

## Sürtünme Kuvvetinin Çarpışma Kutularının Enerji Soğurma Özelliklerine Etkisi

Ömer Adanur<sup>1,\*</sup>, Cihan Yakupoğlu<sup>2</sup>, İbrahim Acar<sup>1</sup>, Faruk Varol<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Akpres Metal Yedek Parça Mak. San. Ve Tic. A. Ş., Sakarya, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 06.08.2024

**Kabul:** 17.10.2024

#### Anahtar Kelimeler:

İnce duvarlı yapılar  
Enerji emilimi  
Çarpışma kutusu  
Sürtünme kuvveti  
Sonlu elemanlar metodu

### ÖZET

Son yıllarda, araç kazalarında darbe emici görevi yapan çarpışma kutularının, enerji emme kabiliyetlerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmalar, darbeden kaynaklı oluşan şok dalgalarının araç şasesine verdiği zararı, en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, sürtünme kuvvetinin çarpışma kutularının enerji emme kabiliyetleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, biri normal katlanan, diğeri sürtünme direnci ile enerji emilimi sağlayan iki farklı konfigürasyon modellenmiştir. Tasarlanan modellerle çarpışma senaryosu simüle edilmiş ve temsili modellere eksenel darbe yükü uygulanmıştır. Simülasyonlar, doğrusal olmayan açık yöntem sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak oluşturulmuştur. Çarpışma senaryosu her iki model için aynı koşullar altında DP600 çelik sac malzeme özellikleri kullanılarak üç farklı kalınlıkta (1.2 mm, 1.4mm ve 1.5mm) analiz edilmiştir. Çarpışma simülasyonlarının sonuçları, sürtünme direncinin, çarpışma kutularının enerji emme davranışları üzerindeki etkilerini incelemek için karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, sürtünme direnci ile enerji emiliminin çarpışma kutularının darbe sönümleme özelliklerine %16 oranında olumlu katkı sağladığını göstermiştir.

## Effect of Friction Force on Energy Absorption Properties of Crushboxes

### MAKALE BİLGİSİ

**Received:** 06.08.2024

**Accepted:** 17.10.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Thin-walled structures  
Energy absorption  
Collision box  
Friction force  
Finite element method

### ÖZET

In recent years, studies on improving the energy absorption capacity of crash boxes, which act as shock absorbers in vehicle accidents, have increased significantly. These studies aim to minimize the damage caused by shock waves resulting from the impact to the vehicle chassis. For this purpose, two different configurations were modelled, one of which is normally folded and the other is energy absorption with friction resistance. The crash scenario was simulated with the designed models and axial impact load was applied to the representative models. Simulations were created using the nonlinear explicit method finite element method (FEM). The crash scenario was analyzed for both models under the same conditions using DP600 steel sheet material properties with three different thicknesses (1.2 mm, 1.4mm and 1.5mm). The results of crash simulations were compared to examine the effects of friction force on the energy absorption behaviors of crash boxes. The analysis results showed that energy absorption by friction resistance contributes positively to the impact absorbing properties of crash boxes by % 16.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayolu taşımacılığı, ticaret ve turizm gibi ekonomik alanların önemli bir parçası olan ulaştırma sektöründe, hayati bir öneme sahiptir. Yük ve yolcu taşımacılığındaki araç sayısının artması, kaza faktörünü de beraberinde getirmektedir. Yolcuların yaralanmasına hatta ölümüne sebep olan maddi hasarlı kazalara karşı önlem alınması gerekmektedir.

Gelişmekte olan ülkelerde, ekonomik büyümenin etkisiyle hızlı kentleşme ve motorlu taşıtların artışı nedeniyle trafik kazalarındaki ölümler artmaktadır. Karayolu trafik kazaları, dünya çapında

\*Corresponding author, e-mail: oadanur@sakarya.edu.tr

To cite this article: Ö. Adanur, C. Yakupoğlu, İ. Acar, F. Varol, Effect of Friction Force on Energy Absorption Properties of Crushboxes, Manufacturing Technologies and Applications, 5 (3), 141-154, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1529316>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

tüm yaş gruplarında dokuzuncu önde gelen ölüm nedeni olarak Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) küresel durum raporunda (WHO2015) belirtilmiştir [1].

Aracın iskelet sistemini meydana getiren şasi ve benzer sistemler yolcuya zarar vermemesi ve bükülmemesi hedeflenerek rijit olarak tasarlanmıştır. Bunun aksine bazı sistemlerin tasarımında deforme olması istenerek oluşturulmuştur. Çarpışma sırasında darbeden kaynaklı şok kuvvetlerini, plastik deformasyona uğrayarak soğuran bu sistemler, enerji emici olarak adlandırılır. Bu sistemler aynı zamanda pasif güvenlik sistemi olarak da tanımlanmaktadır [2]. Araç üzerinde ön/arka tampon ile şasi arasında bulunan çarpışma kutuları, şaside oluşması muhtemel zararı minimuma düşürmek için akordiyon gibi katlanarak enerjii emmektedir.

Çarpışma kutuları, kaza oluştuğunda açığa çıkan kinetik enerjii hızlı bir biçimde emerek, şok dalgalarının yolculara aktarılmasını engellemektir. Çarpışma kutusu, darbeden kaynaklı kinetik enerjii, elastik ve plastik deformasyonlarla emilmesini amaçlamaktadır. Tasarlanan çarpışma kutusunun kaza durumunda deforme olması istenmektedir. Bu sebeple, çarpışma kutularının tasarımı üzerindeki çalışmalar hala devam etmektedir [3].

Alüminyumdan üretilmiş olan ilk çarpışma kutusu, Mercedes-Benz marka aracın C-Serisi modelinde çarpışma yönetim sistemi uygulamasında denenmiştir. Daha sonra Sumitomo Metals'in Mazda'nın Atenza modeli için çelik malzemeden ürettiği model kullanılmıştır [4]. Ucuz ve kolay bir şekilde değiştirebilen çarpışma kutusu sistemi, araç şasesine yapılacak güçlendirmeler yerine %20 ağırlık tasarrufu sunarak birim başına %10'a kadar üretim maliyeti sağlamaktadır.

Kaza anında açığa çıkan darbe enerjii soğurmak amacıyla tasarlanmış farklı çalışmalar bulunmaktadır [5]. Bu çalışmaların bir bölümü, tamponlarda ve çarpışma kutularında tasarımsal değişikliklere giderek, sistemin daha fazla deforme olmasına imkan sağlayarak enerji emme kapasitesini yükseltmeyi amaçlayan çalışmalardır [6-8]. Bazısı ise, elyaf takviyeli epoksi kompozit maddeler kullanılmaktadır [9]. Bir başka kısmı, çarpışma kutularının iç bölgesine metal köpük uygulayarak enerji emme kapasitesini artırmayı amaçlayan çalışmalardır [10-12].

Bu çalışmada, klasik şekilde katlanarak enerji soğuran çarpışma kutularından farklı olarak, sürtünme direnci ile enerji emilimi sağlayan üç bileşenli bir yapı kullanılmıştır. Eksenel darbe yükü altında birbiri içine geçen yeni tip çarpışma kutusu, sürtünme direnci ile enerji emilimi sağlamaktadır. Sürtünme direncinin enerji emilimine katkısını belirlemek için, yeni tip çarpışma kutusu ile klasik modellerin simülasyon sonuçları aynı şartlar altında karşılaştırılmıştır.

## 2. ÇARPIŞMA DAYANIMI GÖSTERGELERİ (IMPACT RESISTANCE INDICATORS)

Çarpışma esnasında malzeme, elastik sınırının ötesinde deformasyona uğrayarak, çarpışmadan kaynaklı açığa çıkan şok dalgalarını, plastik gerinim kuvvetine dönüştürmektedir. Darbeye maruz kalan çarpışma kutularında, ezilme sırasında soğurulan toplam enerjii ifade eden ET değeri, hayati önem taşımaktadır. Kuvvet (F) değerinin yer değiştirmeye (d) göre integrali alındığında, emilen toplam enerjii (ET) hesaplandığı, Denklem 1'de gösterilmiştir [13,14]:

$$E_T = \int_0^d F(x)dx \quad (1)$$

$dx$ , deformasyona uğrayan cismin ezilme mesafesi iken  $F$ , eksenel yöndeki ezme kuvvetini verir. Ayrıca, yazılımlar aracılığıyla kuvvet-yer değiştirme grafiğinin integrali alınarak da ET değerine ulaşılabilmektedir. Şekil 1'de belirtildiği gibi, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin (y) doğrusu ile kesiştiği alan, çarpışma kutusunun emdiği toplam enerjii ifade etmektedir. Bu kısımdan sonra oluşan yukarı eğimli eğri, enerjii emilmeden doğrudan karşı kısma aktarılmaya başlandığını ifade etmektedir.

Çarpışma kutularında performans kriterini değerlendirmek için tercih edilen bir başka parametrede Şekil 1'de belirtildiği gibi pik kuvvet değeridir. Ezilme mesafesi ( $d$ ) boyunca cisme uygulanan en yüksek tepe değeri, Denklem 2'de belirtildiği gibi, pik kuvvet değeridir. Malzemenin ilk katlanmasını tetikleyen FP değerinin, oldukça düşük değerler içermesi istenmektedir [15].

$$F_P = 0 \leq F_{max} \leq d \quad (2)$$

Çarpışma kutularının enerji emme kapasitelerini karşılaştırmak için, özgül enerji emilimi kullanılmaktadır. Enerji emicilerin etkinliği, yüksek SEA değerine sahip olmakla doğru orantılıdır. SEA değeri, emilen enerjinin, (ET) kütleyle (m) oranı ile belirlendiği, Denklem 3'te belirtilmiştir [12, 15]:

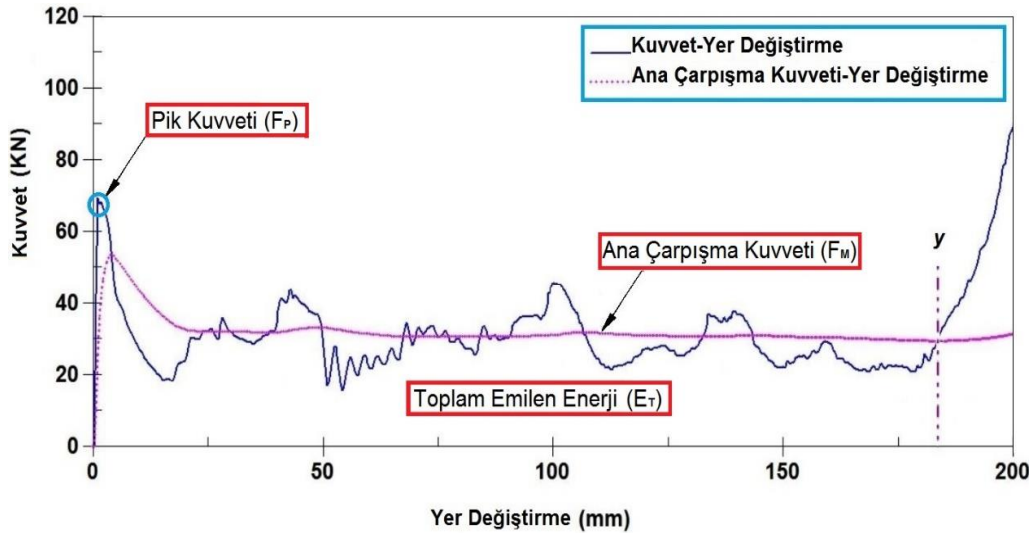
$$SEA = \frac{E_T}{m} \quad (3)$$

Şekil 1.'de belirtilen ana çarpışma kuvveti (FM), emilen enerjinin (ET) ezilme mesafesine (d) oranıyla hesaplandığı, Denklem 4'te gösterilmiştir [4, 17]:

$$F_M = \frac{1}{d} \int_0^d F(x) dx \quad (4)$$

Denklem 5.'te, çarpışma kuvveti etkisi, ana çarpışma kuvvetinin, (FM) tepe kuvvetine (FP) oranı olarak tanımlanmaktadır. Çarpışma kuvveti etkisi, tepe noktasının büyüklüğüyle ters orantılıdır [18]. Yolcu yaralanma riskinin göstergesi olan bu ifade, ayrıca başka malzemelere ne kadar kuvvet iletileceğini belirlemek içinde tercih edilebilmektedir [19].

$$C_E = \frac{F_M}{F_P} \quad (5)$$



Şekil 1. Performans değerlerinin, kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmesi (Display of performance values on the force-displacement curve)

### 3. TASARIM VE MODELLEME (DESIGN AND MODELING)

#### 3.1. DP Çeliklerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of DP Steels)

Araçların çarpışmaları durumunda genellikle yüksek oranda deformasyon oluşmaktadır. DP çelikler, üstün enerji emme özellikleri sayesinde, otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir. Geleneksel çeliklerle kıyaslandığında, süneklik ve mukavemet gibi üstün özellikleri nedeniyle çarpışma kutuları için uygundur. Otomobillerde kaza anında oluşan enerji dalgalarının emilmesindeki performansları nedeniyle, DP600 malzeme özellikleri bu çalışmada tercih edilmiştir. Tablo 1'de, DP çeliklerinin yoğunluğu ( $\rho$ ), Young Modülü (E), akma gerilimi ( $\sigma_y$ ), nihai gerilimi ( $\sigma_u$ ) ve poisson oranı ( $\nu$ ) gibi özellikleri belirtilmiştir [20].

Tablo 1. DP çeliklerine ait mekanik özellikleri (Mechanical properties of DP steels)

Malzeme	$\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)
DP600	$7.8 \times 10^{-6}$	202	635	0.3	380

### 3.2. Çarpışma Kutularının Modellenmesi (Modeling of Collision Boxes)

Geleneksel çarpışma kutularından farklı olarak, enerji emiliminde sürtünme kuvveti kullanan bir sistem üzerinde araştırma yapılmıştır. Şekil 2’de belirtildiği gibi, biri normal şekilde katlanarak, diğeri sürtünme direnci üreterek enerji emen iki model, geliştirilmiştir. Normal şekilde enerji soğuran birinci model katlanmaları tetikleyici kanallar yardımıyla enerji emilimi hedeflemektedir (Şekil 2a). Stabil katlanma oluşturmak için köşelerdeki ezilme boncukları (crash bead), yan kenarlardaki ezilme boncuklarının orta kısmına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

Şekil 2b)’de belirtildiği gibi, üç bileşenli bir yapıdan oluşan ikinci konfigürasyon ise, eksenel bir darbe yükü uygulandığında, bileşenlerin sürtünerek iç içe geçmesi prensibi ile çalışmaktadır. Çarpışma kutusunun ezilmesi sırasında, parçaların yüzeylerindeki katlanma kanalları, birbirlerine sürtünme direnci uygulamaktadır. Sürtünme direncini kuvvetinin arttırmak için çarpışma kutusunun yan duvarlarındaki kanallar zıt yönlerde konumlandırılmıştır. Ayrıca, enerji emilim sürecinin ileriki aşamalarında bu kanallar, üç bileşenli yapının katlanmasına ve kademeli olarak çökmesine katkıda bulunmaktadır.

Çarpışma kutularının genişlik ve uzunluk ölçüleri, standartlara uygun tolerans ve ölçülerde modellenmiştir. Analizlerin tümünde, her iki model çarpışma kutularının ebatları, 110 mm genişlik ve 235 mm uzunluk ölçülerinde sabit kalmıştır. Üç bileşenli çarpışma kutusunun montajı, parçaların 10 mm birbiri üzerine toleranssız bindirilmesi suretiyle, iç içe sıkı geçme şeklinde modellenmiştir [21].

### 3.3. Sonlu Elemanlar Modelleme (FEM) Yaklaşımı (Finite Element Modeling (FEM) Approach)

Çarpışma simülasyonları, biri dinamik diğeri sabit iki rijit cismin arasında konumlandırılan çarpışma kutusunun deformasyona uğratılması ile gerçekleştirilmiştir. Dinamik rijit cisim otomobili, sabit rijit cisim ise araç şasesini temsil etmektedir (Şekil 3). Benzer bir çalışmada, köpük ya da alüminyum dolgulu çarpışma kutularının enerji emilimi Ying tarafından incelenmiştir [22].

Çarpışma standartlarına göre, modellerin doğrusal olmayan açık (explicit) dinamik ezilme simülasyonları, uygulanmıştır [23]. Üç bileşenli yapının sınır şartları ve iç içe geçen kısımlarının sonlu eleman modellemesi Şekil 3’te A-A kesit görünüşünde belirtilmiştir. Şekil 4’teki soyağacında gösterildiği gibi, sabit rijit duvar, dinamik rijit cisim, sarı renkli bileşen, kırmızı renkli bileşen ve mavi renkli bileşen sırasıyla, Impactor, Taban, 3. Kısım, 2. Kısım ve 1. Kısım adlarıyla simülasyonlarda kullanılmıştır. Bileşenler birden beşe kadar farklı kimlik kartları (parça ID) tanımlanarak birleştirilmiştir [24].

### 3.4. Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Başlangıç Hızı (Determination of Boundary Conditions and Initial Velocity)

Maksimum deformasyon miktarına ulaşmak için rijit duvarın, 200 kg veya 150 kg farklı kütle (m) değerleriyle ve 12 m/s başlangıç hızında (v) çarpışma kutusunu ezmesi sağlanmıştır. Analizler, yalnızca ‘z’ yönünde serbestlik derecesine sahip dinamik rijit cismin, sayısal modelleri deformasyona uğratması ile oluşturulmuştur. Hesap edilen kinetik enerjiye göre, rampa etkisinin ihmal edilebilir olması sağlanmıştır [25].

Sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilebilir olduğunu varsayırsa, dinamik rijit duvarın kinetik enerjisi Denklem 6 kullanılarak hesaplanmıştır [26]:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^d ma(x)dx \quad (6)$$

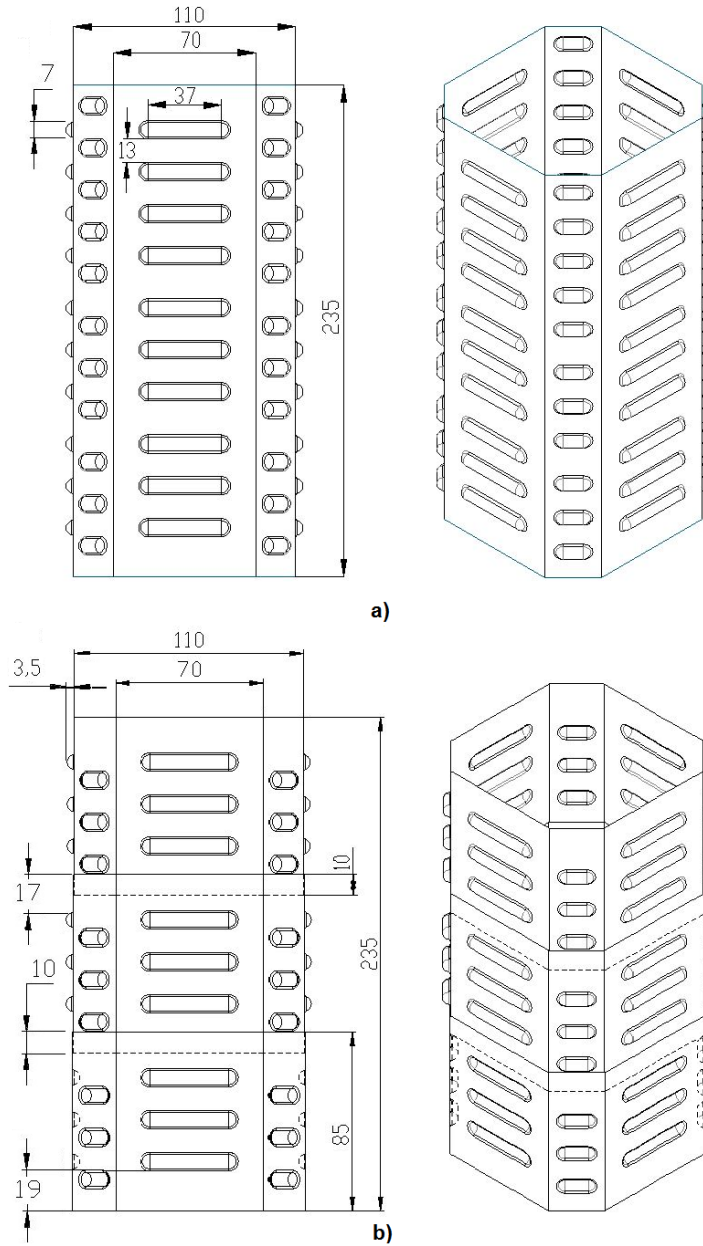
### 3.5. Çarpışma Kutusu Bileşenleri Arasında Kontak Kurulması (Establishing Contact Between Collision Box Components)

Verilerin doğru elde edilmesi ve çözümleme zamanı dikkat edilerek oluşturulan optimizasyon çalışması sonucu, 2 mm<sup>2</sup> boyutunda kabuk elemanları kullanılarak, çarpışma kutularının

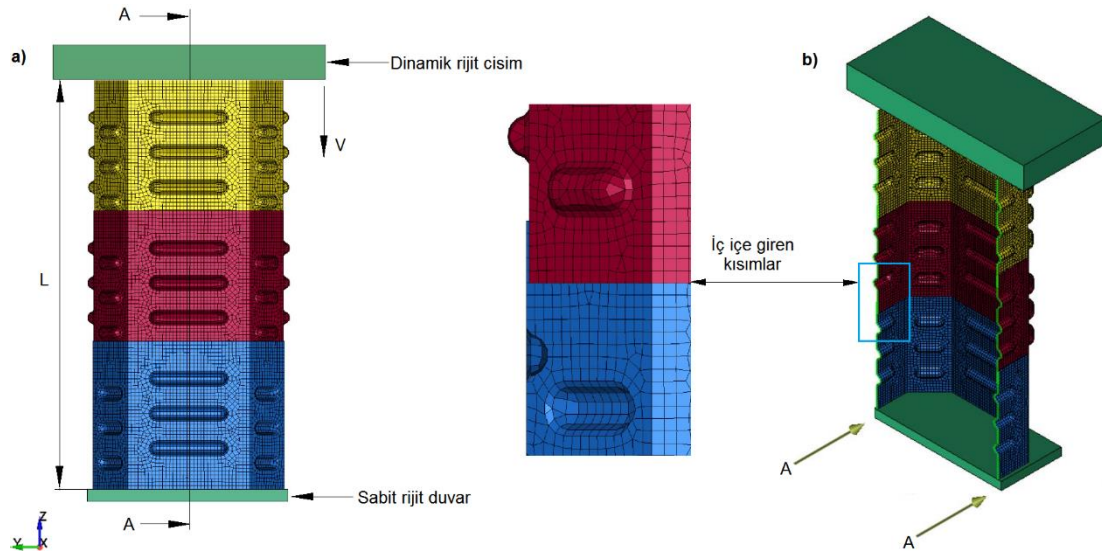
modellenmiştir [16]. Kabuk (Shell) elemanlarının matematiksel entegrasyon süresinin azaltılması için “BELYTSCHKO\_LIN\_TSAY” yöntemi benimsenmiştir.

“AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE”, “AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE” ve “AUTOMATIC\_NODE\_TO\_SURFACE”, olmak üzere üç adet algoritma uygulanmıştır. Dinamik ve sabit rijit duvarlar ve çarpışma kutusunu oluşturan üç bileşen arasında altı adet “AUTOMATIC\_NODE\_TO\_SURFACE” temas algoritması kullanılmıştır (Şekil 4) [27]. Bu algoritma dinamik ve sabit rijit cisimlerin, çarpışma kutusunun tüm kısımlarını algılamasına ve deformasyona uğratabilmesine olanak tanımaktadır. “AUTOMATIC\_NODE\_TO\_SURFACE” kontak algoritması için kullanılan statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.3 ve 0.2 olarak alınmıştır [28, 29].

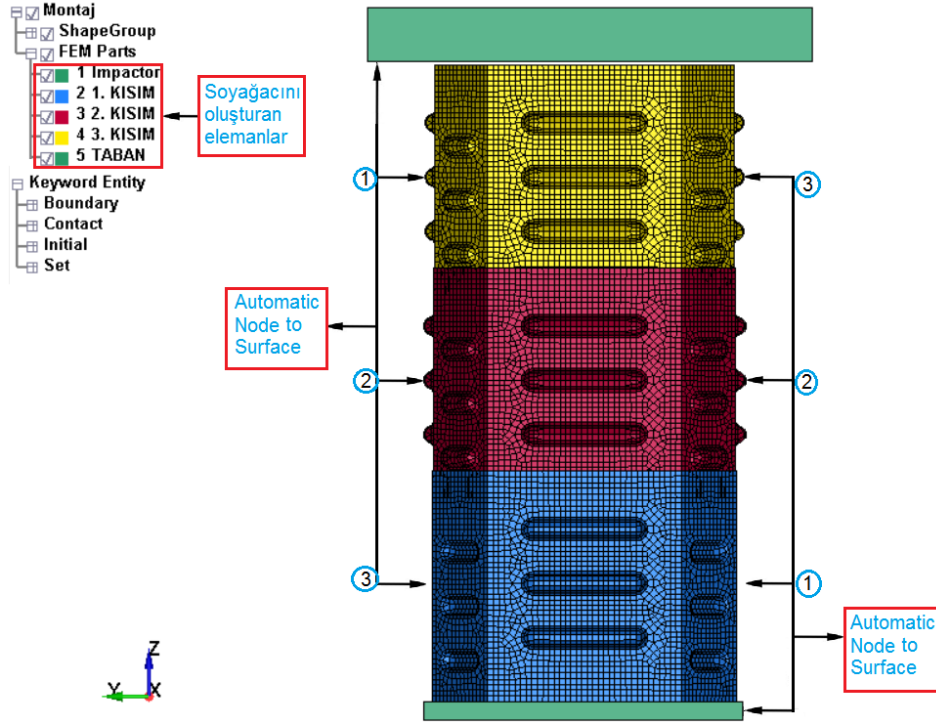
Ayrıca, üç bileşenden oluşan çarpışma kutusunun katlanması esnasında, yüzeylerin birbiri içine grift olmadan bükülebilmesi için “AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE” temas algoritması tanımlanmıştır [30, 31]. Bu temas algoritması için statik ve dinamik sürtünme katsayıları, 0.3 ve 0.2 sırasıyla belirlenmiştir [32].



Şekil 2. Modellenmiş çarpışma kutuları. (a) normal çarpışma kutusu, (b) üç bileşenli çarpışma kutusu. (Modeled collision boxes, (a) normal collision box, (b) three-component collision box.)



Şekil 3. Sürtünerek birbiri içine geçen çarpışma kutusunun modellenmesi, (a) Çarpışma kutusunun sonlu elemanlar modeli (b) Birbiri içine geçen kısımların A-A kesit görünüşü ile gösterimi. (Modelling of the collision box that engages with each other by friction, (a) Finite element model of the collision box (b) Representation of the A-A section view of the engaging parts.)



Şekil 4. Çarpışma kutusuna "AUTOMATIC\_NODE\_TO\_SURFACE" komutu ile kontak kurulması ve mesh uygulanması. (Establishing contact and applying mesh to the collision box with the "AUTOMATIC\_NODE\_TO\_SURFACE" command)

Analizlerde, parçaların birbiri içine geçmesi anında, ara yüzelerde sınır ihlallerini önlemek ve bileşenlerin birlerine uyguladıkları sürtünme direncinin oluşması için "AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE" temas algoritması kullanılmıştır [33]. Bu temas algoritması için, statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla, 0.7 ve 0.6 değerleri seçilmiştir. Birbiri içine giren yüzeylerin teması çelik-kuru çelik şeklinde olduğu için, bu değerler diğer sürtünme katsayılarından farklı seçilmiştir [34, 25].

### 3.6. Malzeme kartına özelliklerin girilmesi (Entering properties into the material card)

Analizlerde sabit rijit cisim ve dinamik rijit duvar modellemesinde sırasıyla, “IMPACTOR” ve “TABAN” isimleri kullanılmıştır. Rijit cisimlerin deformasyona uğramasını engellemek için “MAT\_RIGIT\_(TITLE)(020)” kodu tercih edilmiştir [36, 37]. Lineer plastik davranış oluşması istenen çarpışma kutusuna ise, “MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(TITLE)(024)” kodu uygulanmıştır. Gerinim hızı duyarlılığı ve esnekliği sebebiyle, doğrusal elastik-plastik davranış gösteren ezilme simülasyonlarında bu malzeme cinsi yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

Çarpışma kutusu için, DP600 çeliklerin mekanik özellikleri malzeme kartına tanımlanmıştır. Hacmi 512000 mm<sup>3</sup> olan dinamik rijit cismin, mekanik özelliklerinin malzeme kartına tanıtılması esnasında (Impactor), 150 kg ve 200 kg kütlelerinde çarpışma kutusuna eksenel kuvvet uygulayabilmesi için farklı yoğunluk değerleri kullanılmıştır.

### 3.7. Çarpışma Kutularının Kodlanması (Coding of Collision Boxes)

Analizlerde, temsili modellerin çarpışma simülasyonları Tablo 2’de sunulduğu gibi yönetilmiştir. Örneğin D6ST1.2 kodunu kullanan model, DP600 çelik malzeme özellikleri taşıyan tek parçadan oluşan, 1.2 mm kalınlığındaki temsili modeli ifade ederken, D6MT1.5 kodlu model ise DP600 çelik malzemeli, çoklu bileşenden oluşan, 1.5 mm kalınlığındaki modeli tanımlamaktadır.

Tablo 2. DP600 çelik malzeme özellikleri kullanılarak yönetilen simülasyonların model kodları. (Model codes for simulations driven using DP600 steel material properties.)

Model Kodu	Modelin Boyu (mm)	Sac Kalınlığı (mm)	Modelin Kütle (kg)	Rijit Cismin Kütle (kg)	Rijit Cismin Hızı (m/s)
D6ST1.2	235	1.2	0.930	150	12
D6ST1.4	235	1.4	1.090	200	12
D6ST1.5	235	1.5	1.170	200	12
D6MT1.2	235	1.2	0.930	150	12
D6MT1.4	235	1.4	1.090	200	12
D6MT1.5	235	1.5	1.170	200	12

## 4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (ANALYSIS RESULTS AND EVALUATION)

### 4.1. Temsili Modellerin Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Analysis Results of Representative Models)

Analiz çalışmalarında elde edilen performans göstergelerine bakılarak, en verimli temsili modeli seçmek için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Analiz sonuçları, tüm modellerin maksimum enerji emme kapasitelerine 190 mm ezilme mesafesinde ulaştığını göstermiştir.

#### 4.1.1. Katlanarak normal şekilde enerji emen modellerin analiz sonuçları (Analysis results of models that absorb energy exponentially in a normal manner)

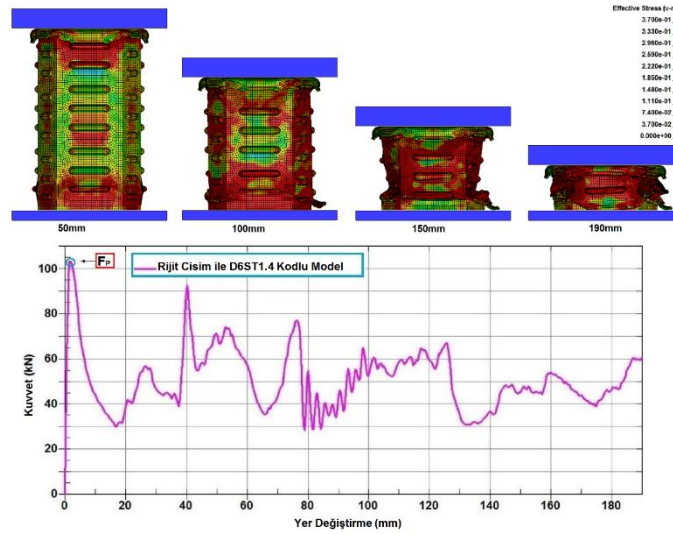
Normal şekilde katlanarak enerji emen DP600 malzeme özellikleri tanımlanmış 1.2 mm, 1.4 mm ve 1.5 mm kalınlığındaki modeller, 12 m/s başlangıç hızında 150 kg ve 200 kg kütlelerine sahip dinamik rijit cisimler tarafından ezilmektedir. Şekil 5’te, D6ST1.4 kodlu modelin analiz sonuçları incelendiğinde, süper katlanma moduna benzer bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Pik kuvvetinin olduğu 103 kN’luk en yüksek tepe kuvveti, ilk katlanmayı tetiklemek için gereken kuvvete karşılık gelmektedir.

Şekil 5’te, kuvvet-yer değiştirme eğrisinden görüldüğü gibi, tetikleyici görevi üstlenen çarpışma boncuğu (crash bead) ile ilk katlanma tetiklenmiş ve yaklaşık 20 mm mesafesinde son bulmuştur. Bu referans noktası aynı zamanda ikinci katlanmanın başlangıç noktasını ifade etmektedir. Şekil 5’teki grafik, 40 mm deformasyon mesafesinde ikinci katlanmanın en üst tepe noktasını, 80 mm ezilme mesafesinde üçüncü katlanmanın bittiği ve dördüncü katlanmanın başladığını belirtmektedir. Dinamik rijit cisim 190 mm mesafesinde iken, altıncı katlanmanın sonlandığı anlaşılmaktadır.

#### 4.1.2. Sürtünme kuvveti ile enerji emen modellerin analiz sonuçları (Analysis results of models absorbing energy with friction force)

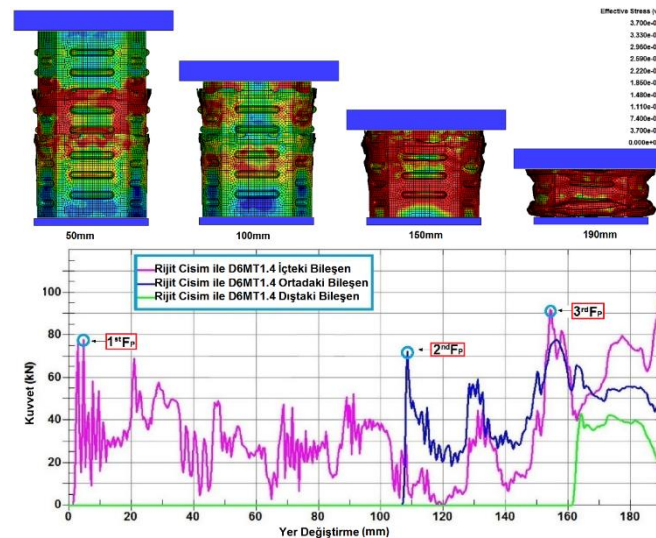
DP600 malzeme özelliklerinin tanımlandığı, birbiri içine geçerek sürtünme kuvveti ile enerji emen 1.2 mm, 1.4 mm ve 1.5 mm kalınlığındaki modellerin simülasyonları yapılmıştır. 150 kg ve 200 kg kütlelerine dinamik sahip rijit cisimler ile 12 m/s başlangıç hızında ezilmiştir. Analiz sonuç verileri, Tablo 3'te detaylandırılmıştır. Katlanarak enerji soğuran modellerin kuvvet-yer değiştirme grafiği tek çizgiden, sürtülmeli modellere ait kuvvet-yer değiştirme grafiğinin ise üç çizgiden oluşmaktadır.

Dinamik rijit cisim tarafından üç bileşenli çarpışma kutusuna kuvvet aktarımı, sırasıyla, içteki bileşen, ortadaki bileşen ve dıştaki bileşen olmak üzere üç kademede gerçekleşmiştir. Bu olay kuvvet-yer değiştirme grafiğinde, sırasıyla, kırmızı, mavi ve yeşil renkli eğrilerle ifade edilmiştir.



Şekil 5. D6ST1.4 kodlu temsili modelin analiz sonucu.

Şekil 6'da, D6MT1.4 kodlu modelin sergilediği deformasyon davranışı gösterilmiştir. Ezilen çarpışma kutusunda, önce 107 mm'ye kadar içteki bileşenin darbeyi karşıladığı, daha sonra ortadaki bileşenle beraber 162 mm yer değiştirmeye kadar enerji soğurduğu ve son olarak bileşenlerin tümünün kinetik enerjiyi emdiği grafikten anlaşılmaktadır. Tek bileşenli modellerin aksine, Von Mises gerilmelerinin, bileşenlerin temas kısımlarında yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 6. D6MT1.4 kodlu modelin analiz sonucu ( Analysis result of the representative model coded D6ST1.4)

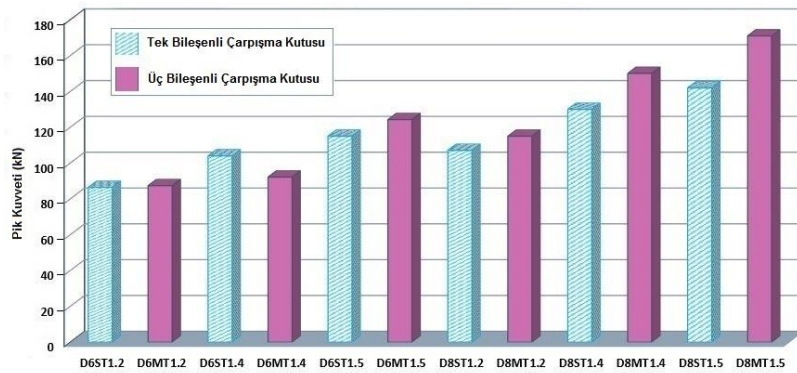


#### 4.2. Temsili Modellerin Pik Kuvvetlerinin Kıyaslanması (Comparison of Peak Forces of Representative Models)

Üç bileşenli ve tek bileşenli modellerin FP değerlerinin kıyaslanmasında uygun bir karşılaştırma sağlamak için, aynı sac kalınlıkları ve malzeme özellikleri içeren modeller birlikte konumlandırılarak Şekil 7’de sunulmuştur. Şekil 7 ve Şekil 8’deki grafikler, Tablo 3’teki performans gösterge verilerinden elde edilmiştir.

Tablo 3’te belirtildiği gibi, bazı normal ve sürtümlü modellerin FP değerleri, sac kalınlığındaki değişikliklere göre artmış veya azalmıştır. Örnek olarak, tek bileşenli D6ST1.4 kodlu modelin pik kuvveti değeri 104.020 kN iken, üç bileşenli D6MT1.4 kodlu modeldeki pik kuvveti 92.300 kN’dur. Bu değerlere göre kıyaslandığında yaklaşık %11 oranında düşüş gerçekleşmiştir. FP değerlerindeki bu farklılık üç bileşenli yapıda bulunan sürtünme direncinden kaynaklanmıştır.

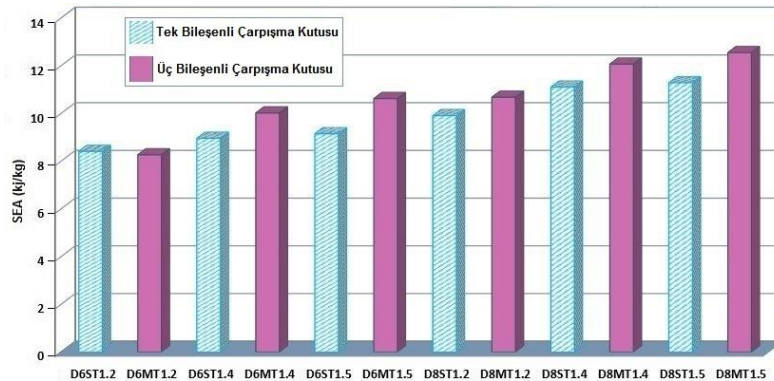
Şekil 7’den anlaşılacağı gibi, darbenin oluşturduğu şok dalgalarına sürtünme direnciyle müdahale edilmesi, tepe kuvvetlerinin azalmasına olumlu katkıda bulunmuştur. Çarpışma anında yüksek oranda pik kuvveti, şok dalgalarının emilmeden karşı tarafa iletilmesine sebep olmaktadır.



Şekil 7. Normal şekilde katlanarak ve sürtünme direnciyle enerji emen tasarım konseptlerinin  $F_p$  değerlerinin kıyaslanması. (Comparison of FP values of design concepts absorbing energy by normal folding and frictional resistance.)

#### 4.4. Tek Bileşenli ve Üç Bileşenli Modellerin SEA Değerlerinin Kıyaslanması (Comparison of SEA Values of Single Component and Three Component Models)

SEA değerlerinin kıyaslanmasında kolaylık oluşturmak için, aynı sac kalınlıkları ve malzeme özelliklerine sahip modeller, Şekil 8’de belirtildiği gibi yan yana konumlandırılmıştır. Katlanarak enerji soğuran modellerle karşılaştırıldığında, D6MT1.2 hariç üç bileşenli modellerin tümünde, SEA değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 8. Tek bileşenli ve üç bileşenli tasarım konseptlerinin SEA değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of SEA values of single-component and three-component design concepts)

Tablo 3’te, D6MT1.5 ve D6ST1.5 kodlu modellerin, sırası ile 10.620 kJ/kg ve 9.145 kJ/kg değerleri incelendiğinde, sürtünme direnciyle enerji emilimi sağlayan modelin SEA değeri %16 artmıştır. Bu değer, sürtünme direncinin, çarpışma kutusunun çarpışma dayanım özellikleri

üzerindeki pozitif etkisini göstermektedir. Ayrıca, sac kalınlığının artması, yüzeylerdeki sürtünme direncini artırmıştır.

#### 4.5. En Verimli Modelin Belirlenmesi (Determination of The Most Efficient Model)

Verimi en yüksek temsili modeli belirlemek için, deformasyon aşamasında oluşan performans göstergeleri kıyaslanmıştır. Şekil 9 ve Şekil 10'daki grafiklerden, Tablo 3'te sunulan verilerden elde edilmiştir.

Farklı sac kalınlıklarına ve malzeme özelliklerine sahip tek bileşenli ve üç bileşenli modeller için dinamik çarpışma sonuçlarının performans göstergeleri Tablo 3'te verilmiştir. Modellerin sergilediği, düşük pik kuvveti değerleri ile birlikte yüksek SEA ve CE verileri, en verimli çarpışma dayanımı karakteristiği taşıyan çarpışma kutusunun belirlenmesinde önemli katkı sağlamıştır.

Tek ve üç bileşenli modellerin, SEA, FP ve CE göstergeleri kıyaslandığında, en iyi performansı D6MT1.5 kodlu modelin sergilediği anlaşılmıştır. Deformasyon sonucu modelin FP, SEA ve CE değerleri, sırasıyla, 124.300 kN, 10.620 kJ/kg ve %0.568 verileriyle üstün çarpışma dayanıklılık özelliğine işaret etmektedir.

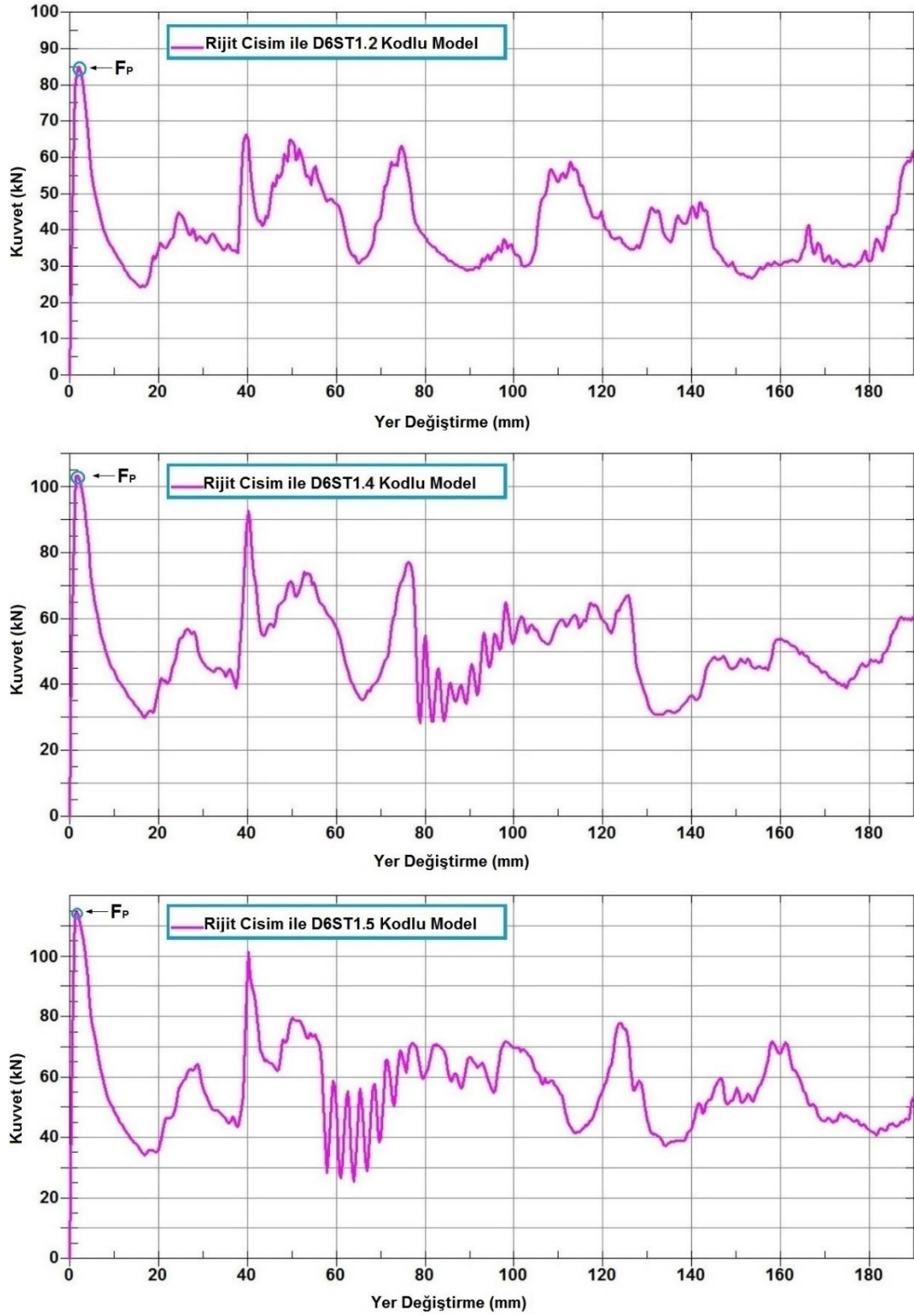
Tablo 3. Eksenel darbeye maruz modellerin çarpışma dayanımı performans değerleri. (Crash resistance performance values of models subjected to axial impact.)

Model Kodu	Kalınlık (mm)	SEA (kJ/kg)	E <sub>T</sub> (kJ)	F <sub>P</sub> (kN)	F <sub>M</sub> (kN)	C <sub>E</sub> (%)	d (mm)	M (kg)
D6ST1.0	1.0	7.282	5.680	70.600	29.738	0.421	190	0.780
D6ST1.2	1.2	8.409	7.820	86.408	40.942	0.474	190	0.930
D6ST1.4	1.4	8.954	9.760	104.020	51.099	0.491	190	1.090
D6ST1.5	1.5	9.145	10.700	115.030	56.021	0.487	190	1.170
D6MT1.0	1.0	7.360	6.271	61.200	32.832	0.536	190	0.780
D6MT1.2	1.2	8.265	8.430	87.400	44.136	0.505	190	0.930
D6MT1.4	1.4	10.017	11.660	92.200	61.047	0.662	190	1.090
D6MT1.5	1.5	10.620	13.487	124.300	70.613	0.568	190	1.170

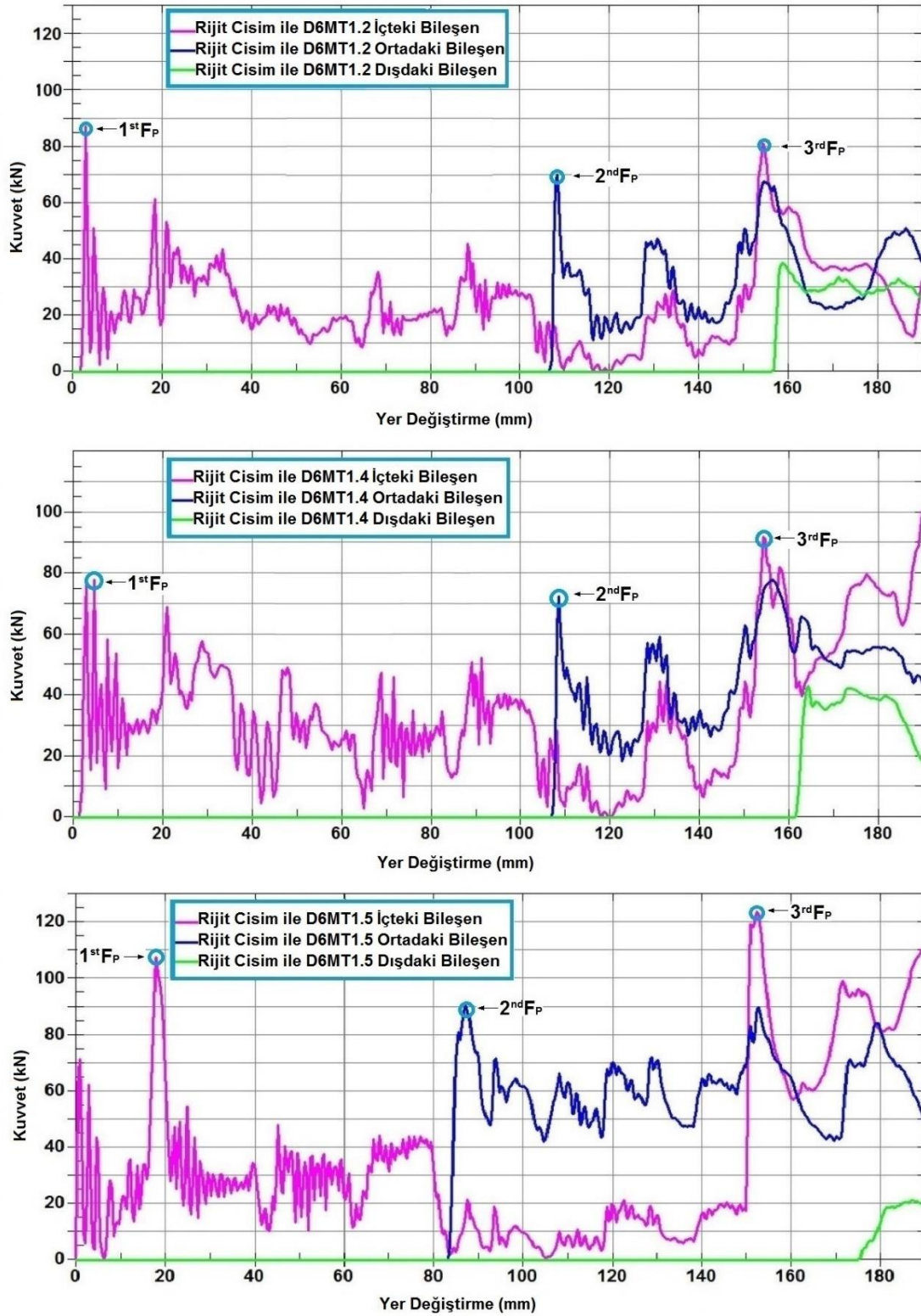
#### 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Eksenel darbe yükü altında biri katlanarak enerji emen ve diğeri sürtünme direnci yardımıyla enerji emilimi sağlayan iki tip çarpışma kutusunun çarpışma davranışları analiz edilmiştir. Diğer modelden farklı olarak üç bileşenli yapıdan oluşan model, darbenin etkisiyle sürtünme direnci oluşturarak birbiri içine geçtiğinden, çarpışmadan kaynaklı şok dalgalarının bir kısmı sönmelenmesine sebep olmuştur. Üç bileşenli çarpışma kutularında, parçalar iç içe tamamen geçtikten sonra katlanma modu başladığından, bu durum pik kuvveti değerinin düşmesine katkıda bulunmuştur. Tek bileşenli ve üç bileşenli modellerin FP değerleri karşılaştırıldığında, D6MT1.4 kodlu modelin FP performans değeri, D6ST1.4 kodlu modele göre yaklaşık %11 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

D6MT1.5 kodlu model, tüm çarpışma kutularının performans göstergeleri kıyaslandığında, en verimli model olduğu belirlenmiştir. Sürtünme direnci tarafından emilen enerjinin, çarpışma kutularının çarpışma dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, D6MT1.5 kodlu üç bileşenli model, D6ST1.5 kodlu tek bileşenli modele göre %16 SEA ve %26 ET performans artışı sergilemiştir. Sayısal değerler, sürtünme direnci ile enerji emiliminin, çarpışma kutularının performansını geliştirme konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Tek bileşenden oluşan farklı kalınlıklardaki çarpışma kutusunun analiz sonuçları. (Analysis results of a single component collision box with different thicknesses.)



Şekil 10. Üç bileşenden oluşan farklı kalınlıklardaki sürtünme direnci üreten çarpışma kutusunun analiz sonuçları. (Analysis results of the collision box generating friction resistance of three components with different thicknesses)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. C. Pal, S. Hirayama, S. Narahari, M. Jeyabharath, G. Prakash, V. Kulothungan, An insight of World Health Organization (WHO) accident database by cluster analysis with self-organizing map (SOM), Traffic injury prevention, 19: 15-S20, 2018.
2. A. Jarasuniene, G. Jakubauskas, Improvement of road safety using passive and active intelligent vehicle safety systems, Transport, 22(4): 284-289, 2007.

3. A. Dimas, T. Dirgantara, L. Gunawan, A. Jusuf, I.S. Putra. The effects of spot weld pitch to the axial crushing characteristics of top-hat crash box, *Applied Mechanics and Materials*, 660: 578-582, 2014.
4. M. Costas, J. Díaz, L.E. Romera, S. Hernández, A. Tielas, Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers, *International Journal of Impact Engineering*, 62: 166-181, 2013.
5. O. Adanur, Farklı tasarımlarda W kesitlere sahip çarpışma kutuları için darbe sönümleme kabiliyetlerinin deneysel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2019.
6. S. Tabacu, Axial crushing of circular structures with rectangular multi-cell insert, *Thin-Walled Structures*, 95: 297-309, 2015.
7. N. Tanlak, F.O. Sonmez, Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads, *Thin-Walled Structures*, 84: 302-312, 2014.
8. A. Tastan, E. Acar, M. A. Güler, Ü. Kılınçkaya, Optimum crashworthiness design of tapered thin-walled tubes with lateral circular cutouts, *Thin-Walled Structures*, 107: 543-553, 2016.
9. M.M. Davoodi, S.M. Sapuan, R. Yunus, Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, *Materials & Design*, 29(7): 1447-1452, 2008.
10. M. Altin, E. Acar, M.A. Guler, Foam filling options for crashworthiness optimization of thin-walled multi-tubular circular columns, *Thin-Walled Structures*, 131: 309-323, 2018.
11. A.K. Toksoy, M. Guden, Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption, *Thin-Walled Structures*, 48(7): 482-494, 2010.
12. M. Altin, M.A. Guler, S.K. Mert, The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 131: 368-379, 2017.
13. E. Acar, B. Yilmaz, M.A. Güler, M. Altin, Multi-fidelity crashworthiness optimization of a bus bumper system under frontal impact, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(9), 2020.
14. N.N. Hussain, S.P. Regalla, Y.V.D. Rao, Study on influence of notch triggers on absorption of energy for composite automobile crash box under impact loads, *Materials Today-Proceedings*, 38: 3220-3231, 2021.
15. H. Sun, F. Li, K. Shen, Q. Gong, Energy absorption of variable stiffness composite thin-walled tubes on axial impacting, 100386, 2023.
16. G. Zheng, S. Wu, G. Sun, G. Li, Q. Li, Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 87: 226-240, 2014.
17. E. Acar, M. Altin, M.A. Guler, Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminum tubes, *Thin-Walled Structures*, 142: 227-235, 2019.
18. Z. Gao, D.J.E.S. Ruan, Axial crushing of novel hierarchical multi-cell square tubes, 286: 116141, 2023.
19. T.J. Reddy, Y.V.D. Rao, V. Narayanamurthy, Thin-walled structural configurations for enhanced crashworthiness, *International Journal of Crashworthiness*, 23(1): 57-73, 2018.
20. R.O. Santos, L.B. Silveira, L.P. Moreira, M.C. Cardoso, F.R.F. Silva, A. Santos Paula, D.A. Albertacci, Damage identification parameters of dual-phase 600-800 steels based on experimental void analysis and finite element simulations, *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, 8(1): 644-659, 2019.
21. O. Adanur, F. Varol, Investigation of the effect of friction force on the energy absorption characteristics of thin-walled structures loaded with axial impact force, *Materials Today Communications*, 106420, 2023.
22. L. Ying, S. Wang, T. Gao, M. Dai, P. Hu, Y. Wang, Crashworthiness analysis and optimization of multi-functional gradient foam-aluminum filled hierarchical thin-walled structures, *Thin-Walled Structures*, 189, 2023.
23. P. Dalton, R.W.J.P. Hughes, Auditory attentional capture: implicit and explicit approaches, 78: 313-320, 2014.
24. J. Marzbanrad, M. Alijanpour, M.S.J.T. Kiasat, Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes, 47(8-9): 902-911, 2009.
25. S. Reddy, M. Abbasi, M. Fard, Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection, *Thin-Walled Structures*, 94: 56-66, 2015.
26. F.X. Xu, C. Wang, Dynamic axial crushing of tailor-welded blanks (TWBs) thin-walled structures with top-hat shaped section, *Advances in Engineering Software*, 96: 70-82, 2016.
27. Z. Wang, Y. Li, D. Ma, X. Wang, Y. Li, T. Suo, A. Manes, Experimental and numerical investigation on the ballistic performance of aluminosilicate glass with different nosed projectiles, 49(11): 17729-17745, 2023.

28. F. Xu, Enhancing material efficiency of energy absorbers through graded thickness structures, *Thin-Walled Structures*, 97: 250-265, 2015.
29. X. Zhang, M.S. Zhang, Crush resistance of square tubes with various thickness configurations, 107: 58-68, 2016.
30. D.J. Benson, J.O.J. Hallquist, A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of shell structures, 78(2): 141-163, 1990.
31. H. Gedikli, Numerical investigation of axial crushing behavior of a tailor welded tube. *Materials & Design*, 44: 587-595, 2013.
32. F. Tarlochan, F. Samer, A. M. S. Hamouda, S. Ramesh, K. Khalid, Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces, *Thin-Walled Structures*, 71: 7-17, 2013.
33. Z. Huang, M. Z. N. Khan, W. Chen, H. Hao, M. Elchalakani, T.M. Pham, Effectiveness of reinforcing methods in enhancing the lateral impact performance of geopolymer concrete column reinforced with BFRP bars, 175: 104544, 2023.
34. E. Chen, G.J.T. Elert, Coefficients of friction for steel, 2004.
35. E. Acar, M.A. Guler, B. Gerçeker, M.E. Cerit, B. Bayram, Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, *Thin-Walled Structures*, 49(1): 94-105, 2011.
36. S.A. Keskin, E. Acar, M.A. Güler, M. Altin, Exploring various options for improving crashworthiness performance of rail vehicle crash absorbers with diaphragms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(5): 3193-3208, 2021.
37. M. Kazemi, J. Serpoush, Energy absorption parameters of multi-cell thin-walled structure with various thicknesses under lateral loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications*, 235(3): 513-526, 2021.
38. Q.Q. Li, E. Li, T. Chen, L. Wu, G.Q. Wang, Z.C. He, Improve the frontal crashworthiness of vehicle through the design of front rail, *Thin-Walled Structures*, 162, 2021.