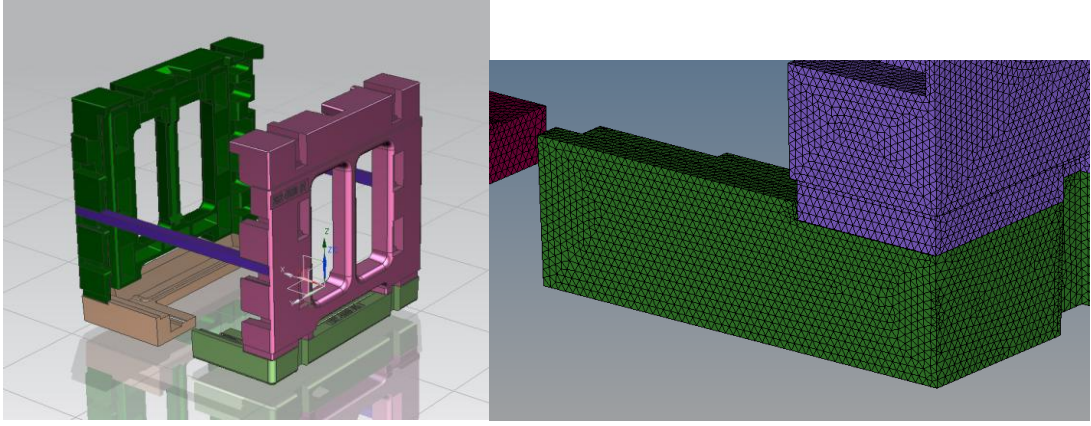
Eleman sayısını azaltmak için hexahedral elemanlar ile parça modellenen bir parçada, aynı hacimde daha az eleman bulunacağı için eleman sayısı da azalacaktır. Bununla ilgili olarak Şekil 3.11 incelenebilir. Şekilde aynı parça hem hexahedral hem de tetrahedral elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Tetrahedral elemanlar ile modellenen parçada 2 kat fazla sayıda eleman bulunmaktadır.



Şekil 3.11 : Bir parçanın hexahedral ve tetrahedral elemanlarla modellenmiş hali [22].

Fakat fırının polistren ambalaj malzemesinin modelinde bunun yapılabilmesi için polistren parçanın geometrisinde sadeleştirme yapılması gerekmektedir. Bu hem parçanın modelinin gerçek geometriden uzaklaşmasına neden olacaktır hem de

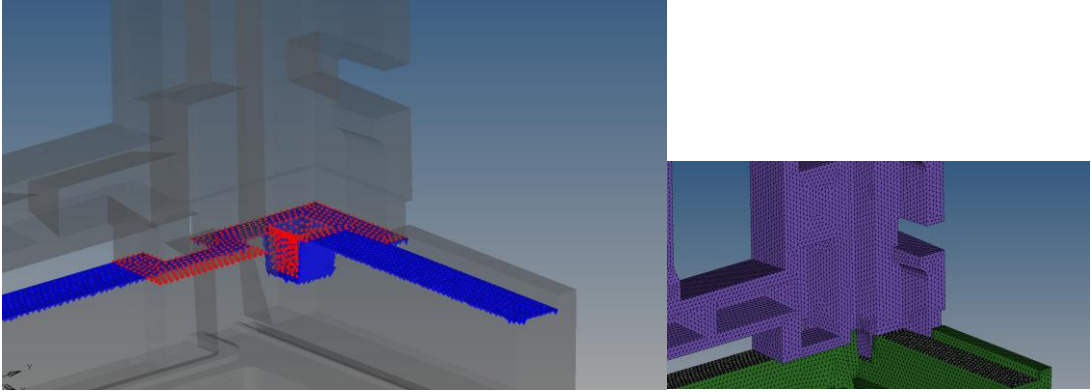
modelleme süresine ek süre olarak eklenecektir. Hexahedral kullanma amacının zaman tasarrufu olduğu düşünülürse bu mantıklı olmayacaktır. EPS parçanın 3 boyutlu çizimi ve ağ modeli Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.12 : Polistren parçaların ağ modeli.

3.3.3.1 Genleştirilmiş polistren parçalar arasındaki temas

Darbe sırasında tabanda yer alan EPS parça ile yan bölgelerde yer alan EPS parçalar arasındaki kuvvet akışını modelleyebilmek için taban ve yan EPS parçalar arasındaki temas modellenmiştir. Temas tanımlanan yüzey Şekil 3.13’te yer almaktadır.



Şekil 3.13 : Taban ve yan köpük arasındaki temas bölgesi.

Temas tanımında Radioss çözücüsünde Tip 7 olarak geçen temas kullanılmıştır. Bu temas türü parçalar birbirinden ayrı iken herhangi bir kuvvet uygulamamakta ve parçaların birbirinden ayrılmasına engel olmamaktadır. Teması tanımlamak için modele bir yüzey ve bir de nokta grubu tanımlamak gerekmektedir. Görselde mavi renkle gözüken yüzey, altta yer alan EPS parçada tanımlanmış olan temas yüzeyidir. Kırmızı renkli noktalar ise bu yüzeyle aralarında temas tanımlanmış olan nokta

grubudur. Temas tanımlanan bu gruplar arasındaki uzaklık, belirlenen veya eleman boyutundan otomatik olarak hesaplanan bir uzaklığın altına düştüğü zaman girişim önlenmekte ve bu sayede parçaların normal doğrultudaki hızları eşitlenmektedir.

Temas değişkenlerinde temasın başlayacağı belirli bir minimum boşluk değeri belirtilmemiştir. Bu nedenle çözücü otomatik olarak aşağıdaki formülü kullanarak bir boşluk değeri hesaplamaktadır.

$$gap_{min} = \frac{l_{min}}{10} \quad (3.20)$$

Formülde gap_{min} hesaplanan temasın başlayacağı uzaklıktır. l_{min} ise temas tanımlanan elemanların içindeki en kısa kenarın uzunluğudur. Bölüm 3.3.3.'te belirtildiği gibi EPS parçalar ortalama 4 mm kenar uzunluğuna sahip tetrahedral elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu nedenle temasın başlayacağı uzaklık yaklaşık olarak 0,4 mm'dir.

EPS parçaların analitik düzlemdeki konumu ve geometrisi gerçeğe uygun olarak oluşturulan CAD çiziminden alındığı için alt ve yan EPS parçalar arasında başlangıç anında boşluk bulunmamaktadır. Fakat açıklandığı gibi temas yüzeyine 0,4 mm'den daha yakın olan noktalara kuvvet uygulanarak girişim önlenecektir. Bu durumda analiz başında çözücünün girişim hesaplayarak analizi durdurması veya gerçekte olmayan çok yüksek gerilme ve deformasyon değerlerinin hesaplanması riski vardır. Bunu önlemek için Tip 7 temasta ek bir özellik olarak bulunan, ilk anda girişim olması durumunda noktaların koordinatlarını girişimi önleyecek kadar öteleyen özellik aktif edilmiştir.

Ek hesaplamalar gerektirdiği ve çözüm süresini uzattığı için yüzeyler arasında sürtünme tanımlanmamıştır.

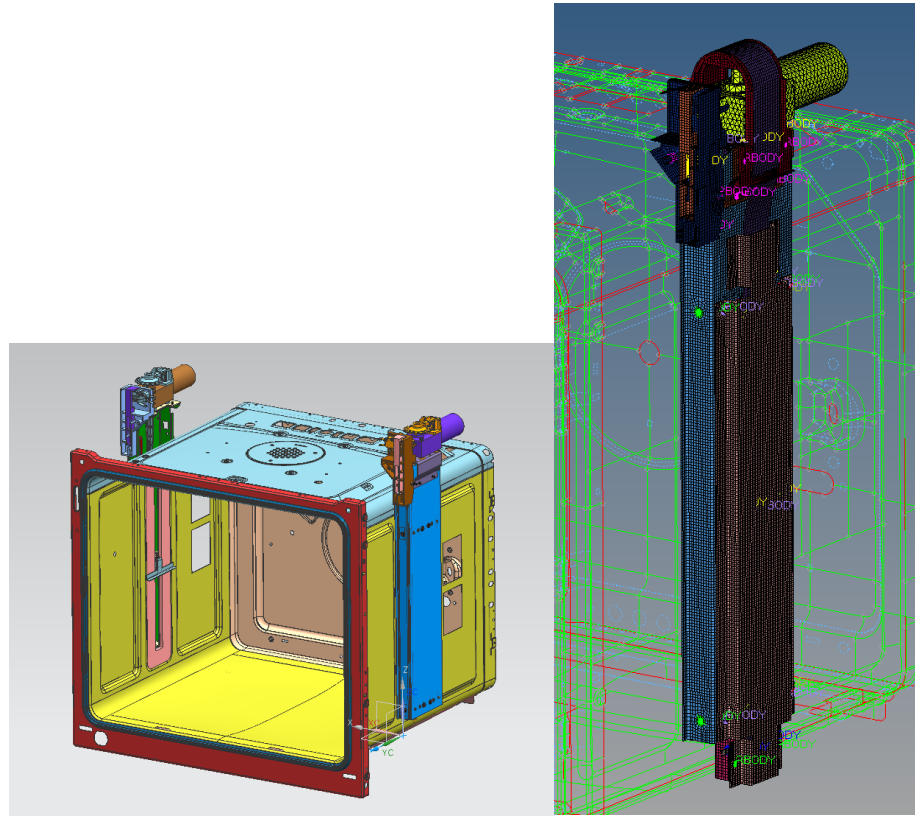
3.3.4 Hareketli Raf Sistemi

Yeni tasarlanan hareketli raf sisteminde, mil ve plastik parçalar gibi küçük et kalınlığına sahip parçalar olduğu için hareketli raf sistemi daha küçük kenar uzunluğunda elemanlarla modellenmek zorunda kalmıştır.

Bölüm 3.1'de bahsedildiği gibi explicit çözüm modeldeki en küçük kenara sahip elemana göre bir zaman adımı hesapladığı için modeldeki tek bir kısa kenarlı eleman zaman adımını düşürmeye yeterlidir. Bununla birlikte, hesaplanan zaman adımlarının

özüm süreleri modeldeki eleman sayısına bağlıdır. Hareketli raf sistemi dışında yer alan parçaların daha büyük elemanlarla modellenmesi toplam eleman sayısının daha fazla artmasını engelleyerek modelin çözüm süresinde avantaj sağlamıştır.

Hareketli raf sistemi fırında pişirme performansını iyileştirmek amacıyla tasarlanmaktadır. Mekanizma sayesinde pişirme sırasında fırın içindeki raf seviyelerini otomatik olarak tarayabilen bir sistem tasarlanması amaçlanmıştır. İ saclara montaj halindeki hareketli raf sistemi ve bu mekanizma için oluşturulan ağ modeli şekil 3.14'te bulunmaktadır.



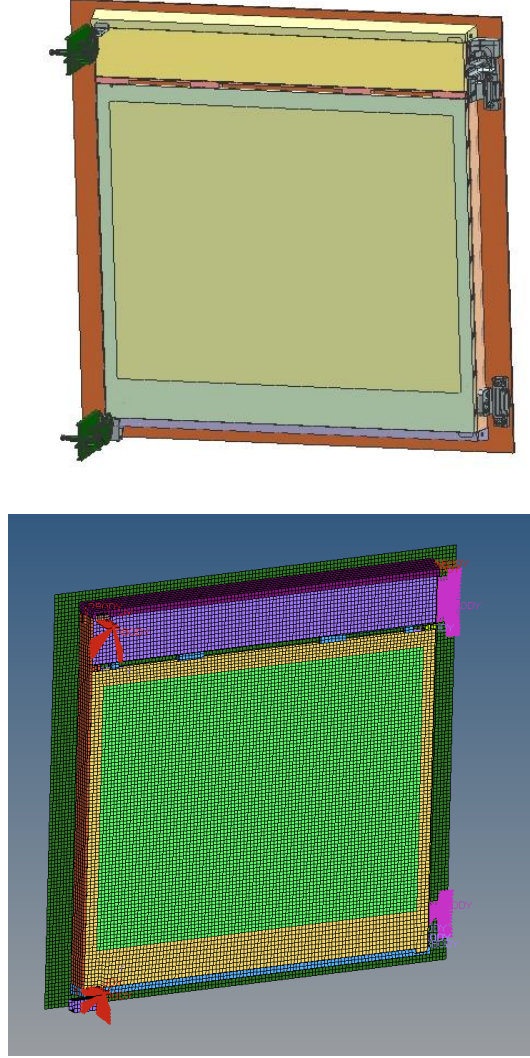
şekil 3.14 : Hareketli raf sistemi ve ağ modeli.

şekil 3.14'de görüldü gibi mekanizma iç sacların iki yanına yerleştirilmektedir. Tek bir mekanizmanın ağ modelinde 146482 adet eleman kullanılmıştır. Bu ağ modelindeki minimum eleman kenarının uzunluğu 0,5 mm'dir.

3.3.5 Kapak Grubu

Kapak grubunun toplam ağırlığı yaklaşık olarak 10 kg'dır. Bu grupta cam parçalar 6 kg kütle ile en yüksek kütleyi oluşturan parçalardır. Bölüm 3.2.3'te belirtildiği gibi cam parçalar, sayısal modelin gerçek fırın kütlesi ile eř olabilmesi için modellenmiştir.

Bu parçalar üzerinde herhangi bir gerilme dağılımı veya kırılma durumu hesaplanmayacaktır. Şekil 3.15'te kapak grubunun üç boyutlu çizimini ve ağ modeli bulunmaktadır.



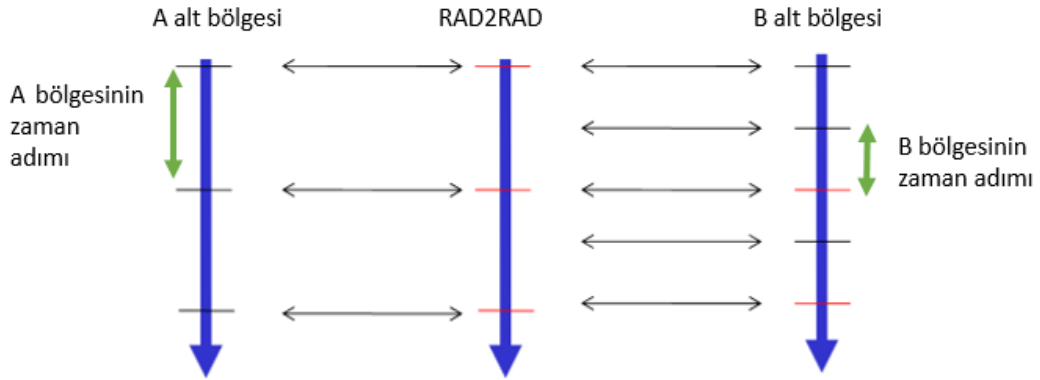
Şekil 3.15 : Kapak grubunun üç boyutlu çizimi ve ağ modeli.

3.3.6 Çoklu Bölge Yaklaşımı

Çoklu Bölge Yaklaşımı (multi domain approach) çalışma kapsamındaki fırının sayısal modeli gibi çok eleman sayılı ve bazı bölgelerdeki ağ yapısı daha küçük boyutlu elemanlarla hazırlanmış olan sayısal modellerde toplam çözüm süresini azaltmaya yarayan Radioss özelliğidir. Bu yaklaşımdaki amaç, explicit problemlerde çözüm süresini azaltarak performansı arttırmaktır. Hazırlanan sayısal model farklı alt bölgelere (subdomain) ayrılmakta ve her alt bölge kendi içindeki eleman boyutuna

göre ayrı zaman adımıyla çözülmektedir. Bu sayede küçük elemanlarla modellenmiş bir bölgenin tüm modelin zaman adımını düşürmesinin önüne geçilmiştir.

Bölgeler arasındaki kuvvet ve momentum geçişi Radioss içinde ayrı bir kontrol kartı ile tanımlanan bir uygulama olan RAD2RAD ile gerçekleştirilmektedir. Yaklaşımın çalışma prensibi Şekil 3.16’da görülebilir.

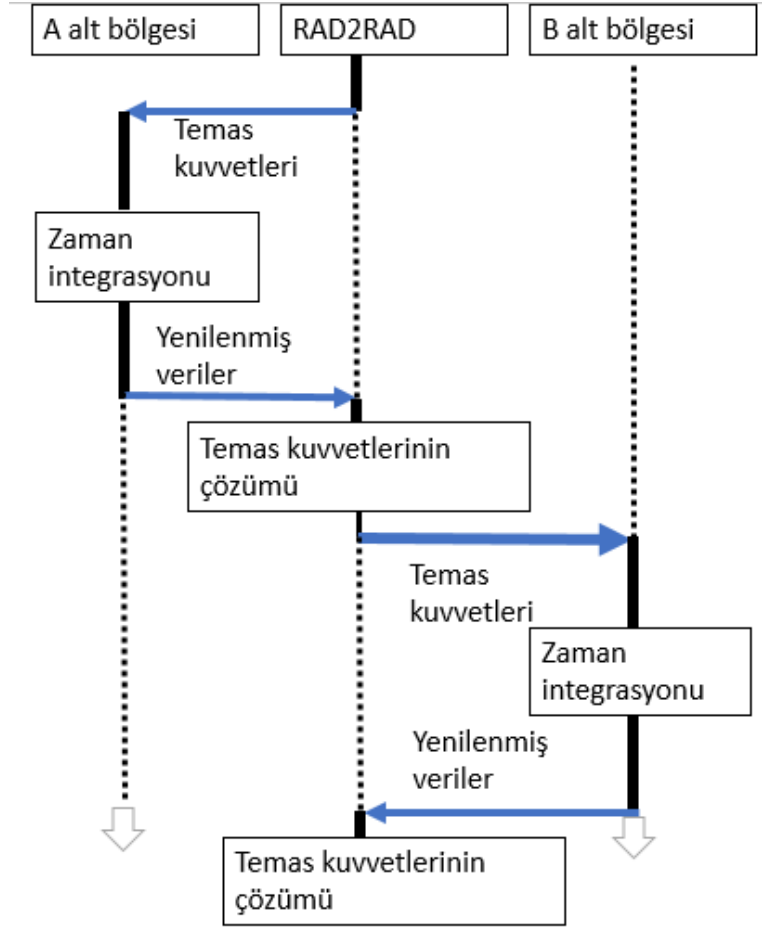


Şekil 3.16 : Çoklu Bölge Yaklaşımı'nın çalışma prensibi.

Şekil 3.16’da yer aldığı gibi A bölgesi daha büyük bir zaman adımıyla çözülürken, B bölgesi daha küçük bir zaman adımıyla çözülmemektedir. Bölgeler arasındaki kuvvet geçişleri zamanların eşitlendiği anlarda gerçekleşmektedir. Şekil 3.16’da bu anlar kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. Bu metod kullanılmazsa bütün model küçük eleman boyutuna sahip B bölgesinin zaman adımıyla çözülürken Çoklu Bölge Yaklaşımı kullanıldığı takdirde sadece B bölgesi bu zaman adımıyla çözülecektir. Modelin çözümündeki performans artışı B bölgesinin eleman sayısı ile ilgilidir. Eğer B bölgesi, A bölgesine göre oldukça küçük bir zaman adımına sahip ve eleman sayısı da çok az ise Çoklu Bölge Yaklaşımı kullanılmayan modele göre performans artış oranı yüksek olacaktır.

Şekil 3.17’de bölgeler arası hesaplamaların gerçekleşme şekli şematik olarak görülebilir. Buna göre herhangi bir anda RAD2RAD dosyasından A alt bölgesini çözen işlemciye, A ve B alt bölgeleri arasındaki temas bölgesinin kuvvet ve momentum verileri gönderilmektedir. Bu gönderilen verilere göre, A alt bölgesi için o bölgenin zaman adımı değerine uygun olarak bir sonraki anın çözümü yapılmaktadır. Ardından bu çözümden elde edilen veriler RAD2RAD dosyasına gönderilmekte ve B alt bölgesine iletilmektedir. B alt bölgesinde de bu gelen verilere göre B alt bölgesinin zaman adımına uygun olarak sonraki anın çözümü gerçekleştirilmektedir. Şekil

3.17’de noktalı çizgiyle belirtilen anlar o an için bir işlem yapılmayan bölgeleri belirtmektedir [23].



Şekil 3.17 : Çoklu Bölge Yaklaşımı’nda temas bölgelerindeki kuvvetlerin iletimi.

Hazırlanan fırın modelinde hareketli raf sistemini oluşturan parçalarda en küçük eleman boyutu 0.5 mm iken sistemin geri kalanında 2 mm’dir. Bu nedenle hareketli raf sistemini oluşturan parçalar ayrı bir alt bölge olarak tanımlanmıştır. Tez çalışması kapsamında hazırlanan sayısal modelin 0,04 saniye süren bir çözümü Çoklu Bölge Yaklaşımı kullanılmadan yaklaşık 48 saat sürerken, Çoklu Bölge Yaklaşımı ile 24 saate inmiştir.

4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

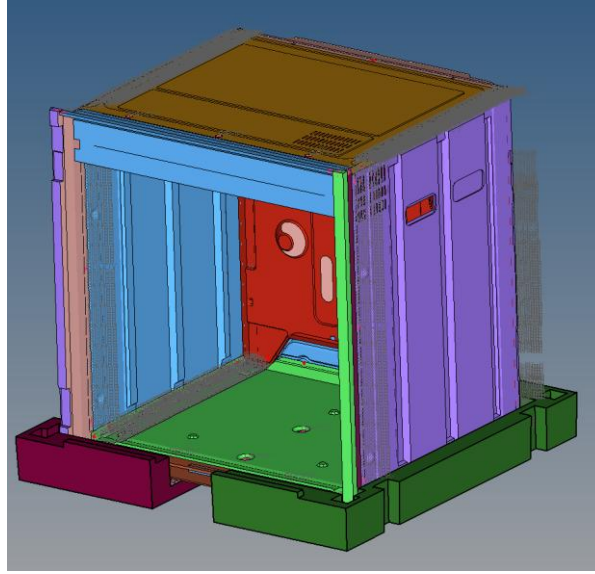
Hazırlanan sonlu eleman modeli farklı yüksekliklerden düşme senaryolarına göre ayarlanarak çözdürülmüştür. Bu işlem yapılırken fırının yere düşme anına kadar havada geçirdiği kısmı gereksiz yere çözmemek amacıyla düşme yüksekliğine göre sistemin yere değme anında sahip olacağı hız hesaplanmıştır. Yer yüzeyi esnemeyen rijit yüzey olarak modellenmiştir. Ardından fırın modeli yerden 0,5 mm üzerinde konumlandırılarak farklı düşme yüksekliklerine göre o anda sahip olacağı hız modele çözüm için ilk hız olarak verilmiştir. Modellerin çözümleri sırasında uygulanan düşme yükseklikleri ve bunlara göre hesaplanan çarpma hızı değerleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Düşme yüksekliklerine göre yere çarpma hızı.

Düşme Yüksekliği	Düşüş Süresi	Yere Çarpma Hızı
40 cm	0.28 s	2.80 m/s
70 cm	0.39 s	3.77 m/s

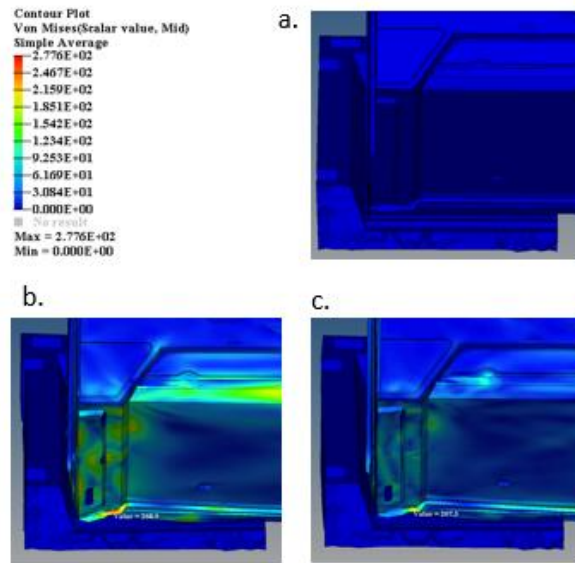
Hazırlanan modelde olası hataları ayıklamak için model ilk olarak sadece dış saclar ve alt EPS parçalar dahil edilerek çözdürülmüştür. Çözdürülen modeldeki eleman sayısı az olduğu için kısa bir çözüm süresi ile EPS ve sacların malzeme modellerinin gerçeğe yakın sonuçlar oluşturup oluşturmadığı incelenmiştir.

İlk deneme yapılan model Şekil 4.1’de görülmektedir. Çözüm sırasında bu modelin 75 cm yükseklikten düştüğü varsayılmıştır. 0.014 saniye süren bir çözüm sonucu elde etmek bu model için hesaplanan ortalama 2×10^{-7} zaman adımı ile 43 dakika sürmüştür.



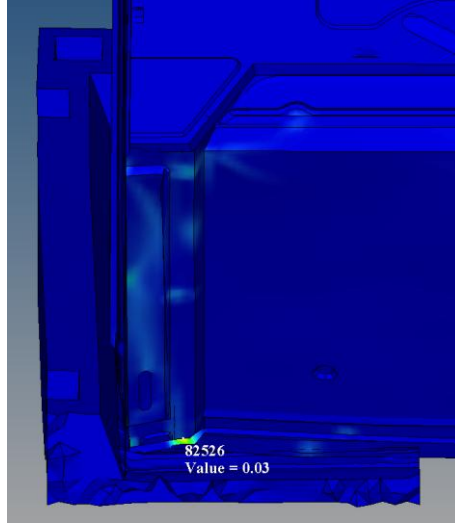
Şekil 4.1 : Model No:1.

Çözüm sonucunda EPS parçaların yere değmesi ile ayrılması arasında 0.0122 saniye olduğu görülmüştür. Taban sacındaki bağlantı noktalarına maksimum yüklerin geldiği geri esneme anındaki gerilme dağılımı aşağıdaki Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Model No:1’in çözümünün gerilme dağılımı, a: 0 sn anı, b: 0.007 sn, c: 0.014 sn.

Görüldüğü gibi akma dayanımının üzerinde gerilmeler oluşmaktadır. Bununla birlikte hesaplanan maksimum plastik şekil değiştirme miktarı 0.03 mm’dir. Bu durumun görseli Şekil 4.3’te yer almaktadır.



Şekil 4.3 : Model No:1'in çözümünün maksimum şekil değıştirme noktası.

Çözdürülen ilk sayısal modeldeki minimum eleman boyutu 2 mm'dir. Modelin çözümünde ve sonuçlarında herhangi bir hata görülmemekle beraber hareketli raf sisteminin de modele eklenmesiyle çözüm süresi oldukça uzayacağı anlaşılmıştır. Hareketli raf sistemindeki minimum eleman boyutu 0.5 mm'dir. Bu kısa kenarlı elemanlar nedeniyle uzayacak çözüm süresini azaltabilmek için Radioss çözücüsünde kullanılabilen Çoklu Bölge Yaklaşımı (multi domain) fırın modeline uygulanmasına karar verilmiştir. Bölüm 3.3.5'te bu yaklaşımla ilgili ayrıntılı bilgi bulunabilir.

Çözdürülen ilk modelin ardından tam fırın modeli testlerde uygulacak yüksekliklerden düşmeyi modelleyecek şekilde Çoklu Bölge Yaklaşımı ile çözdürülmüştür. Tez içeriğinde yer alan sayısal analiz sonuçları Çizelge 4.2'de yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : Gerçekleştirilen sayısal analizler.

Analiz No	Düşme Yüksekliği	Yere Değme Pozisyonu
1	40 cm	Taban üzerine düz
2	40 cm	Taban ön kenar üzerine
3	40 cm	Taban sağ kenar üzerine
4	70 cm	Taban üzerine düz

4.1 Sayısal Modelin Test İle Doğrulanması

Ağ yapısı tamamlandıktan sonra modelin doğrulanması için bir düşme testi gerçekleştirilmiştir. 4.1 bölümünde gerçekleştirilen bu test açıklanmış ve hazırlanan sayısal model sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1.1 40 Cm'den Taban Üzerine Düz Düşme Testi

Kurulan ağ modelini doğrulamak amacıyla fırın 40 cm yükseklikten düz olarak serbest düşmeye bırakılmıştır. Test sonucu ürün ambalajı çıkarılmadan incelendiğinde karton ve EPS parçaların dışında gözle görülür bir hasar görülmemiştir. Ardından ürün, ambalajı çıkartılarak incelenmiştir.. Bunun sonucu üründe 3 adet gözle görülür şekil değişimi gözlemlenmiştir. Bunlar;

- Alt saca eğilme,
- Fan motorunun milinde eksenden kayma,
- Kapak alt çizgisi ve alt sac arasındaki boşlukta azalmadır.

Alt sacdaki eğilme miktarı 5,32 mm'dir. Bu şekil değişimin ürünün çalışmasında negatif etki etme ihtimali olmamakla beraber gözle görülür bir şekil değişimi olduğu için istenmemektedir. Ölçüm alma şekli ve şekil değiştirme bölgesi Şekil 4.4'te bulunmaktadır.



Şekil 4.4 : 40 cm'den düz düşme sonucu taban sacındaki eğilme.

Gözlenen üç şekil değişiminin arasında fırının çalışmasını engelleme riski en yüksek olanı fan motorunun milindeki eksenden kaymadır. Fan motorunun milinde eksenden kayma milin sıkışmasına neden olarak fanın çalışmasını engelleyebilir. 40 cm'den gerçekleştirilen düşme testinde mil tam olarak delik çevresindeki saca ile temas kurmadığı için bu tehlike riski düşüktür. Bununla birlikte daha yüksekten veya aynı ürünün tekrarlı düşmeye maruz kalması durumunda bu risk oluşabilir. Ek olarak, delik

evresindeki saclarda emaye çevresinde yüzeyden soyulmalar görülmüştür. Bu durum fırın yere düştüğü anda milin evre saclara temas ederek geri geldiğinin işareti olarak yorumlanabilir. şekil 4.5'te milin son konumu görülmektedir. Mil merkez noktasından geçen eksenden 6 mm uzaklaşmıştır.



şekil 4.5 : Fan milindeki eksen kaıklığ.

Kapağın dışında yer alan dekoratif cam ile alt sac arasındaki boşluktan sol, orta ve sağ olmak üzere 3 adet l alınmıştır. Alınan değerkler izelge 4.3'te yer almaktadır. Test sonrası kapağın durumu ise şekil 4.6 bulunmaktadır.

Çizelge 4.3 : Test No:1 sonrası kapak ve alt sac arasındaki boşluk

Sol	Orta	Sağ
7,61 mm	7,47 mm	7,34 mm



şekil 4.6 : Kapak ve alt sac arasındaki boşluk.

Kapak ile alt sac arasındaki boşluk ürünün çizimlerinde 8,2 mm'dir. Test sonucundaki durumda kapağın kapanmasında ve aılmasında her hangi bir zorlanma gözlenmemiştir.

EPS parçalar incelendiğinde herhangi bir kırılma görülmemiştir. Malzemenin dış kenarına yakın bölümlerde siyah izler oluşmuştur. Bu izler çarpma sırasında fırının hangi bölümlerinin EPS parçaya daha fazla baskı uyguladığına ilişkin fikir vermektedir. Çarpma sonrasında EPS parçalar Şekil 4.7’de yer almaktadır. EPS parçada görülen siyah izler ve çeperlere yakın bölgelerdeki ezilmeler düşme testi sonrası oluşmuştur.



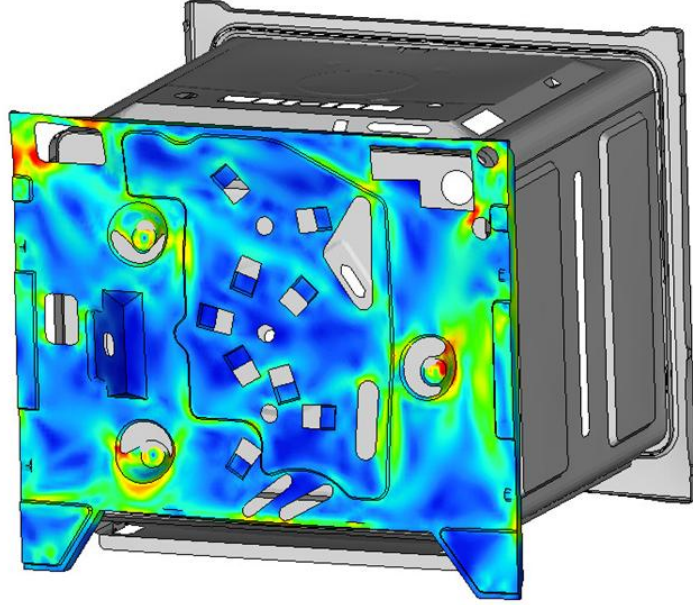
Şekil 4.7 : 40 cm’den düz düşme sonucu genişletilmiş polistren malzemenin son hali.

4.1.2 40 Cm’den Düz Düşme Testinin Sayısal Olarak Modellenmesi

Toplam 717399 elemandan oluşan fırının sayısal modeli Radioss çözücünde çözdürülmüştür. 21 saat 37 dakika süren bir çözümün ardından çarpma sonrası 0.04 bir zaman diliminin sonuçları elde edilmiştir. Sayısal analizlerle ilgili ayrıntılı bilgi 4. bölümde bulunabilir.

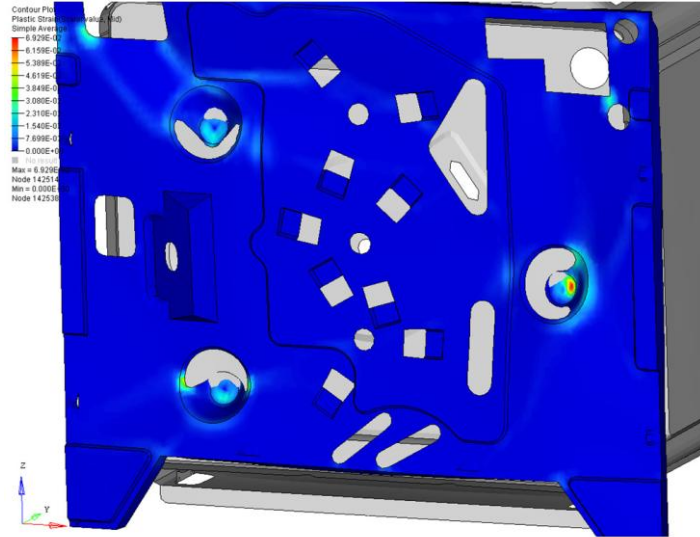
Sayısal analiz sonucu iç sacların arkasında yer alan ve iç sacların dış saclarla bağlantısını sağlayan parçada akma dayanımını aşan gerilmeler ve plastik şekil değişimleri hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de iç saclar ve plastik şekil değişimi hesaplanan bu parça görülebilir. Maksimum gerilme zemine çarpma anından sonraki 0.013 sn anı için kaydedilmiştir.

Contour Plot
Von Mises(Scalar value, Mid)
Simple Average
2.000E+02
1.778E+02
1.556E+02
1.333E+02
1.111E+02
8.889E+01
6.667E+01
4.444E+01
2.222E+01
0.000E+00
No result
Max = 2.723E+02
Node 142514
Min = 0.000E+00
Node 135511



Şekil 4.8 : Arka sactaki gerilme dağılımı.

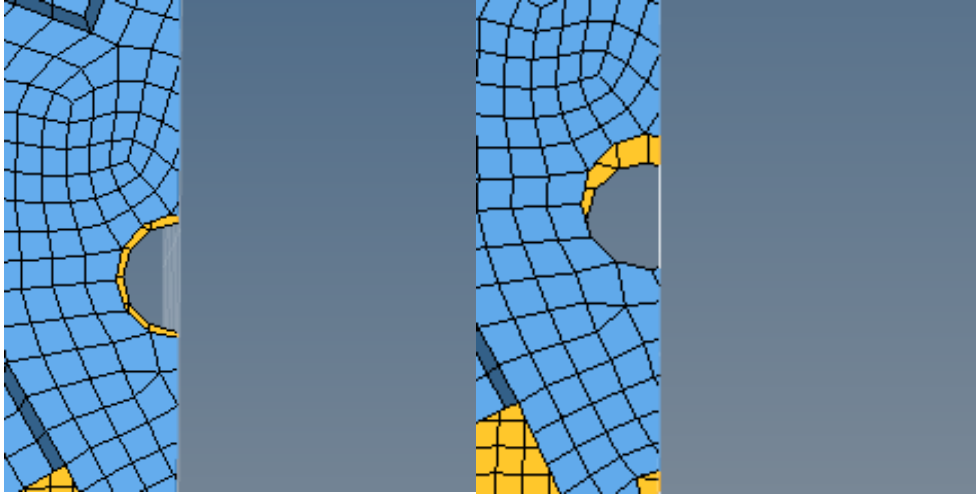
Parçadaki maksimum plastik şekil değişimi 0.07 mm'dir. Şekil 4.9'da bu parçanın fırının zemine temasından sonraki 0.0013 sn anı için plastik şekil değiştirme sonuçları görülebilir.



Şekil 4.9 : Arka sactaki plastik şekil değişimleri.

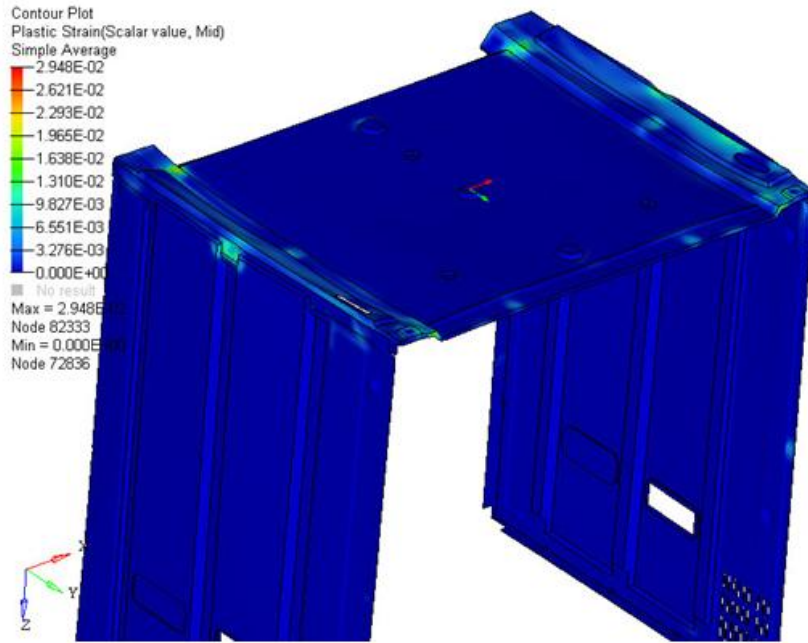
Arka sacta hesaplanan plastik şekil değiştirme değerleri küçük olmakla beraber saclar geri esnedikten sonra motor milinin geçtiği delikler arasında 5,5 mm eksen kaçıklığı

hesaplanmıştır. Bu deliklerin ilk ve son durumlarının kesit görünüşü Şekil 4.10’da yer almaktadır.



Şekil 4.10 : Arka ve iç saclardaki deliklerin düşmeden önceki ve sonraki durumu.

Alt sacın yan saclarla birleştiği bağlantı bölgelerinde ise maksimum 0,04 mm büyüklüğünde plastik şekil değişimi hesaplanmıştır. Bu bölge Şekil 4.11’de görülebilir.



Şekil 4.11 : Alt saclardaki plastik şekil değişimleri.

Plastik şekil değiştirme miktarı küçük olmakla beraber deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için alt sacın yan saclarla birleşim çizgisi ile alt sacın ortası arasında

Z ekseninde ölçüm alınırsa bu yüksekliğin yere çarpmadan önce 2 mm, maksimum sıkışma anında 6 mm, fırın yerden sektikten ve saclar geri esnedikten sonra ise 4,5 mm olduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 4.12’de görülebilir.



Şekil 4.12 : Alt sactaki $t=0,012$ ve $t=0,04$ sn anındaki esnemeler.

Test modelinde kapak ile alt sac arasında görülen boşluk azalmasını ağ modelinin sonucunda doğrulamak için aynı bölgelerden ölçüm alınmıştır. Kapak bölgesinin görseli Şekil 4.13’de, ölçümler Çizelge 4.4’te bulunmaktadır.



Şekil 4.13 : $t=0,04$ sn anı için kapak ve alt sac arasındaki boşluk.

Çizelge 4.4 : 40 cm’den düz düşürme sonucu kapak ve alt sac arasındaki boşluk.

Sol	Orta	Sağ
7,03 mm	5,93 mm	7,56 mm

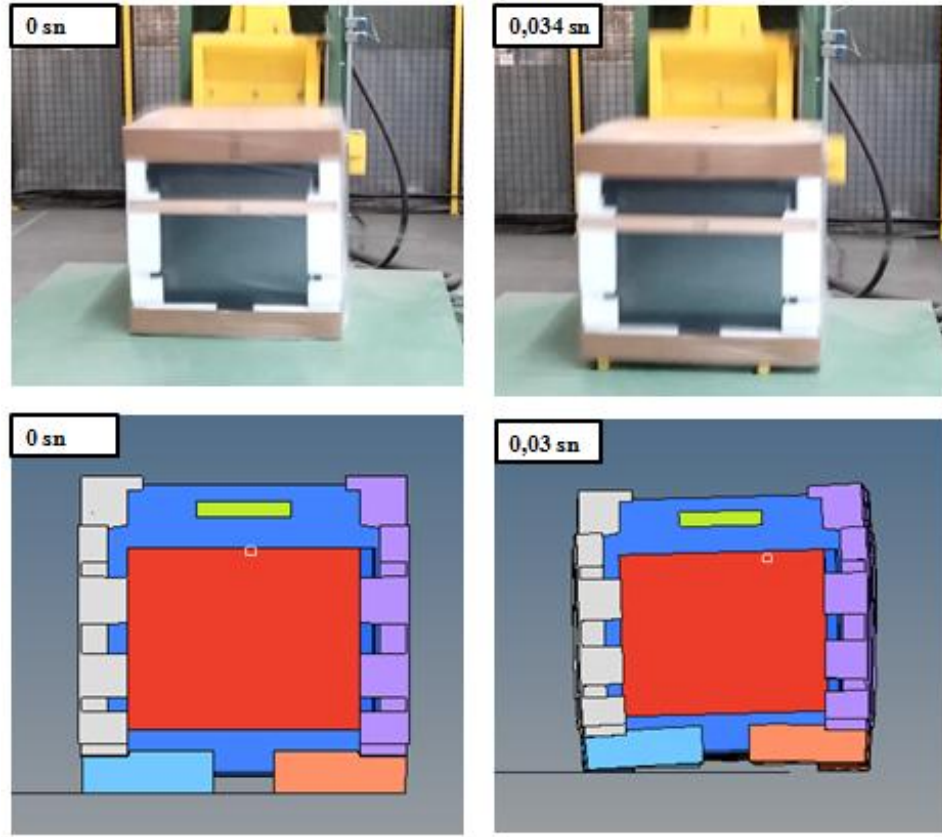
40 cm’den düz düşürme deneyi sonucu elde edilen 3 önemli şekil değişimi sayısal modelle sonucunda da elde edilmiştir. Bu sayısal modeli doğrulamaktadır ve modelin tez çalışmasında kullanılabileceğini göstermektedir. Sayısal model ile elde edilen sonuçta ürün ve içerisindeki parçaların hareketinde gerçek durumundan bir farklılık bulunmamaktadır. Deney sonucunda EPS malzeme üzerinde olan izler ve şekil değişimleri sayısal modelde de elde edilmiş ve EPS için kullanılan malzeme modeli doğrulanmıştır. Çizelge 4.5’te deney sonucunda görülen şekil değişimlerinin değerleri ve sayısal model çözümünde bu bölgelerden alınan ölçümler bulunmaktadır. Deney sonucu görülen şekil değişimleri küçük hata paylarıyla sayısal modelde de hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 : 40 cm’den düz düşürme deney ve sayısal model karşılaştırması.

	Deney sonucu	Sayısal model sonucu
Alt saca eğilme.	5,32 mm	4,5 mm
Fan motorunun milinde eksenden kaçıklık.	6 mm	5,5 mm
Kapak alt çizgisi ve alt sac arasındaki boşluğun orta noktası.	7,47 mm	5,93 mm

Ayrıca test sırasında gerçekleştirilen kamera kayıtlarından hesaplanan fırının yerden geri sekme süresi ile sayısal model sonucu elde edilen geri sekme süresi arasındaki küçük hata payı modelin doğrulanmasını sağlayan diğer bir veridir. Test sırasında saniyede 30 kare kaydeden kamera kullanılmıştır. Bu kameradan elde edilen görüntülerde fırın yere çarpma sırasında 1 video karesi yer ile temas halinde görülmektedir. 0,034 saniyelik bir çarpma süresini gösteren bu video karesine karşılık

sayısal model sonucunda 0,030 saniyelik bir çarpma süresi hesaplanmıştır. Geri sekme süreleri Şekil 4.14'te görülebilir.



Şekil 4.14 : Test ürününün ve sayısal modelin yerden geri sekme sürelerinin karşılaştırılması.

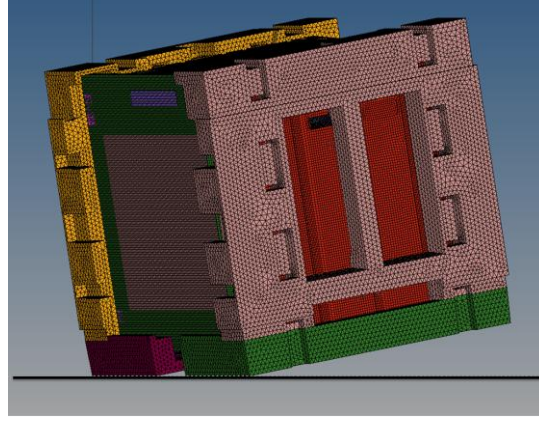
4.2 40 Cm'den Taban Ön Kenar Üzerine Düşme

40 cm'den taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizi için 0.04 sn süren bir çözüm animasyonu 21 saat 59 dakika sürede hesaplanmıştır. Çözüm ile ilgili veriler Çizelge 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : 40 cm'den taban ön kenar üzeri düşme sayısal analizi için çözüm süresi.

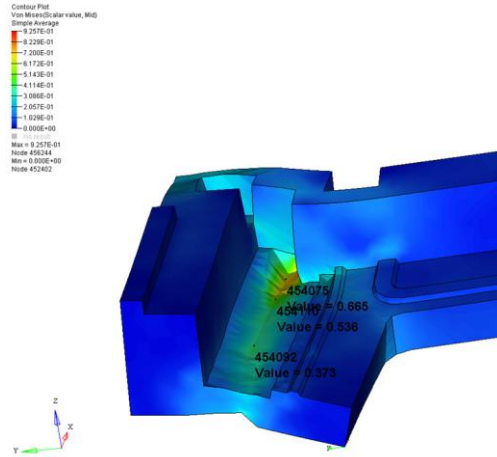
Animasyon Süresi	Çözüm Süresi	Hareketli Raf Alt Bölgesi Zaman Adımı	Fırın Alt Bölgesi Zaman Adımı
0.04 sn	21 saat 59 dakika	4.6 E-08	21 E-08

Bu sayısal analiz modelinde ambalajlı haldeki fırına ön taban kenarına göre 10 derecelik bir açı verilmiştir. Sınır şartı olarak Çizelge 4.1’de yer alan hız değeri olan 2,80 m/s uygulanmıştır. Ürünün zemine çarpma konumu Şekil 4.15’te yer almaktadır.



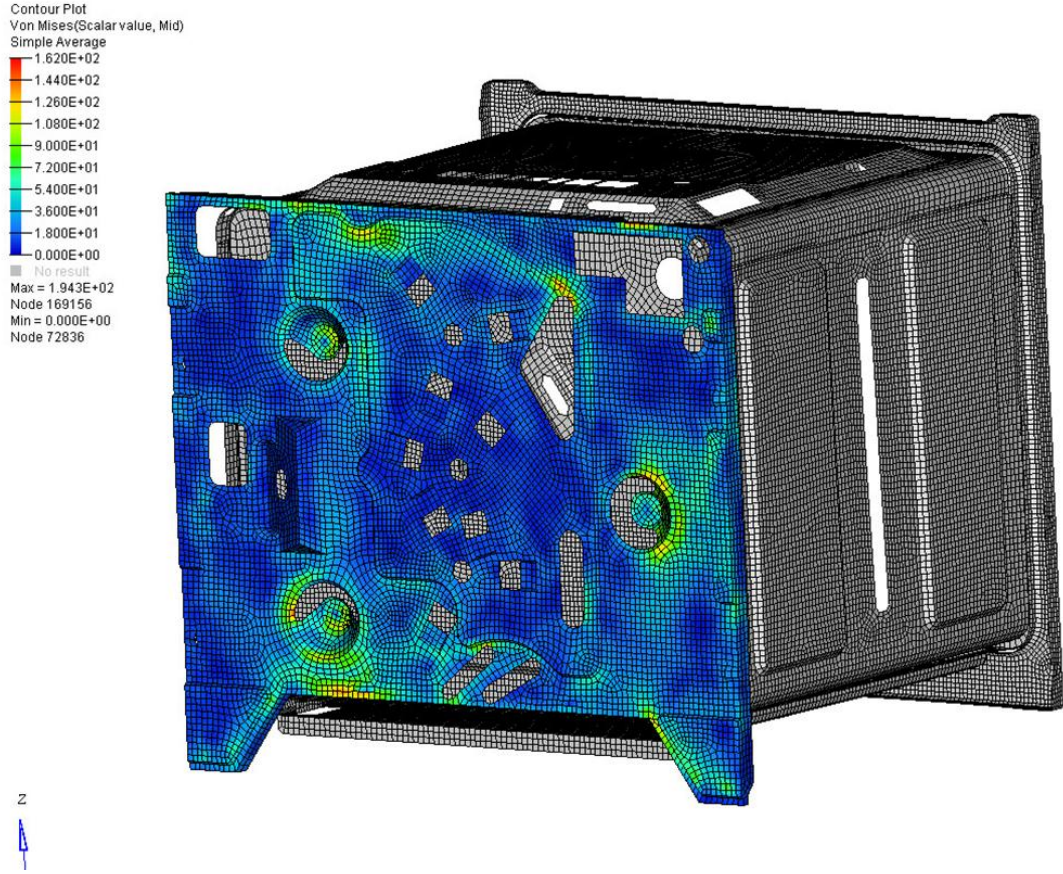
Şekil 4.15 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde fırının çarpma konumu.

Sayısal model sonucu tabanda yer alan EPS malzemenin ön bölgelerinde kesme dayanımının üzerinde gerilmeler hesaplanmıştır. EPS malzemedeki gerilme dağılımı Şekil 4.16’da bulunmaktadır. Şekildeki sayısal değerler MPa biriminden gerilme değerini belirtmektedir.



Şekil 4.16 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde EPS ambalaj malzemesinde hesaplanan gerilme dağılımı.

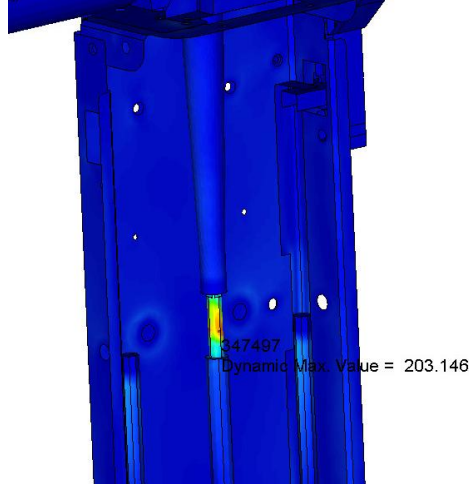
Düz düşme sonuçlarına benzer şekilde iç sacların arkasında yer alan saca akma dayanımının üzerinde gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu parçadaki gerilme dağılımı Şekil 4.17’de bulunmaktadır.



Şekil 4.17 : Taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizinde iç sacların arkasındaki saca hesaplanan gerilme dağılımı.

Gerçekleştirilen düşme testlerinde hareketli raf mekanizmaları prototip olarak fırına montaj edildiği için test sonrası mekanizmadan herhangi bir ölçüm alınmamıştır. Ağ modelinin bir avantajı olarak hareketli raf mekanizması ayrıntılı olarak modellenerek sayısal analiz sonucu hasar oluşması olası parçaları incelemek mümkün olmuştur.

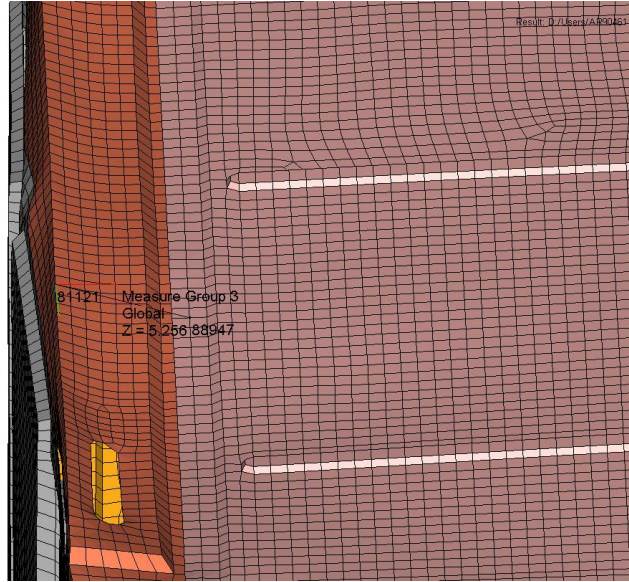
Şekil 4.18’de mil bağlantı noktasındaki gerilme yığılması görülmektedir. Mekanizma sac ağırlıklı yapısı sayesinde çarpma etkisiyle oluşan şok dalgalarını geniş bir yüzey üzerinden fırın ana sacına aktarabilmektedir. Rafın yükselip alçalmasını sağlayan milin bağlantı bölgesinde yaklaşık olarak 200 MPa gerilme hesaplanmıştır. Kullanılan çelik kalitesi için bu gerilme değeri herhangi bir hasar riski oluşturmamaktadır.



Şekil 4.18 : Hareketli raf mekanızmasında hesaplanan maksimum gerilme.

4.3 40 Cm'den Taban Sağ Kenar Üzerine Düşme

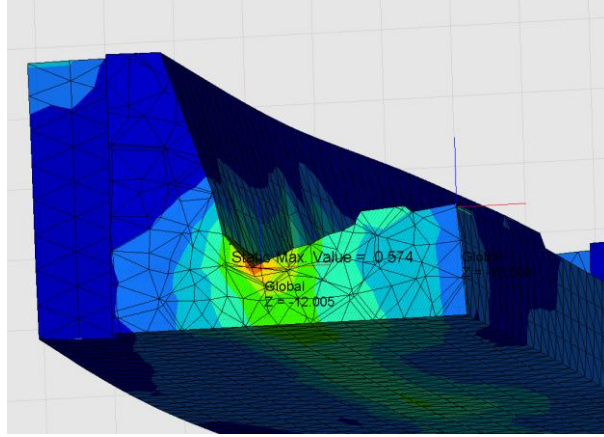
Sayısal analiz sonucu modelde en önemli şekil değişikliği alt sacın sağ bölümünde yer alan sağ bağlantı bölgesinde fırın içerisine doğru deformasyon şeklinde gerçekleşmiştir. Bu durumun sayısal analiz sonucunun görseli Şekil 4.19'da yer almaktadır.



Şekil 4.19 : 40 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu hesaplanan şekil değişimi.

Düşme kenarında yer alan EPS malzemede yüksek sıkışma oranları hesaplanmıştır. Maksimum sıkışma anı olan 0.0136 sn için parçanın durumun kesit görseli Şekil 4.20'de yer almaktadır. Görüldüğü gibi EPS malzemenin fırının taban merkezine

doğru olan bölümü ezilmeden kalırken, fırının köşesinde yer alan bölüm %57 oranında sıkışmaktadır.

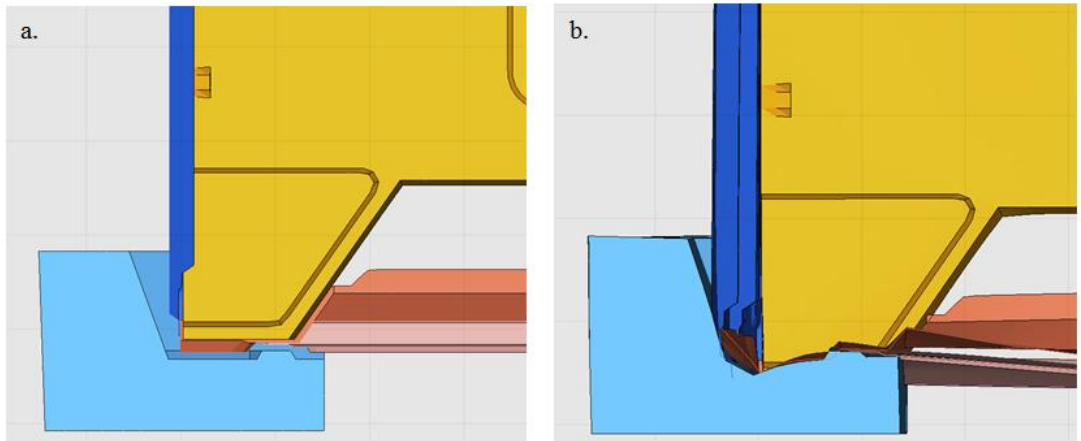


Şekil 4.20 : 40 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu EPS malzemede oluşan ezilmeler.

Şekil 4.20'de yer aldığı gibi malzemede maksimum 574 kPa büyüklüğünde gerilme hesaplanmıştır. Bu değer malzemenin kesme dayanımının üstündedir.

4.4 70 Cm'den Taban Üzerine Düz Düşme

Gerçekleştirilen diğer sayısal analizlerden farklı olarak 70 cm'den düşme testinde en göze çarpan etki yan sacların açılmaya çalışarak EPS malzemeye baskı uygulamasıdır. Şekil 4.21'de bu durum $t=0$ sn ve $t=0.027$ sn için görülebilir.



Şekil 4.21 : 70 cm'den taban sağ kenar üzerine düşme sayısal analizi sonucu yan sacta görülen açılmalar.

5. DENEYSEL YAKLAŞIM

Gerçekleştirilen sonlu eleman çözümlerini doğrulamak amacıyla Arçelik A.Ş. Bolu Pişirici Cihazlar İşlemesi'nde yer alan düşme testi düzeneğinde testler gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği sayesinde istenen yükseklik ve açı değerlerinde düşme testi gerçekleştirmek mümkündür. Ayrıca olası iş kazası risklerini de en aza indirmektedir. Test düzeneği Şekil 5.1'de görülmektedir. Düzenek çevresinde çalışma sırasında yaklaşılmasını önleyen bir çit sayesinde olması muhtemel bir iş kazası önlenmektedir.



Şekil 5.1 : Düşme test düzeneği.

Ürünün düzeneğe yerleştirildiği palet, bir motor yardımıyla testin gerçekleştirilmek istendiği yüksekliğe çıkarılmaktadır. Sisteme komut verildiği zaman palet ürünün düşüş hızından daha hızlı bir şekilde zemine gelmekte ve çarpma anında ürünle teması olmayacak şekilde zemindeki hazneye girmektedir.

Hareketli raf sistemini içeren prototip model ile düşme testleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan test prosedürüne göre aynı ürün farklı pozisyonlarda sırasıyla düşürülmekte ve testler arasında ürüne herhangi bir işlem uygulanmamaktadır. Fakat

bu çalışma sırasında gerçekleştirilen testlerde her bir testin ardından üründe oluşan hasarları görebilmek için her testten sonra ürün düzenden alınmış ve ambalajı açılarak oluşan şekil değişimleri incelenmiştir. Ardından kullanılmamış EPS parçalar yerleştirilerek ürün tekrar ambalajlanmıştır.

Prototip aşamasında bir çalışma olduğu ve ekonomik nedenlerle düşme testlerinde tek bir fırın kullanılmıştır. İdeal durum her bir test için yeni bir fırın kullanılması olmakla beraber sayısal modelden elde edilen sonuçlardaki temel şekil değişimlerini ve çarpma anındaki ürünün davranışını doğrulamak için bu testler yeterli olmuştur.

EPS parçaların her testten sonra değiştirilmesi sayesinde parçalanmış EPS parçalar nedeniyle oluşabilecek daha büyük şekil değişimleri önlenmiştir.

İlk test dışındaki testlerde ürün artık tekrarlı darbelere maruz kaldığı için yapıda üst üste eklenen şekil değişimleri oluşacaktır. Bu nedenle ilk test haricindeki testlerden alınacak ölçümler, hazırlanan sayısal modeli tam olarak yansıtmayacaktır. Bununla birlikte hasar bölgelerinden ve EPS parçada gerçekleşen kırılma ve ezilmelerden faydalı çıkarımlar yapılmıştır.

Dört adet düşme testi gerçekleştirilmiştir. Senaryolar Çizelge 5.1’de görülebilir.

Çizelge 5.1 : Deneysel yaklaşımda gerçekleştirilen testler.

Test No	Düşme Yüksekliği	Yere Değme Pozisyonu
1	40 cm	Taban üzerine düz
2	40 cm	Taban ön kenar üzerine
3	40 cm	Taban sağ kenar üzerine
4	70 cm	Taban üzerine düz

Her testten sonra değiştirilen EPS parçalar shrink olarak isimlendirilen plastik filmle sarılmaktadır. Bu sayede ambalajda yer alan EPS, karton ve ürün ayrılmamaktadır. Teste sokulan nihai ürün Şekil 5.2’de görülebilir. Hazırlanan sayısal modelde ürünün çarpmadan önce sahip olacağı hız hesaplanarak bu hız çarpma anından önce ürüne ilk hız değeri olarak verildiği için bilgisayar modeli için parçaların ayrılması riski yoktur. Bu nedenle plastik filmin modele dahil edilmemesi sonuçları etkilememiştir.



Şekil 5.2 : Düşme testine hazırlanmış ürün.

Üründe EPS parçaların arasına yerleştirilen tahta parçaları birkaç ürünün sıkıştırılarak beraber taşınması sırasında hasar görmesini engellemek için yerleştirilmiştir. Çalışma kapsamında bu etki incelenmeyeceği için tahtalar sayısal modele eklenmemiştir.

EPS parçalara ek olarak karton da, petek formuna benzer yapısı sayesinde bir miktar sönüm özelliğine sahiptir. Fakat EPS malzemenin sahip olduğu sönüm özelliğine göre bu etki oldukça küçük olduğu için karton parçalar modeli daha karmaşık hale getirmemek adına analizlerde kullanılmamıştır.

İlk test hazırlanan sayısal modeli doğrulamakta kullanılmıştır. Bu testin sonuçları 4.1 Sayısal Modelin Test İle Doğrulanması bölümünde bulunmaktadır.

5.1 40 Cm'den Taban Ön Kenar Üzerine Düşme

İlk testin ardından ürün ambalajına yeni EPS parçalar yerleştirilerek plastik film ile tekrar kaplanmıştır. 5. Bölümün başında belirtildiği gibi testlerde aynı ürün kullanıldığı için bu test sonucundan ölçümleri yorumlarken bunu dikkate almak gerekecektir.

Test sonucunda alt sac ve kapak camı arasındaki mesafenin biraz daha azaldığı ve EPS parçaların ön bölümden kırıldığı görülmüştür. Şekil 5.3'te kırılan EPS parça görülebilir.



Şekil 5.3 : 40 cm'den ön kenar üstüne düşme sonucu genişleştirilmiş polistrende oluşan kırılma.

Alt sac ve kapak arasındaki boşluk değerleri Çizelge 5.2'dedir.

Çizelge 5.2 : Test No:2 sonrası kapak ve alt sac arasındaki boşluk.

Sol	Orta	Sağ
7,29 mm	6,76 mm	7,16 mm

5.2 40 Cm'den Taban Sağ Kenar Üzerine Düşme

Bu testte fırın 40 cm yükseklikten taban sağ kenarı üzerine bırakılmıştır.

Test sonucu ürün incelendiğinde taban sacının sağ kenara yakın bölgesinden 4,34 mm içeri doğru şekil değişimi görülmüştür. Şekil 5.4'te bu durum görülebilir.



Şekil 5.4 : 40 cm'den sağ kenar üzerine düşme sonucu alt sacta oluşan eğilme.

EPS önceki iki testten farklı olarak fırın ile yan temas kenarlarından kırıldığı görülmüştür. Fırının sağ alt kısmına yerleştirilen EPS parçanın son durumu Şekil 5.5'de yer almaktadır.



Şekil 5.5 : 40 cm'den sağ kenar üzerine düşme sonucu genişletilmiş EPS parçada görülen kırılma.

5.3 70 Cm'den Düz Düşme

Gerçekleştirilen son testte ürün 70 cm'den düz olarak zemine bırakılmıştır. Test sonucu fırının üst sacının sol kenardan yerinden çıktığı görülmüştür. Bu durum Şekil 5.6'da görülebilir.



Şekil 5.6 : 70 cm'den düz düşme sonucu tavan sacında oluşan ayrılma.

Ürün yerleştirildiği zaman EPS parça ile teması bulunmayan yan saclarda, düşme testi sonrası EPS izleri gözlemlenmiştir. Bu izler Şekil 5.7'de yer almaktadır.

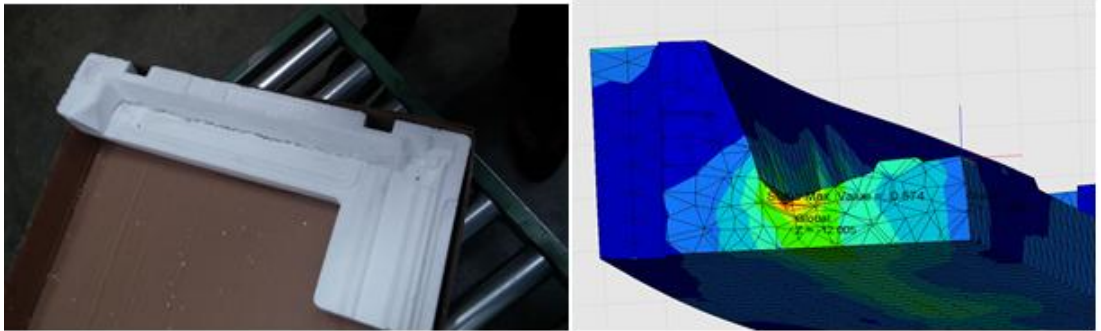


Şekil 5.7 : 70 cm'den düz düşme sonucu yan saclarda görülen EPS izleri.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında ev tipi bir fırının düşme testi sayısal olarak modellenmiştir. Çalışma sırasında kurulan ağ yapısı gerçekleştirilen testler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sayısal model ile düşme testi kaynaklı masraflar azalacak ve ileride çalışma yapılacak parçalar daha tasarım aşamasındayken sayısal olarak analiz gerçekleştirilebilecektir.

EPS parçalar çoğunluğunu havanın oluşturduğu genleştirilmiş yapısı ve şekil değişim hızına bağlı mekanik davranışları nedeniyle sayısal olarak modellenmesi zor olarak sınıflandırılmaktadır. Hazırlanan ağ yapısının ilk çözümlerinde de bu zorluklarla karşılaşmış fakat uygun malzeme modeli ve kullanılan gerilme-uzama eğrisiyle deneysel yaklaşıma uygun bir sayısal model elde edilmiştir. Şekil 6.1’de 40 cm’den taban sağ kenar üzerine düşme durumu için test ve sayısal analiz sonucu EPS malzemede görülen şekil değişimleri görülebilir. Sayısal modelde EPS parçalar için hasar modeli hazırlanmadığı için bu modelin sonuçlarında kırılma görülmemiştir. Fakat testteki parçanın kırıldığı bölgede sayısal modelde de yüksek sıkışma ve gerilme değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.1 : Sayısal yaklaşımla EPS parçada hesaplanan şekil değişiminin test ile karşılaştırılması.

Fırında kullanılan sacların sayısal modelde plastik şekil değişimine uygun olarak modellenmesi sayesinde deneysel yaklaşımda ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçları oldukça benzerdir. 40 cm’den taban sağ kenar üzerine düşme testi sonucu

taban sacındaki şekil değişiminin sayısal analiz sonucuyla karşılaştırılması Şekil 6.2’de görülebilir.



Şekil 6.2 : Sayısal yaklaşımla taban sacında hesaplanan şekil değişiminin test ile karşılaştırılması.

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçların şekil değiştirme bölgeleri aynıdır. Taban sacında 4,34 mm hesaplanan maksimum şekil değişimi, sayısal modelde 5,25 mm olarak hesaplanmıştır. Deneysel yaklaşımda testler gerçekleştirilirken aynı fırının kullanılması nedeniyle fırının tekrarlı bir darbeye maruz kaldığı dikkate alınmalıdır.

Deneysel çalışmada gerçekleştirilen ilk test hazırlanan sayısal modelin doğrulanmasında kullanılmıştır. Sonuç olarak test sonucu fırında gözlemlenen üç önemli şekil değişiminin sayısal model sonucunda da aynı bölgelerde olduğu görülmüştür. Sadece büyüklüklerinde küçük hata payları mevcuttur.

EPS malzemenin şekil değiştirme hızına bağlı olarak özelliklerinin elde edilmesi çalışmada ilerletilebilecek bir yöndür. Kurulan sayısal modelde kullanılan statik yük altındaki gerilme-uzama eğrisi 40 cm’den gerçekleştirilen testlerle yüksek oranda benzerlik göstermiştir. Bir fırının düşmesi muhtemel yüksekliklerde ulaşılabilecek şekil değiştirme hızlarının, fırında kullanılan 20 kg/m³ yoğunluğundaki EPS malzemenin mekanik davranışında oluşturacağı farklılıkların incelenmesi faydalı olacaktır.

Modelde detaylandırılabilen diğer bir alan kapakta kullanılan cam için malzeme modelidir. Literatürde beyaz eşya sektöründe kullanılan camlar için gerçekleştirilmiş sayısal modelleme çalışmalarının kısıtlı olduğu görülmüştür. Cam modellemesi

alanında yapılacak olan bir çalışma düşme sonucu oluşacak cam hasarlarını önlemede yararlı olacaktır.

Mevcut haliyle sayısal model EPS parçanın şekil ve kalınlık optimizasyonunda büyük fayda sağlayacaktır. Kurulan ağ yapısı üzerinde gerçekleştirilecek küçük değişiklikler ile aynı modeli optimizasyon analizinde kullanmak mümkündür. Kırılma oluşmadığı sürece deneysel sonuçların incelenmesi sırasında gözden kaçabilecek bir ayrıntı olan, EPS parçanın dış çeper bölgelerinin daha fazla sıkışması durumu sayısal analiz sonuçlarında net olarak gözükmemektedir. Bu duruma uygun olarak gerçekleştirilecek bir tasarımda EPS malzemeyi fırının merkezinde daha az, yüksek gerilme ve sıkışma değerlerinin görüldüğü bölgelerde ise daha fazla kullanmak mümkün olacaktır. Bu tasarım, fırın ambalajının düşme testindeki performansını arttıracak gibi kullanılan malzeme miktarını azaltacaktır. Bu sayede maliyet avantajı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Görücüoğlu, B.** (2005). “Çamasır Makinası Düşme Testi Deney Ve Simulasyonu”, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [2] **Gerçeker, B.** (2012). “Drop Test Simulation Of A Munition With Foams And Parametric Study On Foam Geometry And Material”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [3] **Neumayer, D., Chatiri, M. ve Höermann M.** (2006). “Drop Test Simulation of a Cooker Including Foam Packaging and Pre-stressed Plastic Foil Wrapping”, 9th International LS-DYNA Conference.
- [4] **Posch, W. ve Sageder, A.** (t.y.). “Borealis Polypropylene-Helping To Shape The Future Of The White Goods Industry”, Borealis A.Ş., Avusturya.
- [5] **Öztürk, U.** (2008). “Mechanical Behavior Of Low Density Polymeric Foams Under Multiple Loading And Unloading”, Bogaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [6] **Lönn J., Navred J.** (2006). “Drop Test Of A Soft Beverage Package – Experimental Tests And A Parameter Study In Abaqus”, Lund Üniversitesi, İsveç.
- [7] **Martinez J. ve Vicencio J.** (2011). “Using Computer Aided Engineering Processes in Packaging Design Development”, Mabe A.Ş., Meksika.
- [8] **ASTM D 5276 – 98.** (1998). “Standart Test Method For Drop Test Of Loaded Containers By Free Fall”, Ameerican Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, ABD.
- [9] **ASTM D 880 – 92.** (2002). “Standart Test Method For Impact Testing For Shipping Containers And Systems, Ameerican Society For Testing And Materials”, West Conshohocken, PA, ABD.
- [10] **Ferkel, E.** (2010). “Packaging Test Procedure for Purchased Products”, The Vollrath A.Ş., Wisconsin, ABD.
- [11] **Ambalaj Test Talimati** (t.y.). Arçelik A.Ş., Bolu.
- [12] **Packaging With Styropor** (2006). BASF A.Ş., Almanya.
- [13] **Croop, B. ve Lobo, H.** (t.y.). “Selecting Material Models for the Simulation of Foams in Ls-Dyna”, 7th European LS-DYNA Conference, NY, ABD.
- [14] **Mills N., Stampfli, R. , Marone, F., Brühwiler P.** (2009). “Finite Element Micromechanics Model Of Impact Compression Of Closed-Cell Polymer Foams”, Birmingham Üniversitesi , İngiltere.
- [15] **CEAST 9300 Series Ürün Katalogu** (t.y.). Instron A.Ş., Türkiye.
- [16] **Ürün Katalogu** (2013). Erdemir A.Ş., Zonguldak, Türkiye.
- [17] **RadioSS Theory Manual** (2012). Altair A.Ş., Almanya.

- [18] **Johnson, G. ve Cook W.** (1983). “A Constitutive Model And Data For Metals Subjected To Large Strains”, Honeywell A.Ş., Minesota, ABD.
- [19] **Radioss Reference Guide** (2012). Altair A.Ş., Almany.
- [20] **Verlysen P., Peirs J. ve Slycken J.** (2011). “Effect Of Strain Rate On The Forming Behaviour Of Sheet Metals”, Ghent University, Belçika.
- [21] **Practical Aspects of Finite Element Simulation** (2014). Altair A.Ş., Almany.
- [22] **Url 1** <<http://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison>> alındığı tarih 05.07.2014.
- [23] **Bobineau J., Maurel B. ve Morañay L.** (2013). “AMS and Multi-Domain Method in Radioss”, Altair A.Ş., Almany.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Tolga ASA

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 1989

E-Posta : tolga.asa@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi,
Makina Mühendisliği