

EV TİPİ BİR FIRININ DÜŞME TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Zeynep PARLAR *

Tolga ASA **

Kutay EDİS **

Alınma: 03.05.2016; düzeltme: 14.12.2016; kabul: 10.03.2017

Öz: Beyaz eşya sektöründe ürünler genellikle genleştirilmiş polistren malzeme kullanarak ambalajlanmaktadır. Ürün ambalajlanıp tüketiciye ulaşıncaya kadar her an düşme ve darbe etkisinde kalma riskine sahiptir. Olası bir düşme nedeniyle hasar görerek kullanılamaz hale gelecek ürün, satışa hazır bir mamulün 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. Bu nedenle, ürün fabrikadan çıkmadan önce düşme testine tabi tutulmaktadır. Bu testte fabrikadan çıkmaya hazır bir ürünün 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. Sunulan çalışmada bir fırın sayısal olarak modellenmiş ve farklı düşme senaryoları için davranışı incelenmiştir. Sayısal model gerçekleştirilen deneysel düşme testi sonuçları ile doğrulanmıştır. Böylece tasarım aşamasında düşme sırasında hasara uğrayacak parçaların belirlenmesi ve buna uygun iyileştirmelerin yapılması mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Düşme Testi, EPS, Sayısal Modelleme, Fırın

Modeling the Drop Test of Household Oven with Finite Element Method

Abstract: In order to prevent the damages that occur in the course of transportation, polystyrene (EPS) is commonly used in the domestic appliances sector. A product's falling risk during transportation is not only available on the end user spot but also available at any moment after the packaging stage. It causes loss of resources because, ready to sale product became unsalable after damaged by possible fall. As a result, drop test is performed on products. Due to the fact that the samples of the test are required as ready for end use products and these tests are repeated very often, test expenses are very high. It is also not possible to observe movements of the pieces and product dynamics during the impact completely because of the packaging materials. An oven is modeled numerically and its behavior for various drop scenarios are examined in this study. Numerical model is verified with the experimental drop test results. Thus, it is possible to make improvements in the design by predicting probable damaged parts during impact.

Keywords: Drop test, EPS, Numerical Analysis, Oven

1. GİRİŞ

Bir ürün ambalajlandıktan sonra tüketiciye ulaşıncaya kadar her an düşme riskine sahiptir. Bir beyaz eşya ele aldığı anda paketlenmiş ürün farklı ulaşım araçları kullanılarak son kullanıcıya ulaşmaktadır. Ürünün, deniz veya hava yoluyla gerçekleştirilen uluslararası nakliyesi sırasında

* İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, Gümüşsuyu, İstanbul

** Arçelik A.Ş., Merkez ArGe, 34950, Tuzla, İstanbul

Correspondence Author: Zeynep PARLAR (parlarze@itu.edu.tr)

düşme ve darbe etkisine maruz kalma riski bulunmaktadır. Bu durum imalatçı firmalara ambalaj içindeki ürünün herhangi bir nedenle düşmesi veya darbeye maruz kalması durumunda meydana gelebilecek hasarlara karşı önceden tedbir alma zorunluluğu getirmektedir.

Cep telefonları ve elektronik cihazlar gibi taşınabilir aletlerin düşme veya darbeye maruz kalması durumunda karşılaşılan problemler oldukça yaygın olarak incelenmektedir (Wang ve diğ., 2004; Kim ve Park, 2004; Liu ve diğ., 2005; Liu ve Li, 2011; Tempelman ve diğ. 2012). Bununla birlikte, beyaz eşyaların nakliyesi veya depolanması sırasında oluşabilecek bu tür riskleri göz önüne alan oldukça kısıtlı çalışma bulunmaktadır (Posch ve Sageder, 2002; Görcüoğlu, 2005; Neumayer ve diğ., 2006; Altair Engineering, 2011; Mulkoğlu ve diğ., 2015;). Bunun nedeni ambalaj malzemesini modellemenin zorluğu ve ürünleri oluşturan parçaların geometrilerinin karmaşıklığından kaynaklanmaktadır. Bir fırının ele alındığı Neumayer ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdikleri analizde ambalajlamada kullanılan plastik folyonun neden olduğu ön gerilme dikkate alınarak fırının düşme testi modellenmiştir. Fırının düştüğü kenar üzerinde meydana gelen deformasyona sadece değinilmiştir (Neumayer ve diğ., 2006).

Düşme anındaki darbe etkisini incelemek üzere belirli standart düşme testleri bulunmaktadır. ASTM D5276 (1998) ile ASTM D880 (2002) standartlarıyla belirlenmiş olan bu testlerde, nakliye hazır olarak paketlenmiş ürün çeşitli yükseklik ve açılardan serbest düşmeye bırakılmaktadır. Düşme testinde, son kullanıcıya teslim hazır bir ürün kullanıldığı ve testte kullanılan bu ürün hurdaya ayrıldığı için testin maliyeti oldukça fazladır. Ayrıca düşme testi, ürünlerin üretim onayı alması için gerekli olduğundan gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Düşme testinin sayısal olarak modellenmesi gerçekleştirilecek test sayısını azaltarak maliyet avantajı sağlayacaktır. Buna ek olarak bu testi bilgisayar ortamında sayısal olarak modellemek 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.

Sunulan çalışmada devam eden bir fırın tasarımı için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Hypermesh programı kullanılarak oluşturulan bu model, Radioss çözücüsü kullanılarak çeşitli düşme durumları için çözdürülmüştür. Sayısal model hazırlanırken fırını oluşturan sac parçalarda düşme sonrası oluşması muhtemel plastik şekil değişimini tam olarak görebilmek önemlidir. Bunun için sacların imal edildiği çelik için kullanılacak malzeme özelliklerinin buna uygun olmasına önem verilmiştir. Fırında yer alan ve düşme testi açısından önemli diğer bir malzeme ise geliştirilmiş polistrendir (EPS). Beyaz eşyalarda ambalaj malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan bu malzemenin boşluklu yapısı ve darbe hızına yüksek oranda bağlı davranışı nedeniyle sayısal olarak modellenmesi metal malzemelere göre daha zordur. Ayrıca, hazırlanan sayısal modelin gerçek değerleri istenen yakınsaklıkla hesaplayabildiğinin doğrulanması gerekir. Bu amaçla, prototip bir test fırını hazırlanmış ve sayısal modelle aynı yükseklik ve açıyla düşmeye bırakılarak elde edilen sonuçlar sayısal model hesaplarıyla karşılaştırılmıştır.

2. SAYISAL MODELDE KULLANILAN VE DARBE ETKİSİNDE KALAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Fırının ısıya maruz kalan parçaları DC04 kalitesindeki sac malzemeden imal edilmiştir. Bu kalite saclar beyaz eşya üretimine ve derin çekme işlemine uygun, düşük karbonlu saclar olarak nitelendirilmektedir. Sac parçalarda düşme sonucu oluşacak plastik şekil değişimlerini hesaplayabilmek için Radioss çözücüsünde plastik şekil değişimi bölgesindeki malzeme davranışını da modelleyebilen M2_PLAS_JOHNS_ZERIL malzeme kartı kullanılmıştır. Johnson ve Cook (1983) tarafından oluşturulmuş malzeme modeli yüksek hızlı çarpışmalar ve patlamaları sayısal olarak modellemeye olanak sağlamaktadır. Bu model, pekleşme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklık etkilerinin modellenbilmesine imkân tanıdığı için sac malzemelerin plastik bölgedeki davranışlarının sayısal modellenmesinde tercih edilmiştir. Akma gerilmesinin altında ise lineer elas-

tik malzeme davranışı gerçekleşmektedir. Tablo 1’de DC04 saclar için malzeme kartında kullanılan değerler görülmektedir.

Tablo 1: Sayısal modelde saclar için kullanılan malzeme değerleri (Verlysen ve diğ., 2011)

Özellik	Değer
Yoğunluk	7,8 e-09 ton/mm ³
Elastiklik Modülü	210000 MPa
Poisson Oranı	0,300
Akma dayanımı	162 MPa
Pekleşme katsayısı	598
Pekleşme üsteli	0,6

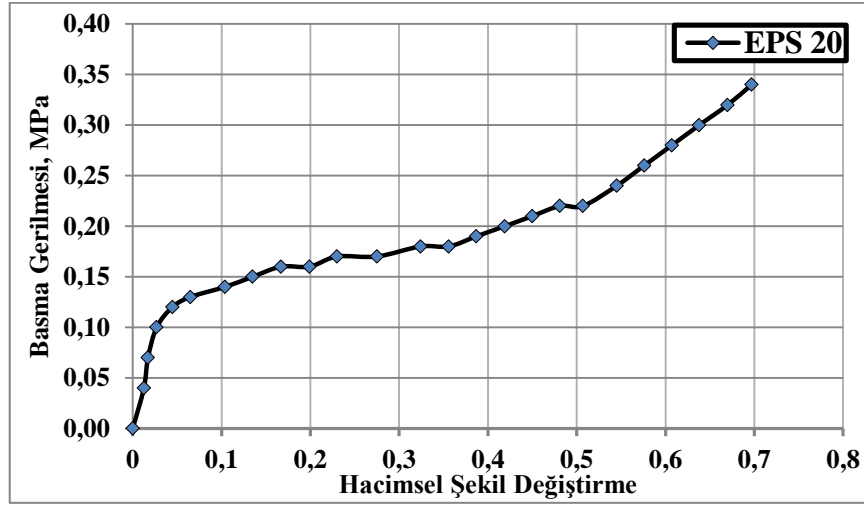
Genleştirilmiş polistren malzemeler enerji sönmleme yetenekleri nedeniyle paketlenme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte kolaylıkla hasar görebilir ve tekrar eden darbeler için uygun değildir. Sunulan çalışmada da fırının nakliye sırasındaki ambalajında köpük malzeme olarak genleştirilmiş polistren (EPS) kullanılmıştır.

EPS parçaların modellenmesinde malzemenin gerçek davranışına olabildiğince yakın doğrulukta olması için EPS’nin uzama-gerilme eğrisinin kullanılabilceği malzeme modelleri incelenmiştir (Croop ve Lobo, 2009). Çalışma kapsamında kolay modellenebilmesi nedeniyle LAW33 malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde de EPS’nin mekanik özellikleri ve uzama-gerilme eğrisi kullanılmakta, ancak anizotropik davranışı ve şekil değiştirme hızının etkisi hesaba dâhil edilmemektedir. Gerçekleştirilen düşme testinde, malzeme yoğunlukla basma yönünde zorlandığı ve şekil değiştirme hızları hata oranını arttıracak seviyeye çıkmadığı için LAW33 malzeme modelini kullanmak malzeme özelliklerini belirlemek için deney gerçekleştirilmeden, gerçeğe uygun bir model elde edilmesini sağlamıştır. Tablo 2’de EPS parçalar için kullanılan mekanik malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 2: EPS’nin mekanik özellikleri (BASF A.Ş., 2006)

Özellik	Değer
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 kPa

Tablo 2’de verilen mekanik özelliklere ek olarak EPS parçalar için LAW33 malzeme kartında kullanılan hacimsel şekil değiştirme-basma gerilmesi eğrisi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1:

EPS parça için kullanılan şekil değiştirme-gerilme eğrisi [BASF A.Ş., 2006]

Çelik saclar ve EPS parçalar dışında fırında bulunan alüminyum, poliamid (PA) ve cam parçalar lineer-elastik malzeme özelliklerini modelleyen M1_ELAST malzeme kartı kullanılarak ağ yapısına dâhil edilmiştir. Bu parçaların modellenmesindeki amaç sistemin ağırlığını düzgün hesaplamaktır. Bu malzemeler için kullanılan mekanik özellikler Tablo 3'te görülmektedir.

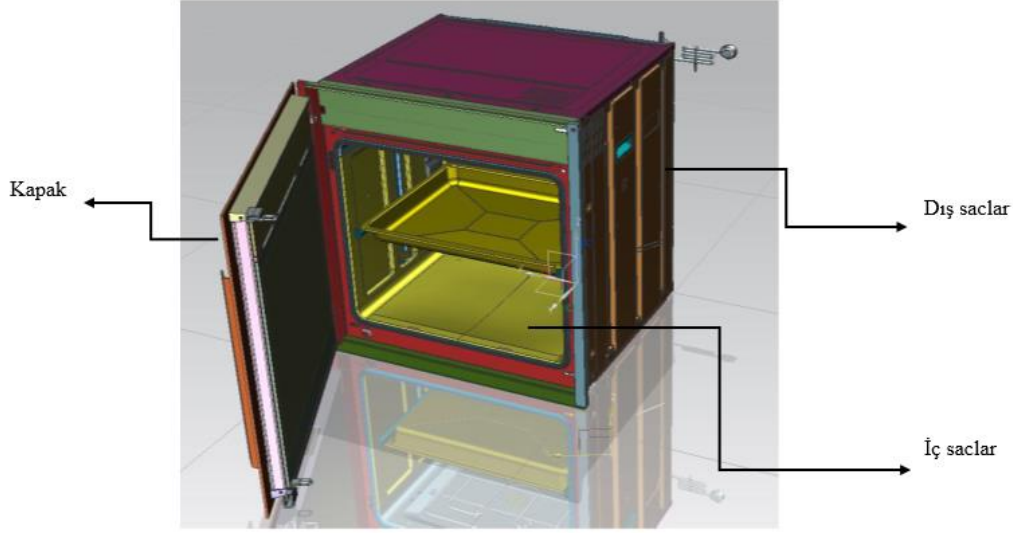
Tablo 3: Alüminyum, PA ve cam parçalar için kullanılan malzeme özellikleri (Gere ve Timoshenko, 1997; Matiense ve Warlimont, 2005)

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

3. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI

Model oluşturma aşaması analiz çalışmasının en fazla zaman ve maliyet alan aşaması olmaktadır. Kullanılan eleman boyutu küçüldükçe toplam eleman sayısı artmakta ve gereken zaman adımı küçülmektedir. Bu durum, çözüm süresini ise uzatacaktır. Çözüm süresinin uzamaması için ağ modelini kurarken oluşturulan elemanların minimum kenar boyutlarının gerekenden küçük olmamasına dikkat edilmiştir.

Fırının ana sac yapısı ortalama 2 mm kenar boyutuna sahip elemanlarla modellenmiştir. Tasarım aşamasındaki raf mekanizmasında yer alan plastik parçalar nedeniyle ise raf mekanizması 0,5 mm büyüklüğünde kabuk (shell) elemanlar ile modellenmiştir. Kullanılan kabuk elemanlar birinci mertebededir. Şekil 2'de çalışmanın gerçekleştirildiği fırının CAD modeli görülmektedir. Ürünün daha iyi anlaşılabilmesi için analizlerde kullanılan EPS parçalar Şekil 2'de gösterilmemiştir.



Şekil 2:
Modellenen fırının 3 boyutlu çizimi

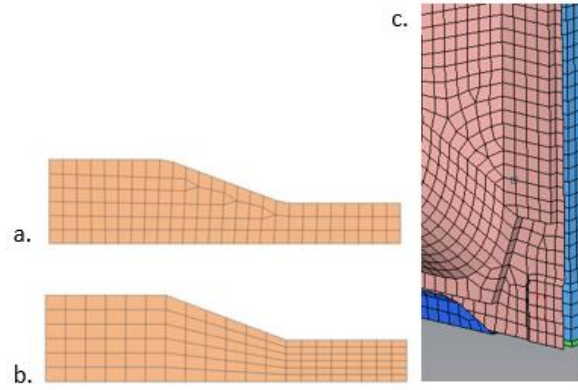
Tablo 4’te ağ modelinde kullanılan eleman sayıları gruplara göre ayrılmış halde verilmiştir. Görüldüğü gibi elemanların büyük bir çoğunluğu EPS parçalarda ve tasarlanan raf mekanizmasında kullanılmıştır.

Tablo 4: Gruplara göre ağ yapısında yer alan eleman sayıları

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

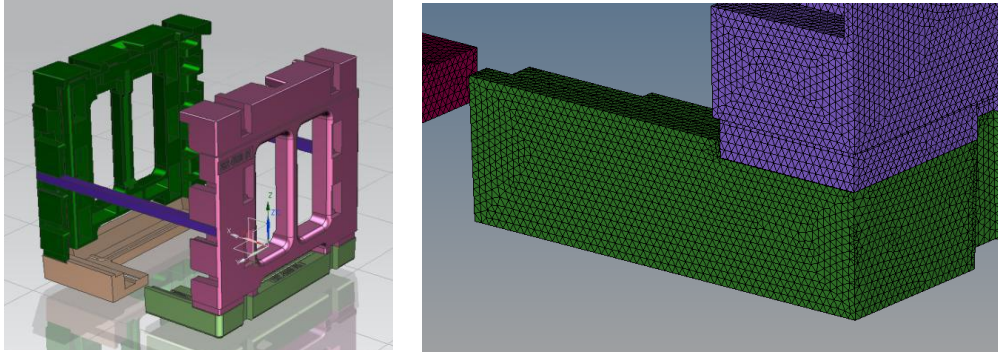
Statik yapısal analizlerde üçgen elemanlar istenmezken çarpma, darbe veya düşme gibi yüksek hızlı hareketleri içeren testlerde bu durum tam tersidir. Üçgen elemanlardan kaçınmak için gerçekleştirilen eleman geçişlerini uygulamaktansa eleman boyutunu korumak üzere darbe yönünde üçgen eleman uygulamak tavsiye edilmektedir (Altair Engineering, 2014). Sonlu eleman modelindeki geçişler bu durum göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Ürünün nakliyesinde kullanılan EPS geometrik yapısı nedeniyle dikdörtgen 6 yüzlü (hexahedral) elemanlar ile modellenememiş, bu yüzden üçgen tabanlı piramit elemanlar (tetrahedral) kullanılarak modellenmek zorunda kalınmıştır. Kullanılan bu elemanların en önemli eksisi modeldeki eleman sayısını artırarak çözüm süresini uzatmasıdır. Bütün fırın modelinde 717399 eleman bulunmaktadır. EPS parçanın 3 boyutlu çizimi ve ağ modeli Şekil 4’de görülmektedir. 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 da modelde göz önüne alınmıştır.



Şekil 3:

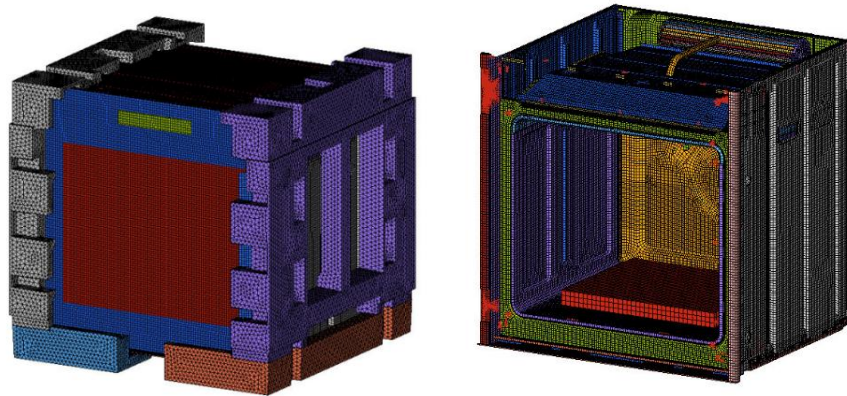
a. Darbe analizleri için önerilen eleman yapısı. b. Statik analizler için önerilen eleman yapısı. c. Fırın dış sacında buna uygun olarak gerçekleştirilen eleman geçişi



Şekil 4:

Polistren parçaların ağ modeli

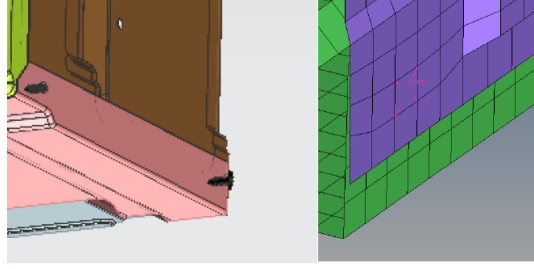
Şekil 5’de ise fırının tüm parçalarının modellenmiş durumdaki montaj hali görülmektedir. Gerçekleştirilen analiz senaryoları bu model üzerinden çözdürülmüştür.



Şekil 5:

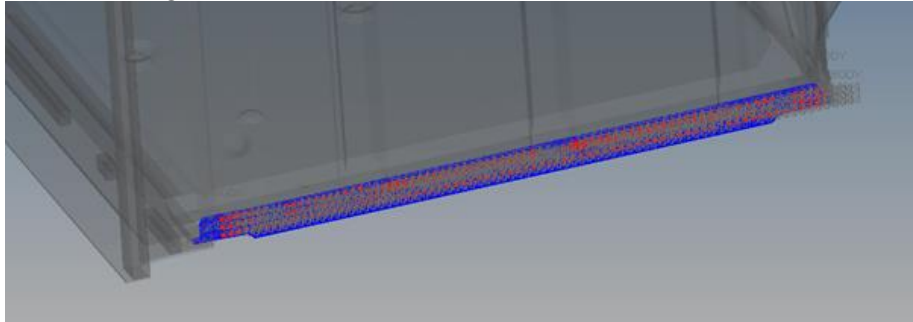
Hazırlanan ağ modeli

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 6'da vida bağlantısının üç boyutlu modeli ve hazırlanan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 6:
Kurulan ağ modelindeki vida bağlantıları

Vida bağlantılarının olduğu bölgelerde saclar üst üste yerleştirildiği için bu bölgelerde saclar arası temas tanımlanmadığı takdirde analiz sonuçlarında saclar arasında girişim görülme 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 7'de görülmektedir. Radioss çözücüsünde Tip 7 olarak tanımlanan temas algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmada temas, tanımlanan bir yüzey (master surface) ve nokta takımı (node set) arasında gerçekleşmektedir. Algoritmanın bir noktanın aynı anda temas yüzeyinin birden fazla bölümlerine, kenar ve köşelerine temasına izin vermesi bu temas tipinin başlıca özelliklerindedir. Şekil 7'de görülen temasta iç sac bölgesi temas yüzeyi, dış saclardaki ağ yapısındaki noktalar ise nokta takımı olarak tanımlanmıştır. Hazırlanan ağ modelinden gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek için buna benzer toplam 96 adet temas tanımlaması gerçekleştirilmiştir.



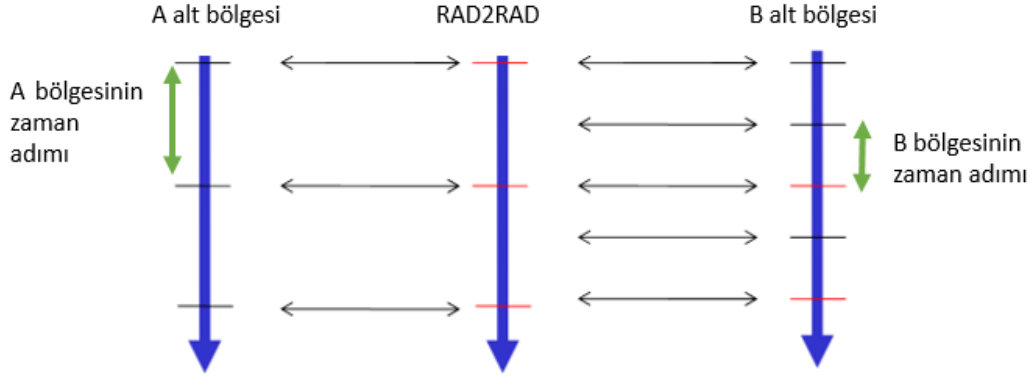
Şekil 7:
Dış saclardaki vida bölgelerinde oluşturulan temas

Fırında pişirilecek olan ürünün yerleştirildiği şasi bölümü kaynaklanarak imal edilmektedir. Sayısal olarak bunu modelleyebilmek için Radioss çözücüsünde Tip 2 temas türü 31 olarak

geçen bağlı temas (tied contact) kullanılmıştır. Bu temas algoritmasında temas halindeki iki yüzey arasında kayma ve izafi harekete izin verilmemektedir.

Raf yapısında kullanılan elemanların modelin çözüm süresini uzatmaması için bu yapı, ağ yapısında ayrı bir bölge olarak tanımlanmıştır. Çoklu Bölge Yaklaşımı'nın kullanılmasıyla çözüm süresinin yarıya indiği görülmüştür. Çalışma kapsamında hazırlanan sayısal modelin 0,04 saniye süren bir sonucunu almak Çoklu Bölge Yaklaşımı kullanılmadan yaklaşık 48 saat sürerken, Çoklu Bölge Yaklaşımı ile 24 saate inmiştir.

Çoklu Bölge Yaklaşımı 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 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 8'de görülmektedir.



Şekil 8:
Çoklu Bölge Yaklaşımı'nın çalışma prensibi

Şekil 8'de yer aldığı gibi A bölgesi daha büyük bir zaman adımıyla çözülürken, B bölgesi daha küçük bir zaman adımıyla çözülmektedir. Bölgeler arasındaki kuvvet geçişleri zamanların eşitlendiği anlarda gerçekleşmektedir. Şekil 8'de 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.

4. SAYISAL MODELİN DOĞRULANMASI

Gerçekleştirilen sonlu eleman modelini doğrulamak amacıyla deneysel olarak düşme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da görülen deney düzeneği ile istenen yükseklik ve açı değerlerinde düşme testi gerçekleştirmek mümkündür. 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.



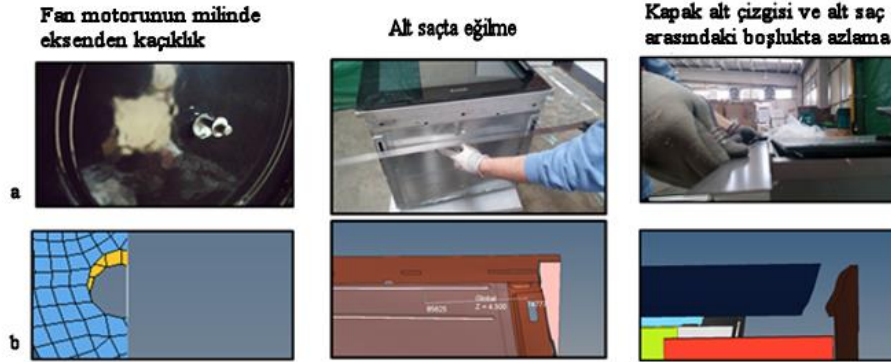
Şekil 9:
Düşme test düzeneği

Hazırlanan ürün, düzeneğe yardımıyla 40 cm'den düz olarak zemine bırakılmış ve elde edilen sonuçlar hazırlanan ağ yapısının çözümü ile karşılaştırılmıştır.

Test sonucu ürün ambalajı çıkarılmadan incelendiğinde karton ve EPS parçaların dışında gözle görülür bir hasar olmadığı gözlenmiştir. Ardından ürün, ambalajı çıkartılarak incelenmiştir. Bunun sonucu üründe 3 tane açık bir şekilde fark edilebilen şekil değişimi olduğu görülmüştür. Bunlar;

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

Şekil 10'da deneysel ve sayısal model sonuçlarının görsel karşılaştırması, Tablo 5'te ise gerçekleştirilen ölçümlerin karşılaştırması verilmektedir.

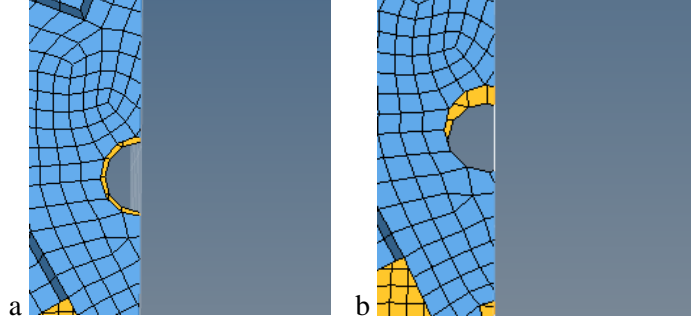


Şekil 10:
Sayısal modeldeki plastik şekil değişimlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması
a. deneysel sonuçlar, b. Analiz sonuçları

Tablo 5: Test sonucunda alınan ölçümlerin sayısal model ile karşılaştırması

	Deney	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

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 saclar ile temas kurmadığı için bu tehlike riski düşüktür. Bununla birlikte daha yüksekte veya aynı ürünün tekrarlı düşmeye maruz kalması durumunda bu risk oluşabilir. Milin eksenden kaçıklığına arka şasi arka sacının arkasındaki sacta oluşan plastik şekil değişimleri neden olmaktadır. Şekil 11'de bu iki sacın düşmeden önceki ve sonraki konumu görülmektedir.



Şekil 11:

Arka ve iç saclardaki deliklerin düşmeden önceki (a) ve sonraki (b) durumu

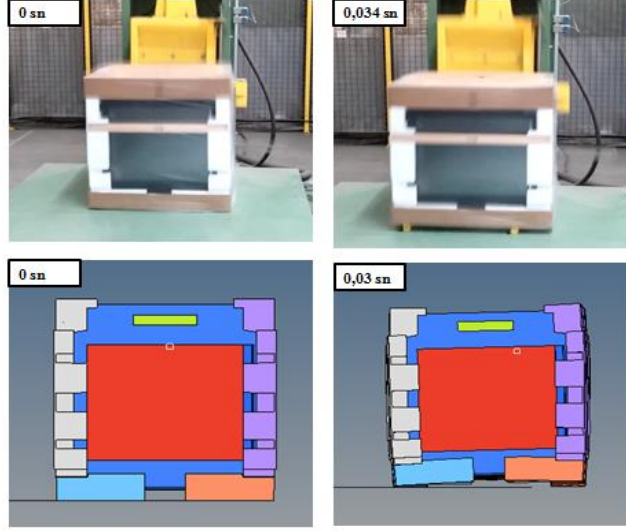
EPS parçalar incelendiğinde herhangi bir kırılma görülmemiştir. Malzemenin dış kenarına yakın bölümlerde siyah izler ve ezilmeler oluşmuştur. Bu izler çarpma sırasında fırının hangi bölümlerinin EPS parçaya daha fazla baskı uyguladığına ilişkin fikir vermektedir. Sayısal model çözümünde de aynı bölgelerde akma dayanımının üzerinde gerilmeler ve ezilmeler hesaplanmıştır. Şekil 12'de düşme sonrası EPS parçalarda oluşan izler görülmektedir.



Şekil 12:

Düşme sonrası EPS parçalarda oluşan izler

Test sonucu fırında oluşan plastik şekil değişimlerine ek olarak sayısal model sonucunun yere çarpma sırasındaki temas süresinin, test sırasında alınan kamera kaydı ile karşılaştırılması da özellikle polistren malzemenin modelini doğrulamak açısından faydalı olmuştur. Şekil 13'de deneysel ve sayısal modelin karşılaştırması verilmiştir. Deney 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.



Şekil 13:
Sayısal modeldeki çarpma süresinin test ile karşılaştırılması

Deneyssel olarak elde edilen veriler görüldüğü gibi sayısal analiz sonuçları ile oldukça iyi bir uyum sağlamaktadır.

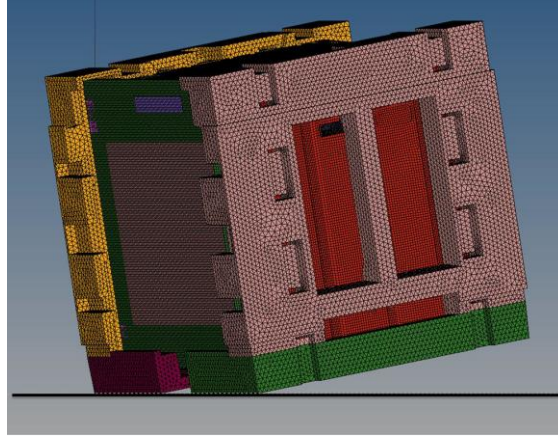
5. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Hazırlanan sonlu eleman modeli farklı yüksekliklerden düşme senaryolarına göre ayarlanarak çözdürülmüştür. Bu işlem yapılırken fırının yere düşme anına kadar havada geçirdiği süre boyunca analizin gerçekleştirilmesi yerine zaman kaybını önlemek 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. Tablo 6’da gerçekleştirilen sayısal analiz senaryoları görülmektedir. Bu senaryolar düşme testi standartları dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 6: 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

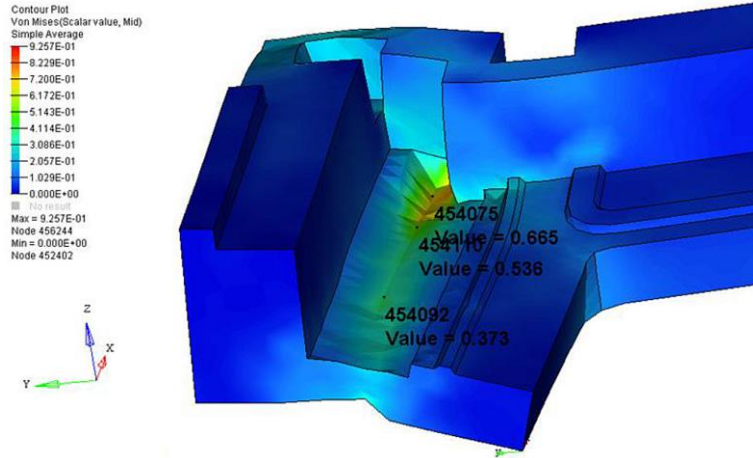
Analiz No.2’de hazırlanan ağ yapısı düşme testi standartlarına uygun olarak taban ön kenarı etrafında 10⁰ döndürülmüştür. Taban ön kenarının zemine 40 cm olan uzaklığı korunmuştur. Çarpma anındaki ürünün konumu Şekil 14’te görülmektedir.



Şekil 14:

Taban ön kenarı üzerine düşme testinde ürünün çarpma anındaki konumu

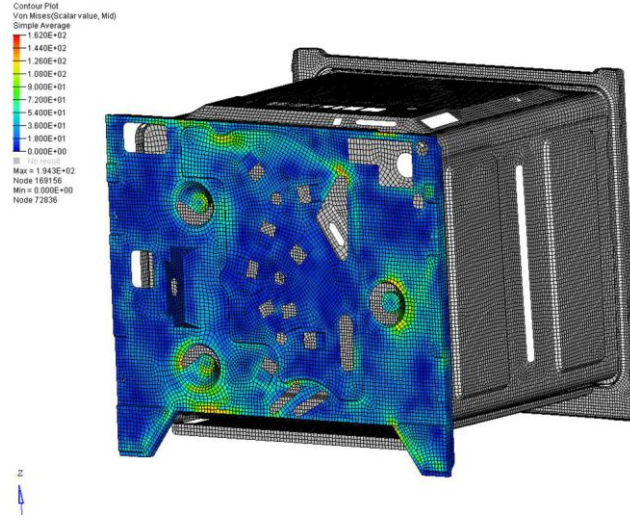
40 cm'den taban ön kenar üzerine düşme sayısal analizi için 0.04 sn süren bir çözüm animasyonu çoklu bölge yaklaşımı ile 21 saat 59 dakika sürede hesaplanmıştır. Altta yer alan EPS parçalarda kesme dayanımının üzerinde gerilmeler hesaplanmıştır. Ön kenar üzerine gerçekleşecek bir düşmede bu parçada kırılma beklenmektedir. Tabanda bulunan EPS parçadaki maksimum gerilme dağılımı Şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15:

Taban ön kenarı üzerine düşme testinde taban EPS parçasındaki gerilme dağılımı

Düz düşme testinde arka sactaki plastik şekil değişimleri fan motorunun milindeki eksen kaçıklığına yol açmaktadır. Bu duruma benzer olarak ön kenar üzerine düşme testinde de arka sacta akma dayanımının üzerinde gerilmeler hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme değerleri Şekil 16'da verilmiştir.

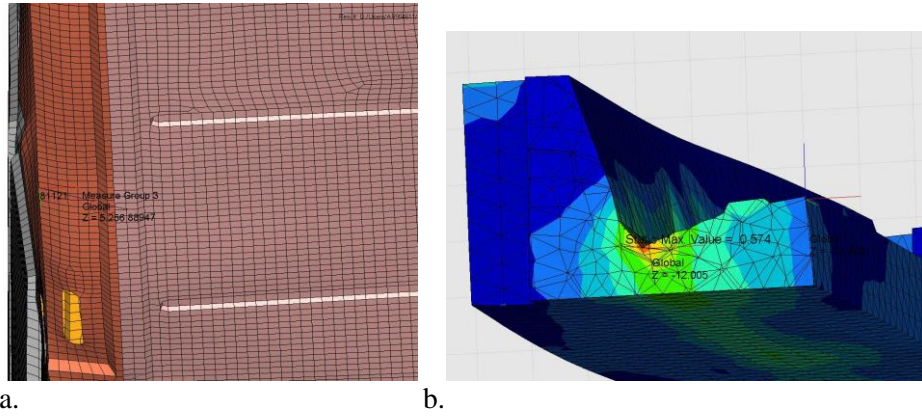


Şekil 16:

Taban ön kenarı üzerine düşme analizinde arka sacta hesaplanan gerilme dağılımı

Test standardında düz ve ön kenar üzerine düşme testine ek olarak sağ kenar üzerine düşme testi de bulunmaktadır. Düz düşme testinde doğrulanan ağ yapısı sağ kenarı etrafında 10^0 döndürülerek 40 cm'den düşme testi modellenmiştir.

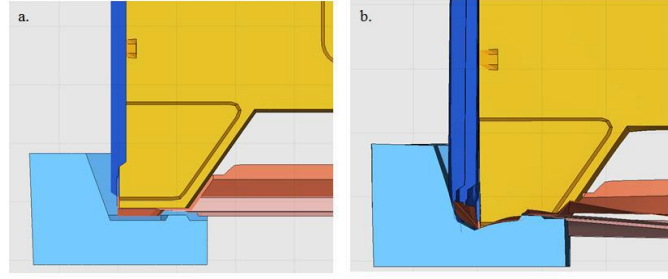
Bu analiz sonucunda en büyük deformasyon değeri alt sacta düşme kenarına yakın bölgede hesaplanmıştır. Şekil 17 de sac parça ile EPS parçada meydana gelen gerilmeler görülmektedir. Düşme kenarında yer alan EPS malzemede yüksek sıkışma oranları ve kesme gerilmesinin üzerinde gerilmeler hesaplanmıştır. Maksimum sıkışma anı olan 0.0136 sn için parçanın durumunu gösteren kesit görünüş Şekil 17 b'de yer almaktadır.



Şekil 17:

Taban sağ kenar üzerine düşme a. sağ kenarda hesaplanan deformasyon b. EPS parçada hesaplanan gerilmeler

Son olarak hazırlanan model 70 cm'den düz düşme durumu için çözdürülmüştür. Önceki analiz çözümlerindeki sonuçlara ek olarak yan saclarda taban bölgesinde dışa doğru açılma görülmüştür. Şekil 18'de çarpma anından önce ve 0.03 sn sonrası için sacların durumu görülmektedir.



Şekil 18:

70 cm'den düz düşme analizi için a. çarpma önce, b. çarpma anından 0.03 sn sonraki durum

6. SONUÇ

Sunulan çalışmada ev tipi bir fırının düşme testi sayısal olarak modellenmiştir. Oluşturulan sayısal model deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Böylece tasarım aşamasında iken sayısal olarak düşme testlerinin yapılabilmesi, olası hasar bölgeleri tespit edilerek tasarımın iyileştirilmesi ve buna bağlı olarak maliyet kazancı hedeflenmiştir. Sayısal modelin çözdürülmesinde çoklu bölge yaklaşımı kullanılarak çözüm süresi yarıya indirilmiştir. Analizler 40 cm den düz, ön kenar ve sağ kenar üzerine düşme ve 70 cm den düz düşme için gerçekleştirilmiştir. Fan milinin eksen kaçıklığına sebebiyet veren arka şasi arka sacında önemli şekil değişimlerinin olduğu hem deneysel hem de sayısal olarak gözlenmiştir.

Sayısal modelde EPS parçalar için hasar modeli hazırlanmadığı için bu modelin sonuçlarında kırılma görülmemiştir. Fakat deneylerde EPS parçanın kırıldığı bölgede sayısal modelde de yüksek sıkışma ve gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Mevcut haliyle sayısal model EPS parçanın şekil ve kalınlık optimizasyonunda büyük fayda sağlayacaktır. Kurulan ağ yapısı üzerinde gerçekleştirilecek küçük değişiklikler ile aynı model 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.

KAYNAKLAR

1. Altair Engineering, (2011) Using computer aided engineering processes in packaging design development. Access address: [http://www.altairproductdesign.com/\(S\(osxbhnsup320qhsvos4xmt\)\)/images/en-US/CaseStudy/Mabe-Using-Computer-Aided-Engineering-Processes-in-Packaging-Design.pdf](http://www.altairproductdesign.com/(S(osxbhnsup320qhsvos4xmt))/images/en-US/CaseStudy/Mabe-Using-Computer-Aided-Engineering-Processes-in-Packaging-Design.pdf) (Accessed in: 01.02.2014)
2. Altair Engineering, (2014) Practical aspects of finite element simulation, <http://www.altairuniversity.com/free-ebooks-2/> (Accessed in: 01.06.2014)
3. ASTM D 5276 – 98.,(1998) Standart test method for drop test of loaded containers by free fall, American Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, ABD
4. ASTM D 880 – 92., (2002) Standart test method for impact testing for shipping containers and systems, American Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, ABD

5. BASF A.Ş., (2006) Packaging with styropor, Access adress: http://styropor.basf.us/files/pdf/Packaging_with_Styropor.pdf (Accessed in: 01.02.2014)
6. Croop, B. ve Lobo, H., (2009) Selecting material models for the simulation of foams in Is-dyna, 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Avusturya
7. Gere J., Timoshenko P.,(1997) Mechanics of Material, PWS Pub Co, ABD
8. Görücüoğlu, B.,(2005) Çamasır makinası düşme testi deney ve simulasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Johnson, G. ve Cook W.,(1983) A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and temperatures, 7th International Symposium Ballistics, Hague, Netherlands, 1-7.
10. Kim, J.G., Park, Y.K.,(2004) Experimental verification of drop/impact simulation for a cellular phone, Experimental Mechanics, 44(4), 375-380
11. Liu, S., Wang , X., Ma, B., Gan, Z., Zhang, H.,(2005) Drop test and simulation of portable electronic devices, 6th International Conference on Electronic Packaging Technology Shenzhen,1-4,
12. Liu W., Li H., (2011) Impact analysis of a cellular phone, 4th ANSA & META International Conference, Thessaloniki Greece, 1-3.
13. Matienssen W., Warlimont H., (2005) Handbook of Condensed Matter and Materials Data, sf. 501,502, 571, Springer, ABD
14. Mulkoğlu, O., Guler, M.A., Demirbağ, H., (2015) Drop test simulation and verification of a dishwasher mechanical structure, 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Almanya
15. 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, Simulation Technology (4), 18-33
16. Posch, W. ve Sageder, A., (2002) Borealis polypropylene-helping to shape the future of the White goods industry, Access adress: http://www.mssoftware.co.kr/upfile/pro_pdf/1216_borealis_white_goods.pdf (Accessed in: 01.02.2014)
17. Tempelman, E., Dwaikat, M.M.S., Spítás, C.,(2012) Experimental and analytical study of free-fall drop impact testing of portable products, Experimental Mechanics, 52, 1385-1395
18. Verlysen P., Peirs J., Slyeken J., Faes, K., ve Duchene, L., (2011) Effects of strain rate on the forming behaviour of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, 211 (8), 1457-1464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.018>
19. Wang H.L., Chen S.C., Huang L.T., Wang Y.C., (2004) Simulation and verification of the drop test of 3c products, 8th International LS-DYNA Users Conference, Drop/Impact Simulations, Detroit, 7-18