

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TASARIMLARDA W KESİTLERE SAHİP ÇARPIŞMA  
KUTULARI İÇİN DARBE SÖNÜMLEME KABİLİYETLERİNİN  
DENEYSEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ömer ADANUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi İ. Kutay YILMAZÇOBAN**

**HAZİRAN 2019**

**T.C.**  
**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TASARIMLARDA W KESİTLERE SAHİP ÇARPIŞMA  
KUTULARI İÇİN DARBE SÖNÜMLEME KABİLİYETLERİNİN  
DENEYSEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ömer ADANUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 10.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

**Dr. Öğr. Üyesi İ. Kutay  
YILMAZCOBAN**

**Jüri Başkanı**

**Doç. Dr. Nihat KABAY**

**Üye**

**Doç. Dr. Ahmet Ç.  
ÇİLİNGİR**

**Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde şahsımın da içerisinde bulunduğu araştırma ekibi tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin büyük kısmı bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim. Bir kısım elde edilmiş veriler ise danışmanımın yöneticiliğinde yapılmış tezlerin belirli kısımlarında kullanılmıştır.

Ömer ADANUR

02.05.2019

## **TEŞEKKÜR**

Çalıőmamda bana bilgi ve tecrübeleri ile rehber olan değerli hocamız Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN'a, malzeme temini ve numunelerin imalatında yardımlarını esirgemeyen başta Serbülent ERDEN ve EMS firmasına, maddi manevi destekleri ile her daim yanımızda olan kıymetli ailelerimize teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY .....	xi

## BÖLÜM 1

LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	1
--------------------------	---

## BÖLÜM 2.

MATARYEL VE METOD .....	25
2.1. Giriş .....	25
2.2. Numune Özellikleri .....	25
2.2.1. Numune geometrisi .....	25
2.2.2. Numune malzemesi .....	27
2.3. Numerik Çalışma.....	30

## BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMA .....	32
3.1. Serbest Düşme Test Düzenegi.....	32
3.2. Çarpışma Kutusu Testleri.....	32

## BÖLÜM 4.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	34
4.1. 2mm Kalınlığındaki Numune .....	34
4.1.1. W01-I2-S01-T01 .....	34
4.2. 1,5mm Kalınlığındaki Numune .....	37
4.2.1. W01-I1.5-S01-T01 .....	37
4.3. 1mm Kalınlığındaki Numune .....	40
4.3.1. W01-I1-S01-T01 .....	40
4.3.2. W01-I1-S01-T02 .....	43
4.3.3. W01-I1-S01-T03 .....	45
4.3.4. W01-I1-S01-T04 .....	47
4.3.5. W01-I1-S01-T05 .....	49
4.3.6. W01-I1-S01-T06 .....	52
4.3.7. W01-I1-S01-T07 .....	55
4.3.8. W01-I1-S02-T(01-07) .....	58
4.3.9. W01-I1-S03-T(01-07) .....	60
4.3.10. W02-I1-S01-T(01-07) .....	63
4.3.11. W02-I1-S02-T(01-07) .....	64
4.3.12. W02-I1-S03-T(01-07) .....	66
4.4. 0,8mm Kalınlığındaki Numune .....	68
4.4.1. W01-I0.8-S01-T01 .....	69
4.4.2. W01-I0.8-S01-T02 .....	69
4.4.3. W01-I0.8-S01-T03 .....	70
4.5. 1,2mm Kalınlığındaki Numune .....	72
4.5.1. W01-I1.2-S01-T01 .....	73
4.5.2. W01-I1.2-S01-T02 .....	74
4.5.3. W01-I1.2-S01-T03 .....	75
4.5.4. W01-I1.2-S01-T05 .....	78
4.6. Yapılan Deneylerin Analiz Sonuçları .....	81
BÖLÜM 5.	
ÖNERİLER .....	84

KAYNAKLAR .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	90

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$bkz$	: Bakınız
$E_{ab}$	: Absorbe edilen enerji miktarı
$g$	: Yer çekimi ivmesi
$h_{profil}$	: Profilin kalınlığı
$h_{sağ}$	: Deney sonrası numunenin sağ sütun yüksekliği
$h_{sol}$	: Deney sonrası numunenin sol sütun yüksekliği
$h_{s,ort}$	: Deney sonrası numunenin ortalama yüksekliği
$h_{strok}$	: Deney düzeneğinin stoğu
$Ke_{im}$	: Çarpışma anında levhanın kinetik enerjisi
$m_{araç}$	: Sürücü, araç ve numune kütleleri toplamı
$m_p$	: Düşürme plakasının kütlesi
$n$	: Profil adedi
$Pe_{son}$	: Çarpışma sonrası levhanın potansiyel enerjisi
$V_{den}$	: Deneysel hız
$V_{teorik}$	: Teorik hız



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Önden Çarpma .....	3
Şekil 1.2. Yandan Çarpma .....	3
Şekil 1.3. Arkadan Çarpma .....	3
Şekil 1.4. Simms-Welback marka araca takılan ilk tampon .....	5
Şekil 1.5. Pontiac GTO ön tampon .....	6
Şekil 1.6. Çoğunlukla aksenal çarpma yüklemesine tabi tutulan düzgün tetiklenmiş prizmatik elemanların aşamalı .....	7
Şekil 1.7. Önden ve arkadan çarpışmalı kazalarda enerji dağılımı .....	8
Şekil 1.8. Otomobillerde kullanılan çarpışma kutuları .....	9
Şekil 1.9. Burkulma başlatıcı darbe sönümleme kabartmaları (crash bead) .....	11
Şekil 1.10. Farklı çaplarda dairesel boruların çarpışma performansının karşılaştırılması .....	12
Şekil 1.11. Girintilerin darbe emicilere etkisi .....	14
Şekil 1.12. N sayıda farklı hücreli tüplerin deformasyon modları (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 10^\circ$ , (c) $\theta = 20^\circ$ ve (d) $\theta = 30^\circ$ .....	15
Şekil 1.13. İki kare tüp numunenin analiz sonuçları (a) Boş tüp (b) GFRP petek yapıyla dolu tüp (c) Kare tüp kesit (d) GFRP petek yapıyla dolu kare tüp kesit .....	16
Şekil 1.14. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri .....	17
Şekil 1.15. Sekizgen, aktıgen, kare ve 12 kenarlı sütunlar .....	18
Şekil 1.16. Test örneklerinin kesitleri ve boyutsal detayları .....	18
Şekil 1.17. Numunelerin geometrilerine göre analiz ve test sonuçları .....	19
Şekil 1.18. Ezme kutularının çarpışma modeli; deforme olmamış ve deforme olmuş halleri (56 km/h) .....	20
Şekil 1.19. Deney düzeneği ve düşürme testi cihazı .....	21
Şekil 1.20. Test sonrası numuneler ve numunelerin simülasyon sonuçları .....	22
Şekil 1.21. Çarpışma sisteminin modeli ve iki malzemenin birleşiminden yapılmış nokta kaynaklı numune .....	23

Şekil 1.22. Punta kaynaklı nümunelerin deneysel ve numerik simülasyonlar arasındaki deforme olmuş modları (CN, RL, CO) .....	24
Şekil 2.1. Tasarımları yapılan profil örnekleri .....	26
Şekil 2.2. Geliştirilen tasarımlar .....	26
Şekil 2.3. İmalatı gerçekleştirilen profilin kesit ölçüleri.....	27
Şekil 2.4. W profil kesitine sahip numunenin abkant tezgahında büküm işlemlerinin gerçekleştirilmesi .....	28
Şekil 2.5. Kaplama olmayan 2mm kalınlığa sahip numune.....	29
Şekil 2.6. Galvaniz kaplı 1,5mm kalınlığa sahip numune .....	29
Şekil 3.1. Serbest düşme test düzeneği .....	33
Şekil 4.1. Numunelere verilen profil numaralarının açılımı .....	34
Şekil 4.2. Çarpışma öncesi ve sonrası 2mm'lik numune (a) Önden görünüm (b) Arkadan görünüm.....	35
Şekil 4.3. Yavaşlatılmış çekimden tablanın numuneye çarpma anı.....	36
Şekil 4.4. (a) Çarpışma öncesi (b) Çarpışma sonrası (c) Soldan görünüm (d) Sağdan görünüm .....	38
Şekil 4.5. Tablanın numuneye açıyla çarptığı an ve temas anı .....	39
Şekil 4.6. W01-I1-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu .....	41
Şekil 4.7. Tablanın profile eğik olarak çarptığı an.....	42
Şekil 4.8. (a) Numunenin 90 derece döndürülerek yeniden konumlandırılması ve W01-I1-S01-T02 kodlu numune ait çarpışma sonrası fotoğraflar .....	44
Şekil 4.9. İvme sensöründen alınan grafik .....	45
Şekil 4.10. Tablanın numuneye çarpma esnasında ki yaklaşık hızı.....	45
Şekil 4.11. W01-I1-S01-T03 nolu numunenin çarpışma sonunda ki ölçüleri .....	47
Şekil 4.12. W01-I1-S01-T04 kodlu numunenin çarpışma sonrası ölçüleri.....	48
Şekil 4.13. (a) İvme sensörünün grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s)	49
Şekil 4.14. W01-I1-S01-T05 kodlu numunenin çarpışma testi sonunda ki durumu	51
Şekil 4.15. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s) .....	51
Şekil 4.16. W01-I1-S01-T06 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu .....	53
Şekil 4.17. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s) .....	54
Şekil 4.18. Tablanın numuneye çarpmadan önce ve sonraki halleri.....	55
Şekil 4.19. W01-I1-S01-T07 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	56
Şekil 4.20. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s) .....	57

Şekil 4.21. Tablolarda verilen H (mm) ölçü değerlerinin alındığı kısımlar.....	58
Şekil 4.22. W01-I1-S02-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	59
Şekil 4.23. W01-I1-S03-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	61
Şekil 4.24. W01-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 deney aralığına ait deformasyon miktarları .....	62
Şekil 4.25. W02-I1-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	63
Şekil 4.26. W02-I1-S02-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	65
Şekil 4.27. W02-I1-S03-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu.....	66
Şekil 4.28. W01-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 deney aralığındaki deformasyon miktarları .....	68
Şekil 4.29. W01-I0,8-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu .....	69
Şekil 4.30. W01-I0,8-S01-T02 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu .....	70
Şekil 4.31. W01-I0,8-S01-T03 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu .....	71
Şekil 4.32. Tablanın numuneye çarptığı açı.....	71
Şekil 4.33. W01-I1.2-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu..	74
Şekil 4.34. W01-I1.2-S01-T02 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu..	75
Şekil 4.35. W01-I1.2-S01-T03 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu..	76
Şekil 4.36. W01-I1.2-S01-T04 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu..	77
Şekil 4.37. W01-I1.2-S01-T05 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu..	78
Şekil 4.38. W01 profil numaralı numunenin 2mm-1.5mm-1.0mm-0.8mm'lik sac kalınlıklarına ait yer değişimi ve zaman grafiği.....	80
Şekil 4.39. 250mm yüksekliğindeki W01 ve W02 profillerine ait sonuç grafiği ...	81
Şekil 4.40. 1mm sac kalınlığına sahip W01 profil numaralı numunenin analiz sonuçları .....	82
Şekil 4.41. 1mm sac kalınlığına sahip W02 profil numaralı numunenin analiz sonuçları .....	83

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Yıllara göre kaza sonuçları .....	1
Tablo 1.2. Yıllara göre kazalara karışan araç türleri.....	2
Tablo 2.1. ST-37 Malzemesinin elastik özellikleri .....	27
Tablo 2.2. ST-37 Malzemesinin kimyasal özellikleri .....	27
Tablo 4.1. W01 kesitli 300mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	58
Tablo 4.2. W01 kesitli 250mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	60
Tablo 4.3. W01 kesitli 200mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	62
Tablo 4.4. W02 kesitli 300mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	64
Tablo 4.5. W02 kesitli 250mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	66
Tablo 4.6. W02 kesitli 200mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları .....	67
Tablo 4.7. 0,8mm sac kalınlığına sahip nümunelerin deney öncesi ve deformasyon sonrası ölçüleri .....	72
Tablo 4.8. 1,2mm sac kalınlığına sahip nümunelerin deney öncesi ve deformasyon sonrası ölçüleri .....	79

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Çarpışma-kutusu, önden çarpışma, düşürme testi, w kesit.

Günlük trafik akışında yaralanmalı ve maalesef ölümlü kazalarda, araç tasarımı alanında birçok güvenlik tedbirleri geliştirilmesine rağmen, araçların hasara uğraması kaçınılmazdır. Bu güvenlik tedbirleri, aktif ve pasif güvenlik sistemleri olmak üzere iki başlıkta toplanabilir. Bu çalışmada, kaza durumunda araçta malzeme değişiklikleri ve yapısal iyileştirmeler içeren pasif güvenlik sistemlerinden biri olan çarpışma kutuları incelenmiştir. Çarpışmanın olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla normalde şasi ile sürücü kabini ve motor aksamının ilerisi arasına yerleştirilen çarpışma kutuları, bu çalışma ile farklı olarak otomobilin ön tamponunun hemen arkasında yer alması hedeflenmiştir. Çalışma sürecinde açık kesite sahip W şeklinde farklı yeni kesit tasarımlarına sahip çarpışma kutularının enerji sönmeme kabiliyetleri incelenmiştir. Gerçek kaza senaryosunun ölçekli benzetimi serbest düşürme düzeneği ile gerçekleştirilerek farklı boyut ve kalınlıkta tasarlanmış olan çarpışma kutularının kaza şok dalgasını sönmeme kabiliyetleri incelenmiştir. Bu süreçte, A segmentindeki küçük sınıf bir aile aracının önden çarpışma koşulları altındaki durumu dikkate alınmıştır. Serbest düşme testleri yardımıyla gerçekleştirilen çarpışma senaryosunda, ters mantıkla sabit duvar yerine, 2.88m yüksekliğe ve 150 kg kütleyle sahip bir kalın çelik bir tabla seçilirken, zemindeki sabit çelik plaka ile yere konulan çarpışma kutuları ise hareketli araç tarafını temsil etmektedirler. Bu süreçte ilk tercih edilen W kesitli sac metal çarpışma kutusu için serbest düşme testleri gerçekleştirilerek kalınlık ve boy optimizasyonu yapılmış, daha sonra optimize edilen ebatlar ile tasarımlar içerisinde karar verilen diğer bir W kesitli numune grubu aynı testlere tabi tutulmuştur. Deneysel yol ile elde edilmiş verilerin sayısal benzetimde kullanılabilmesi amacıyla dinamik simülasyonlar örnek bazı numuneler için gerçekleştirilmiş ve doğrulanmıştır. Elde edilmiş simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak kabul edilebilir bir örtüşme sağlanmıştır. Deneysel neticesinde, çarpışma enerjisini absorbe etmek için optimum numunenin, ilk teste tabi tutulan W kesitli ST37 (S235JR) malzemesinden imal edilmiş 1mm kalınlığındaki numune olduğu tespit edilmiştir.

# **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF IMPACT ABSORPTION CAPABILITIES FOR THE DISSIMILAR W CROSS-SECTIONED CRASH-BOXES DESIGNS**

## **SUMMARY**

Keywords: Crash-box, frontal collision, drop test, w section

Although, safety precautions and vehicle technology has been developed for decades accidents can happen in a daily traffic causing collision deformations, injuries or unfortunately fatalities. These security measures can be classified under two categories: active and passive safety systems. In this study, Crash-boxes which are one of the passive safety systems including the structural improvements and compatible material selection were investigated. In order to reduce the adverse effects of the collision, the crash-boxes, which are normally placed between the chassis and the driver's safety cab can be defined as ahead of the engine axle, are intended to be located just behind the front bumper of the car. During the study, the shock energy absorbing capabilities of the new design open cross-sectioned crash-boxes with different forms of the W-shaped geometries were investigated. The scaled simulation of the real accident scenario was carried out with the free fall tests and the ability of the crash boxes designed in different size and thickness to absorb the accident shock wave was investigated. In this process, a small-class family vehicle in the A-segment was taken into account in the case of frontal collision conditions. In the collision scenario carried out with the help of free fall tests, a steel plate with a height of 2.88m and a mass of 150 kg is chosen instead of the fixed wall, while the fixed steel plate on the ground and the collision boxes placed on the ground represent the mobile vehicle. In this process, the first preferred W-section sheet metal crash-box was subjected to free fall tests for the optimization of the thicknesses and heights; then another W section sample which was determined within the designs with optimized dimensions was subjected to the same tests to determine which design is better. The dynamic simulations were carried out and validated for some of the samples in order to use the experimental data in the numerical simulations. Finally, it has been determined that the optimum sample to absorb the collision energy is the initially tested W cross-sectional crash box design having 1mm thickness made of ST37 (S235JR) material.

## BÖLÜM 1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1970’li yıllarda yaşanan enerji krizinin aşılmasıyla, ulaşım modeli olarak birçok ülkede karayolu taşımacılığı tercih edilmiştir. Yolcu taşımacılığın %95,5’i yük taşımacılığının ise %89,9’u karayolu ile yapılmaktadır [1]. Ulaşım sektöründe karayolu taşımacılığının önemli derecede yer tutması ve araç sayısının hızla artması, oluşabilecek kazalar faktörünü de beraberinde getirmektedir. Tablo 1.1.’de belirtildiği gibi son 15 yıllık periyot göz önüne alındığında, maddi hasarlı ve ölümlü yaralanmalar giderek artmaktadır.

Tablo 1.1. Yıllara göre kaza sonuçları

Yıl	Toplam kaza sayısı	Maddi hasarlı kaza sayısı	Ölümlü yaralanmalı kaza sayısı	Ölü sayısı			Yaralı sayısı
				Toplam	Kaza yerinde	Kaza sonrası	
2002	439 777	374 029	65 748	4 093	4 093	-	116 412
2003	455 637	388 606	67 031	3 946	3 946	-	118 214
2004	537 352	460 344	77 008	4 427	4 427	-	136 437
2005	620 789	533 516	87 273	4 505	4 505	-	154 086
2006	728 755	632 627	96 128	4 633	4 633	-	169 080
2007	825 561	718 567	106 994	5 007	5 007	-	189 057
2008	950 120	845 908	104 212	4 236	4 236	-	184 468
2009	1 053 346	942 225	111 121	4 324	4 324	-	201 380
2010	1 106 201	989 397	116 804	4 045	4 045	-	211 496
2011	1 228 928	1 097 083	131 845	3 835	3 835	-	238 074
2012	1 296 634	1 143 082	153 552	3 750	3 750	-	268 079
2013	1 207 354	1 046 048	161 306	3 685	3 685	-	274 829
2014	1 199 010	1 030 498	168 512	3 524	3 524	-	285 059
2015	1 313 359	1 130 348	183 011	7 530	3 831	3 699	304 421
2016	1 182 491	997 363	185 128	7 300	3 493	3 807	303 812

Trafikte milyonlarca taşıtın birlikte ilerlemesi, beraberinde birçok riski ortaya çıkaracağından, araçların önden veya arkadan birbirlerine çarpması kaçınılmaz

olmaktadır. Tablo 1.2.'de görüldüğü gibi otomobil sayısının gün geçtikçe artması, doğal olarak trafik kazalarının da artmasına sebep olmaktadır.

Tablo 1.2. Yıllara göre kazalara karışan araç türleri

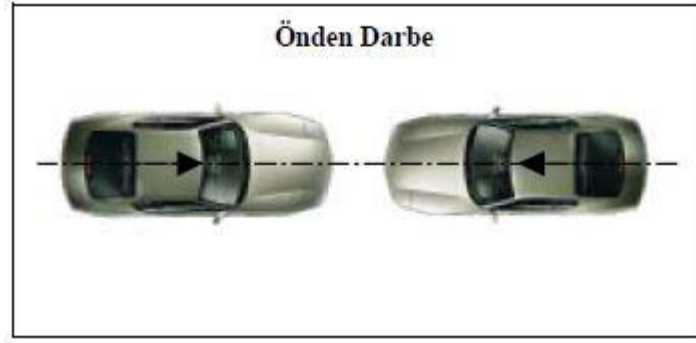
Yıl	Toplam	Otomobil	Minibüs	Otobüs	Kamyonet	Kamyon	Motosiklet
2013	17 939 447	9 283 923	421 848	219 885	2 933 050	755 950	2 722 826
2014	18 828 721	9 857 915	427 264	211 200	3 062 479	773 728	2 828 466
2015	19 994 472	10 589 337	449 213	217 056	3 255 299	804 319	2 938 364
2016	21 090 424	11 317 998	463 933	220 361	3 442 483	825 334	3 003 733
2017	21 940 757	11 846 085	475 647	222 310	3 594 489	837 423	3 089 895

Çarpışmayı tanımlayacak olursak; iki ya da daha çok cismin ani ve kuvvetli bir biçimde kısa bir süreliğine birbirlerine uyguladıkları kuvvet olayına denir. Cisimleri oluşturan malzemenin özelliklerinin yanı sıra, çarpışmanın sonucunu belirleyen iki temel etmen, çarpma kuvveti ile çarpışan cisimlerin birbirlerine değme süreleridir.

Karayolunda taşıtların birbirleriyle çarpışmaları sonucu meydana gelen kazaların sınıflandırılmaları faydalı olacaktır. Bu yüzden meydana gelen taşıt kazalarında sıklıkla görülen çarpışma tipleri, önden çarpma (karşılıklı çarpışma), yandan çarpma ve arkadan çarpmadır.

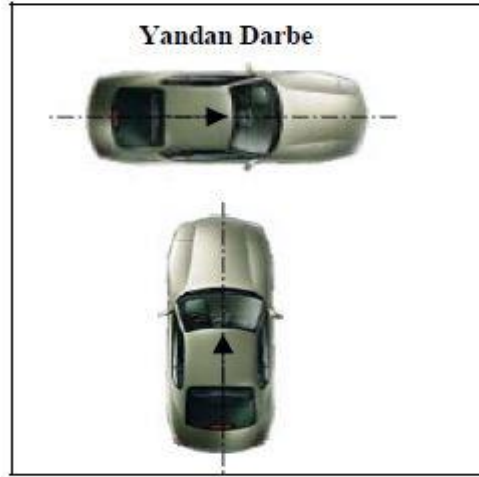
Önden çarpma; taşıtın, diğer taşıt ile ya da sabit veya hareketli bir engele ön kısmından çarpması veya çarpışmasıdır. Önden çarpma analizlerinde; çarpmadan gelen kuvvet yayılımının eşit dağıtılıyor olması, bağlantı noktalarının ve geometrilerinin kusursuz tasarlanması, belirlenen kritik deformasyon bölgelerinde çarpmadan gelen enerjinin maksimum şekilde emilmesi ve kritik parçalarda malzeme, imalat ve montaj teknolojilerinin isabetli seçilmesi, araç çarpışma dayanım performansının istenen standartlarda olması bakımından önemlidir [2].





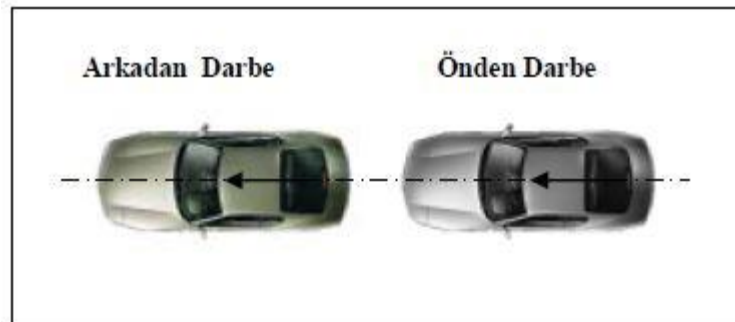
Şekil 1.1. Önden Çarpma

Yandan çarpma; kazaya sebebiyet veren taşıtlardan birinin ön kısmı ile, diğer araca yandan darbe uygulamasıyla meydana gelen çarpmalardır.



Şekil 1.2. Yandan Çarpma

Arkadan çarpma; taşıtlardan birinin ön kısmıyla diğer taşıta veya sabit ya da hareketli cisme arkadan çarpmasıdır.



Şekil 1.3. Arkadan Çarpma

Araba teknolojilerinin hızla ilerlemesinden dolayı, insan faktörleri ile ilgili kazalar da artmıştır. Otomobillerde olası bir kaza durumunda gerek şoför gerekse yolcuların güvenliğini sağlayabilmek amacıyla çeşitli güvenlik sistemleri kullanılmaktadır. Özellikle araç tasarımında kazaların önlenmesi, can ve mal kayıplarının azaltılması için birçok farklı güvenlik önlemleri geliştirilmektedir. Bunlar; aktif ve pasif güvenlik önlemleri olarak iki başlık altında toplanabilir. Aktif güvenlik, sürücünün kazadan etkilenmemesi için taşıtın kontrol ve frenleme sistemini artıracak şekilde bilgilendirme sistemleri ve kaza ihtimalini ön görüp aracı bu durumdan çıkaracak şekilde devreye giren kontrol basamaklarını içerir. Pasif güvenlik ise bir kaza ile karşılaşılması durumunda, kazanın kötü etkilerini azaltmak amacıyla araç üzerinde alınan malzeme değişikliği önlemi ve yapısal iyileştirmeler gibi tasarım önlemleridir [3].

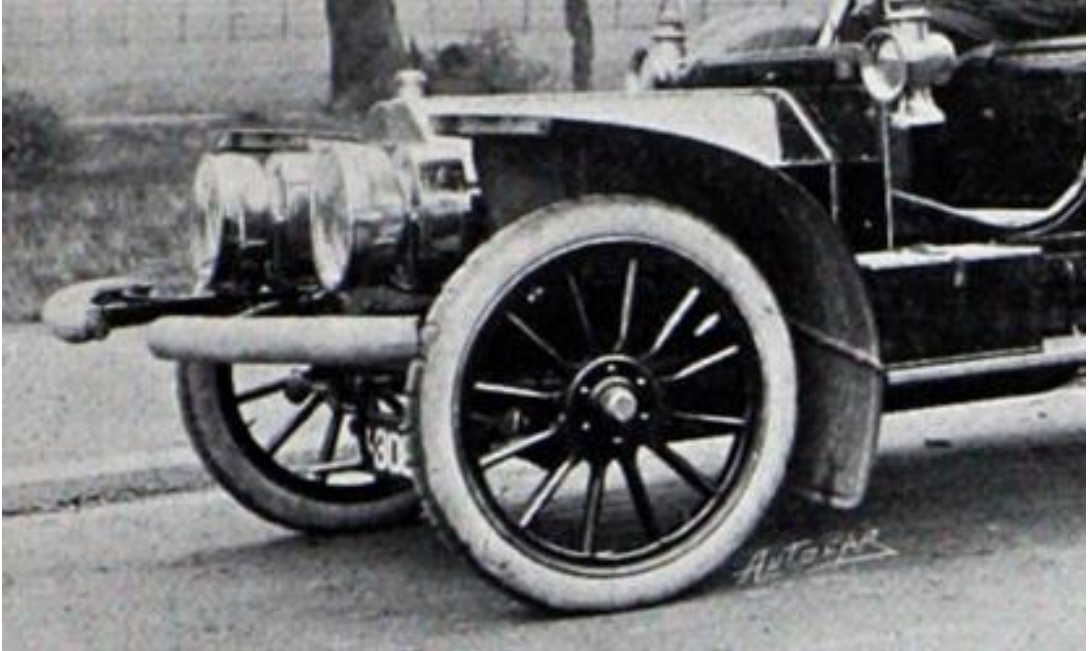
Aktif güvenlik, kazadan kaçınması için taşıtın kontrol ve frenleme sisteminin kabiliyetini artıracak şekilde kazayı ön görerek aracı bu durumdan çıkaracak şekilde devreye giren kontrol mekanizmasını içerir. Pasif güvenlik ise bir kaza ile karşılaşılması durumunda, kazanın hasarını ve sonuçlarını mümkün olduğunca azaltmak amacıyla yapısal, malzeme gibi iyileştirmeleri kapsayan tasarım önlemleridir. (ABS, EPS, ASR vb).

Pasif güvenlik sistemleri, otomobil içerisinde bulunanların kazadan en az seviyede etkilenmelerini sağlamak amacıyla kullanılır. (Emniyet kemerleri, hava yastıkları, araç şasesinin yapısı, çarpışma kutuları vs). Bu sistem elemanlarından biriside Şekil 1.8.'de örnekleri verilen otomobillerin ön ve arka kısmında bulunan çarpışma kutularıdır [4].

Meydana gelen kaza tiplerine göre tehlike ihtimali daha yüksek olan önden çarpışma koşulları için tedbir almak, ihmal edilmemesi gereken en önemli hususdur. Literatürde önden çarpışma koşullarını ihtiva eden birçok çalışma bulunmaktadır. Kazaların olumsuz sonuçlarını en aza indirmek için yapılan bu çalışmalarda, çarpma anında ortaya çıkan enerjiyi mümkün olduğu kadar sönmüleyebilmesi beklenen

enerji yutucuların, çarpışma performansını etkilediği görülmektedir. Bu sayede yolculara gelebilecek zararların en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

1901 yılında İngiliz Frederick Simms tarafından icat edilen tamponlar, araçların ön ve arkasındaki hataları kapatmak, yayaları yaralanmalara karşı koruma amacıyla yapıldı. Şekil 1.4.'de görüldüğü gibi 1905 yazında, İngiltere'nin Kilburn kentindeki Simms Manufacturing Co. Tesislerinde, 20 beygir gücündeki Simms-Welback marka bir arabaya ilk tampon takılmıştır. Tamponun mucidinin Frederick Simms olması ve patentinin onun tarafından alınmasına karşın, aslında fikir yeni değildi daha önce başarısız bir kaç uygulama daha olmuştur.



Şekil 1.4. Simms-Welback marka araca takılan ilk tampon

Tamponlar ilk önce sağlam metallere yapılmaktaydı. General Motors, 1968 Pontiac GTO modelinde, kalıcı deformasyon olmaksızın düşük hızlarda darbe emmek için tasarlanmış "Endura" adında gövde rengi plastik ön tamponları çıkardı. John DeLorean'ın balyozla yeni arabasına vurduğu ve hiçbir hasar oluşmadığını anlatan bir reklam televizyonda yayınlandı (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. Pontiac GTO ön tampon

1970-71 Plymouth Barracuda'nın ön ve arka tarafında benzer elastomerik tamponlar mevcuttu ve Renault, 1971'de Renault 5'de bir plastik tampon (sac kalıplama bileşimi ile yapılmış) piyasaya sürdü.

Modern otomobillerde bulunan tampon yapısı, çelik veya alüminyum destek çubuğunun üzerine fiberglas, kompozit veya plastik malzemelerden oluşmaktadır. Lüks otomobillerin tamponları PC / ABS denilen polikarbonat (PC) ve Akrilonitril bütadien stiren (ABS) birleşiminden üretilmektedir. Fakat tüm bu gelişmelere rağmen 50km/h ile yapılan çarpışma testlerinin sonuçları ve araçların güncel hızları göz önüne alındığında sönümleme kabiliyetlerinin yetersiz olduğu görülmektedir. Bu nedenle çarpışma kutusu (crush box) fikri ortaya atılmıştır.

Bu fikir doğrultusunda İnce duvarlı sönümleyicilerin katlanma şekilleri incelenmiştir. Tipik sönümleyici tasarım sürecinin temel örnekleri Şekil 1.6.'da gösterilmiştir [8].

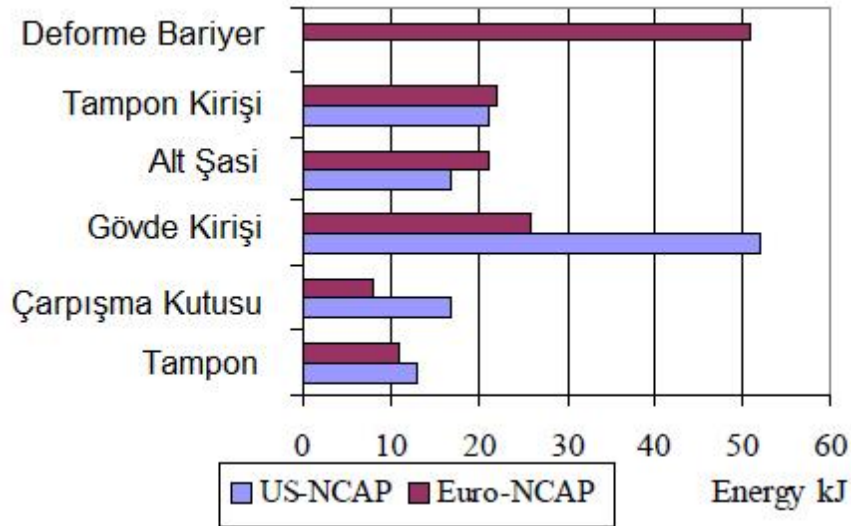


Şekil 1.6. Çoğunlukla aksenal çarpma yüklemesine tabi tutulan düzgün tetiklenmiş prizmatik elemanların aşamalı katlanması

Enerji yutucular, taşıtların ön kısmında bulunan ve çarpışma anında ortaya çıkan kinetik enerjiyi deforme olmak suretiyle şekil değiştirme enerjisine dönüştüren elemanlardır. Buradaki şekil değişiminin ise sönmölenen enerji miktarının daha büyük olabilmesi için plastik bölgede olması istenmektedir. Plastik bölgede oluşan şekil değişimi ile enerji yutucularda kalıcı şekil deformasyonu oluşmakta ve bunun sonucunda sönmölenen enerji büyük oranda geri dönüşümsüz olarak sönmölenmektedir. Deforme olabilen enerji yutucuları, ince duvarlı tüpler (dairesele ve kare kesitli veya prizmatik), çok köşeli kolonlar, tüp şeklinde yüzükler, peteksi yapılar, sandviç düzlemler şeklinde imal edilebilir. Çarpışma sonucu açığa çıkan kinetik enerjinin, enerji yutucu tarafından sönmölenme miktarı çarpışma hızına, çarpışma şekline, enerji yutucunun geometrisine, deformasyon biçimlerine ve malzeme özellikleri gibi parametrelere bağlıdır.

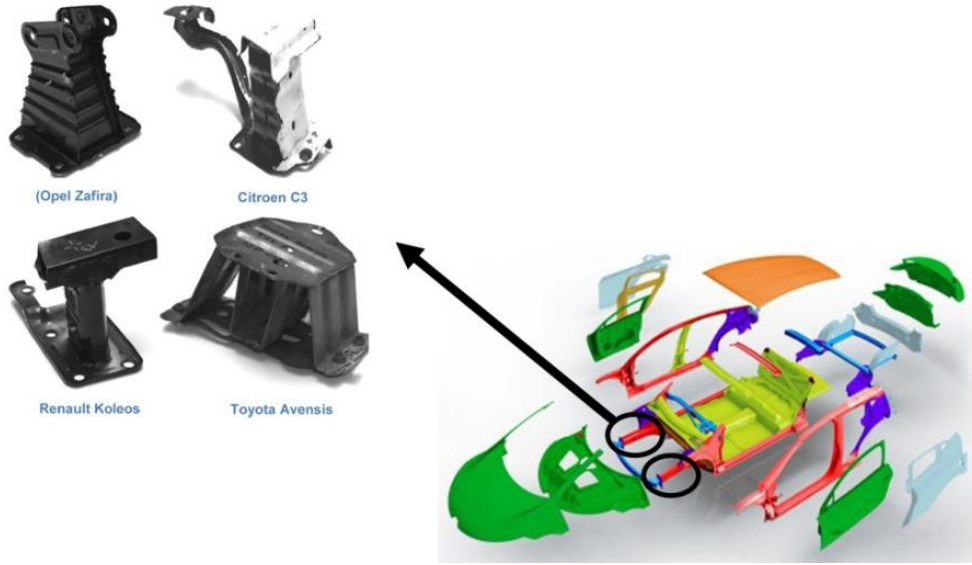
Otomobiller, tampon ile şasinin arasında ön darbeye üretilen enerjinin bir bölümünü sönmöleyebilmesi için özel olarak tasarlanmış bir tür cihaz içermektedir. Genellikle bu cihazlar, cephe çarpışması meydana geldiğinde eksensel ezilmede çöker ve enerjisinin bir kısmını plastik olgularla dağıtan içi boş bir çelik kirişten oluşur. Çarpışma kutuları önden veya arkadan çarpmalı bir kaza durumunda darbeyi ilk olarak karşılayan, ortaya çıkan deformasyon enerjisini sönmöleyerek otomobil içerisine mümkün olduğunca az seviyede iletilmesini sağlayan bağlantı

elemanlarından birisidir. Otomobil üreticileri tarafından önemli bir referans olarak kabul edilen ve verileriyle uluslararası alanda geçerliliğe sahip olan US-NCAP ve EURO-NCAP (New Car Assessment Programme) yaptıkları bir çarpışma testi sonucunda oluşan enerjinin araç üzerindeki parçalara göre dağılımını belirlemiştir. Şekil 1.7.'de görüldüğü gibi çarpışma kutuları bu enerjinin önemli bir kısmını üzerine alarak sönmülemektedir [9].



Şekil 1.7. Önden ve arkadan çarpışmalı kazalarda enerji dağılımı

Araçların önden çarpışması durumunda aracın önündeki deformasyonun yolcu bölmesine doğru ilerlemesi güvenlik açısından istenmeyen durumlar ortaya çıkarabilmektedir. Bu tür kazalarda aracın kinetik enerjisinin dengeli ve sürekli bir biçimde sönmülmesi ile atalet etkileri azalmakta ve araç içindeki kişilere gelecek zararlar daha az olmaktadır. Araçların önden çarpışma durumunda yolcu kabinine daha az zarar gelmesi açısından ön tamponun arkasında Şekil 1.8.'deki gibi çarpışma kutusu yada darbe emiciler kullanılmaktadır. Literatürde bulunan birçok çalışmada metal veya kompozit çarpışma sönmüleme ara elemanı veya çarpışma kutusu (crash box) denenmiş, hem geometrik hem de malzeme açısından kıyaslamalarda bulunulmuştur.



Şekil 1.8. Otomobillerde kullanılan çarpışma kutuları

Darbe anında açığa çıkan enerji miktarını absorbe edebilmek amacıyla çok farklı çalışmalar yapılmıştır. Farklı şekillere sahip geometriler tasarlanmış ve yüksek mukavemetli ve hafif malzeme kullanımı ile aracın ağırlığının düşürülmesi planlanmıştır [5].

Fakat tampon ve arkasındaki darbe emiciler üzerinde çarpma anında oluşan yüksek tepki kuvvetlerini absorbe etmek amacıyla çok fazla çalışma yapılamamıştır. Ekstrüzyon ile imal edilmiş ince cidarlı alüminyum yapılarda katlanma başlatıcı geometrilerin nereye yerleştirileceği konusunda çalışma yapılmış ancak optimizasyon kullanılmamıştır [10]. Daha sonradan yapılan çalışmada ise silindirik kesite sahip ince cidarlı yapılarda maksimum enerji emilimi için yarıçap ve kalınlık ölçülerinde optimizasyona gidilmiştir [11]. Bundan yola çıkarak konik kesitli çarpışma kutusu tasarlanarak maksimum ve minimum tepki kuvvetleri deneylerde bulunmuş, çıkan değerlere göre konik şeklin optimizasyonu sağlanmıştır [13]. Dairesel kesitli ve ince cidarlı alüminyum yapıların maksimum tepki kuvvetini düşürmek için yapılan çalışmada yanıt yüzey metodu ile elde edilen model Matlab ile çözdürülmüştür [3].

Kompozit malzemelerin arabaya elverişli hale getirilmesindeki ilk uygulamalar, doksanlı yılların ortalarında, özellikle de kompozitleri kullanarak otomobilde

sönümlenme elemanı olarak kullanma girişiminde bulunulmuştur. Kompozit malzemelerin kullanılması fikri, o zamandan beri büyük ölçüde incelenmiştir [14].

Ancak kompozit malzemelerin ezme işleminde kullanılan tüm mekanizmaların modellenmesinde karşılaşılan ciddi zorluklar (özellikle delaminasyon mekanizmaları), bu konuyla ilgili araştırmanın odak noktasını değiştirmiştir [15].

İçinde poliüretan köpük dolgululu ince cidarlı kare, dairesel, dikdörtgen ve konik metal borular, yarı statik ve dinamik kırma laboratuvar testlerine tabi tutulmuştur [16].

Darbe emicilerin plastik deformasyonu sırasında oluşan ortalama tepki kuvvetinin yüksek olması, absorbe edilen enerji miktarının fazla olduğu anlamına gelir, ancak çarpışmanın başında oluşan ilk tepki kuvvetinin yüksek olması istenmez. Bu yüzden, darbe emiciler üzerinde yerel burkulmaların daha düşük tepki kuvvetlerinde başlaması için burkulmaları başlatacak çevresel veya simetrik geometrik çıkıntı ve girintiler (crash bead), profil üzerinde oluşturulur (Şekil 1.9.). Bu çalışmada, birçok sayıda burkulma başlatıcı içermeyen modeller çözülmüş, sonuçlar karşılaştırılmış ve boyut optimizasyonu ile optimum et kalınlığı değeri bulunmuştur.

Crash box, malzemenin plastik bölgesinde kendisini deforme ederek ve çarpma enerjisini ve şok dalgalarını absorbe etmek suretiyle çarpışmadan kaynaklanan kinetik enerjini dönüştüren ve diğer vücut bölümlerinden önce kaza enerjisini emerek çökmesi beklenen bir sistemdir. Böylece ana kabin çerçevesine gelen hasar ve yolcuların hayati tehlikesi en aza indirgenmiş olur.

Çentikli çarpma kutuları kullanılarak darbe emme kabiliyeti kademeli olarak ilerlemektedir; Aksi halde gözlemlenmemiş çentikli numunelerde deformasyon kontrolsüz bir şekilde gerçekleştirilir. Bununla birlikte, çentikleme için ek üretim işlemleri nedeniyle, üretim maliyetleri artıyor. Etkin, basit ve ekonomik yolu göz önüne alarak, bu çalışma için çentik içermeyen numuneler tercih edilmiştir. Çarpışma kutuları üstlenmiş oldukları görev bakımından otomobil üzerinde önemli bir yere sahiptir. Geçmişten günümüze çarpışma kutularının enerji sönümlenme



kapasitelerini arttırmaya yönelik çeşitli AR-GE çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalarda çarpışma kutularının et kalınlıkları, geometrik özellikleri ve kullanılan malzeme gibi değişken parametreler kullanılmıştır.

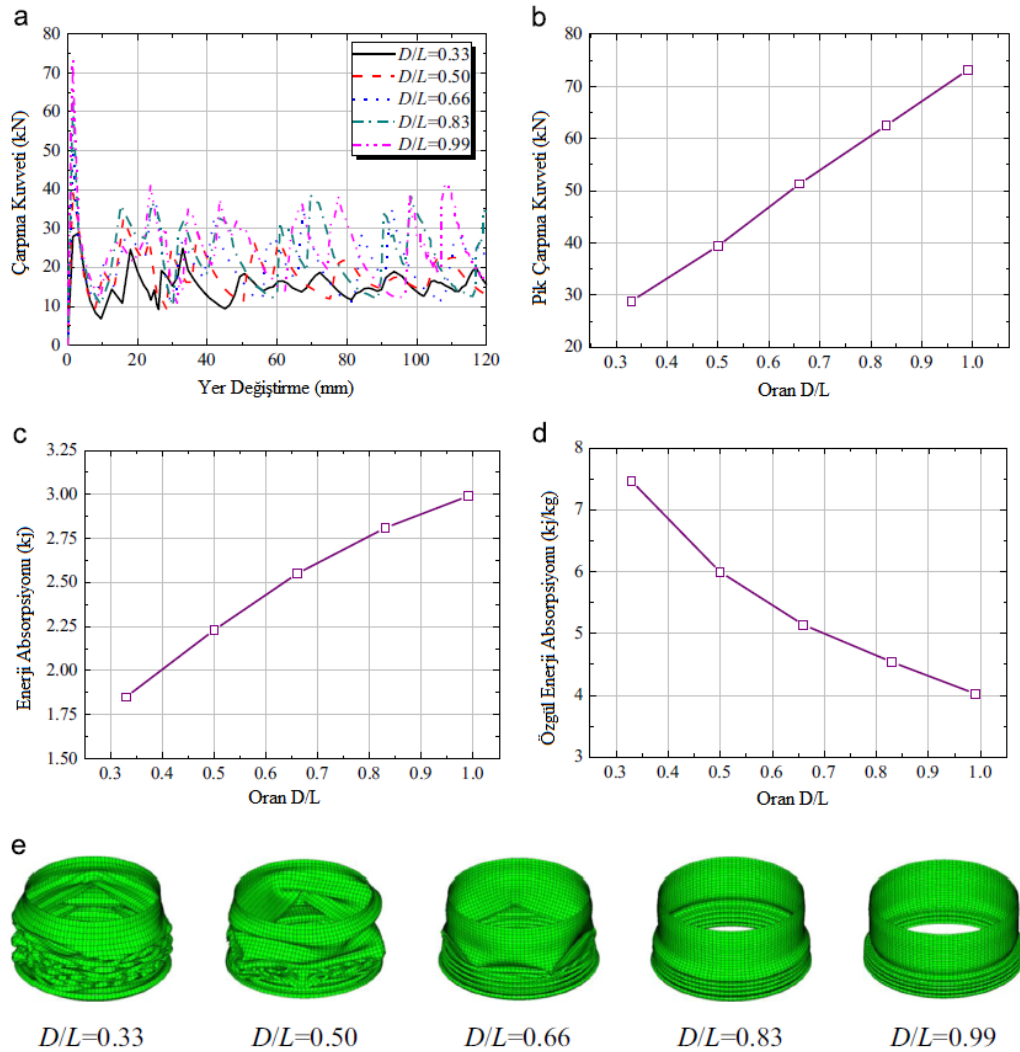
Otomobil şasesinin sağ ve sol ön ucunda konumlandırılan çarpışma kutusu, çarpışma enerjisinin emilmesi için en önemli otomotiv parçalarından biridir. İki aracın önden çarpışması durumunda çarpışma kutusunun, çarpışma enerjisini emerek çökmesi ve böylece araç kabine gelen hasarın en aza indirgenmesi ve yolcuların hayatlarının kurtarılacağı düşünülmektedir. Geleneksel olarak, bir çarpışma kutusu, Şekil 1.9.'da gösterildiği gibi darbe sönümleme kabartmaları olarak adlandırılan yerel burkulmaları daha düşük tepki kuvvetlerinde başlatacak darbe emiciler üzerinde çevresel veya geometrik çıkıntı ve girintilerle donatılmıştır; böylece "crash bead" burkulma deformasyonunu başlatabilir ve çarpışma kutusunun kolayca çökmesine neden olabilir [12].



Şekil 1.9. Burkulma başlatıcı darbe sönümleme kabartmaları (crash bead)

Darbe emiciler, aracın sahip olduğu kinetik enerjii, plastik deformasyona uğrayarak belli bir oranda sönümlerler. Darbe emici profillerin sönümleme özellikleri dikkate alınarak tasarlanmaları halinde, bu profiller akordiyon gibi katlanarak çarpışmadan doğacak olumsuz etkileri azaltmaktadırlar. Önden çarpışma anında ilk darbeyi alan tampondan sonra darbe emiciler üzerinde enerjinin belli bir kısmı absorbe edilmekte ve bu olay şok emicilerin akordiyon şeklinde katlanarak plastik deformasyona uğraması ile gerçekleşmektedir.

İlk çarpma anında tampon deforme olarak belli bir miktar enerjiyi absorbe eder ve arkasından darbe emiciler deforme olmaya başlar. Aksenal yönde gelen tepki kuvveti en yüksek değerine ulaşır ve daha sonra tepki kuvvetleri ortalama bir değer etrafında salınmaya başlar. Bu sırada yapı yerel burkulmalar ile iç içe katlanarak kısalır. Bu durumu anlatan benzer bir deney ve simülasyon çalışmasının sonuçları Şekil 1.10.'da verilmiştir [17].

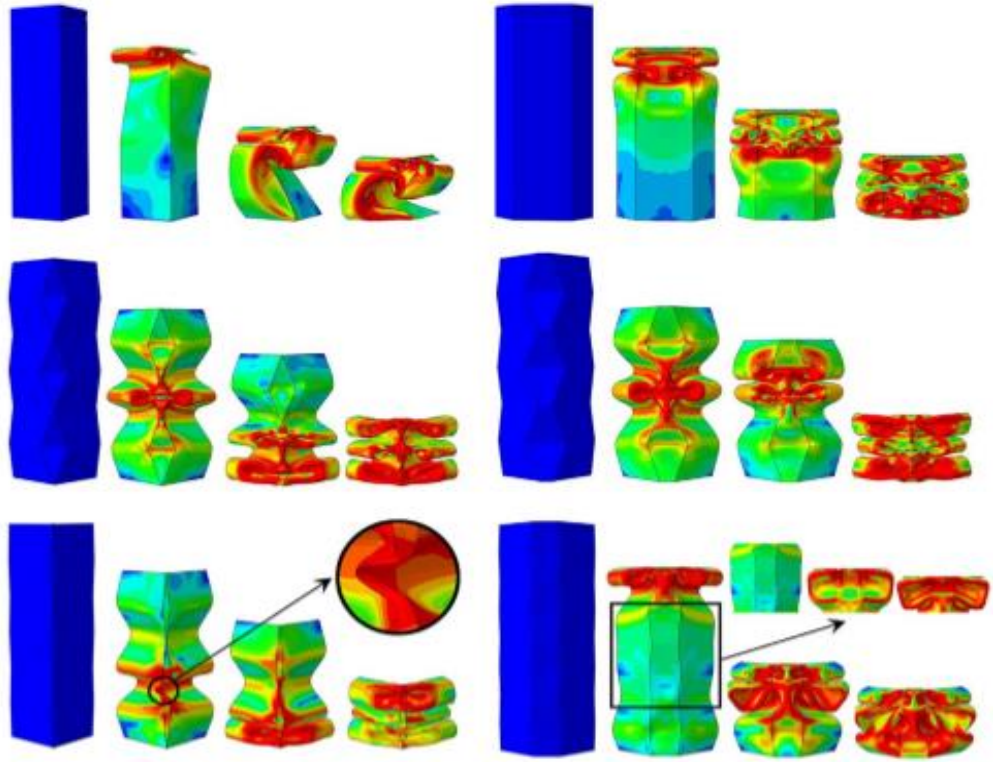


Şekil 1.10. Farklı çaplarda dairesel boruların çarpışma performansının karşılaştırılması

Önden çarpışma koşulları genelde araçların ön tamponları üzerinden gerçekleşmektedir. Klasik üretilen araçlarda, çeşitli malzemelerden imal edilmiş tamponlar, araç şasisine bağlı bulunan tampon kirişlerine montajlanmaktadır. Bu

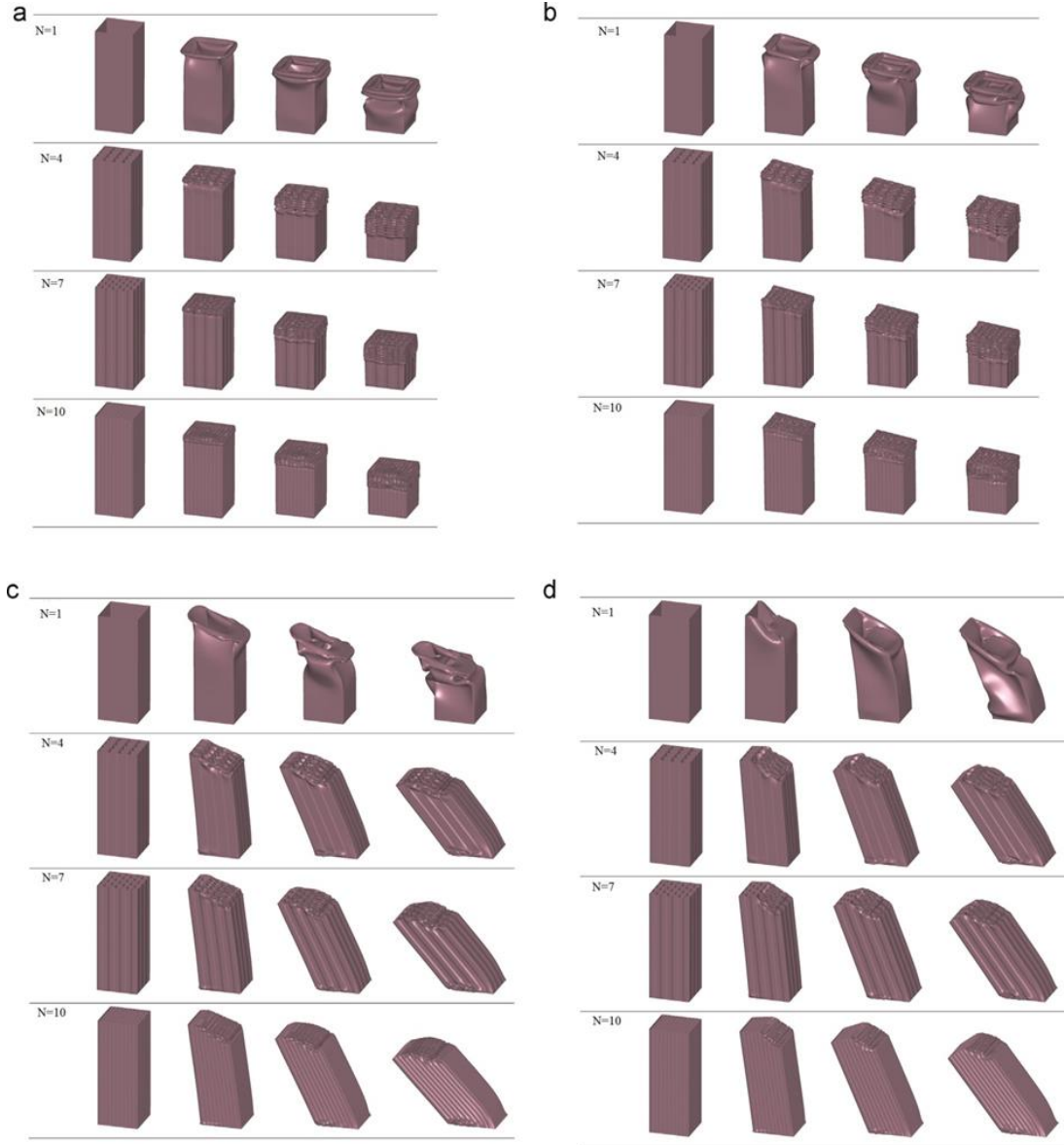
durum ise, sönümlenme kabiliyeti zayıf bir yapısal eleman olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk çarpma anında tampon deforme olarak belli bir miktar enerjiyi absorbe ederken sonrasında darbe emiciler deforme olmaya başlar. Eksenel yönde gelen tepki kuvveti en yüksek değerine ulaşır ve daha sonra tepki kuvvetleri ortalama bir değer etrafında salınmaya başlar.

Darbe emicilerin plastik deformasyonu sırasında oluşan ortalama tepki kuvvetinin yüksek olması, absorbe edilen enerji miktarının fazla olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, çarpışmanın başında oluşan ilk tepki kuvvetinin yüksek olması istenmeyen bir davranıştır. Bu yüzden, darbe emiciler üzerinde yerel burkulmaların daha düşük tepki kuvvetlerinde başlaması için burkulmaları başlatacak çevresel veya geometrik çıkıntı ve girintiler, profil üzerinde oluşturulmaktadır. Dalian University of Technology'de yapılan bir çalışmada ise farklı ölçülerde burkulma başlatıcı içeren modeller çözülmüş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 1.11.'de Caihua Zhou,'nun iki kişiyle beraber yaptığı bu çalışmada bahsi geçen girintilerin çarpışma sonrası oluşacak plastik deformasyonların daha düzenli olmasına olanak tanıdığı görülmüştür [18].



Şekil 1.11. Girintilerin darbe emicilere etkisi

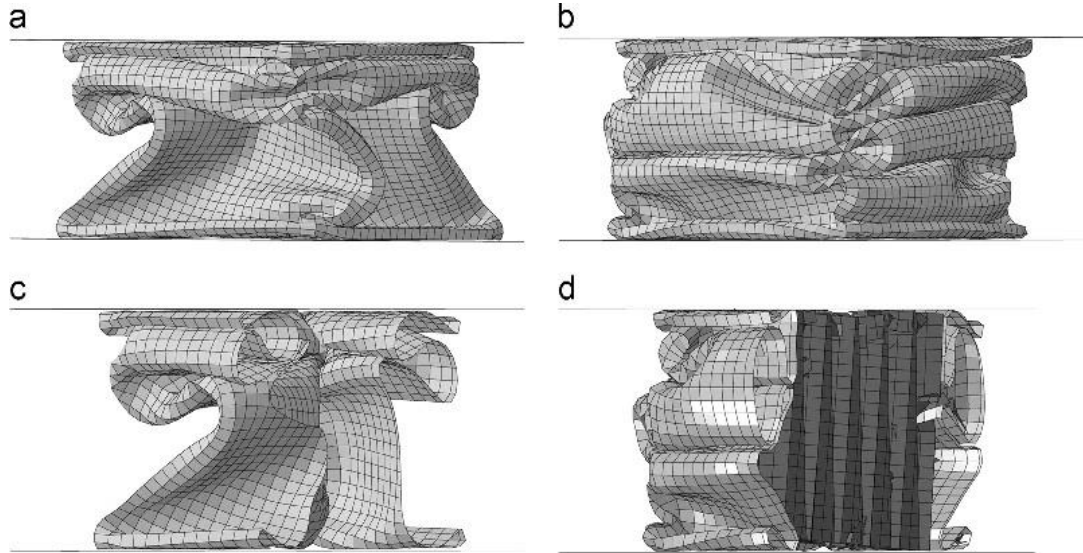
2015 yılında yapılan Jianguang Fang, Yunkai Gao, Guangyong Sun, Na Qiu, Qing Li tarafından yapılan bir çalışmada farklı sayıda hücreli yapılara sahip numunelerin aksenal ve eğik yükler altındaki davranışları Ls-Dyna ile gerçekleştirilen numerik çalışmalarla optimizasyonu yapılmıştır [19].



Şekil 1.12. N sayıda farklı hücreli tüplerin deformasyon modları (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 10^\circ$ , (c)  $\theta = 20^\circ$  ve (d)  $\theta = 30^\circ$

Simülasyon sonuçları, hücre sayısındaki artışın enerji emilimine yararlı fakat aksenal olarak azami kuvvetin artması nedeniyle zararlı olduğunu göstermiştir. Yapılan diğer çalışma ise dikdörtgen hücre barındıran dairesel yapıların aksenal ezilmesi konu alınmıştır [20]. İki çalışma da incelendiği takdirde birbirlerini destekleyici nitelikte sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat çok hücreli dikdörtgen tüpler, hücreleri oluşturmak için gerekli lamellerin ölçüleri aynı olduğu için seri üretime daha yatkın olduğu görülmüş ve araçlara daha iyi adapte edileceği düşünülerek daha iyi bir yöntem olarak kabul edilmiştir.

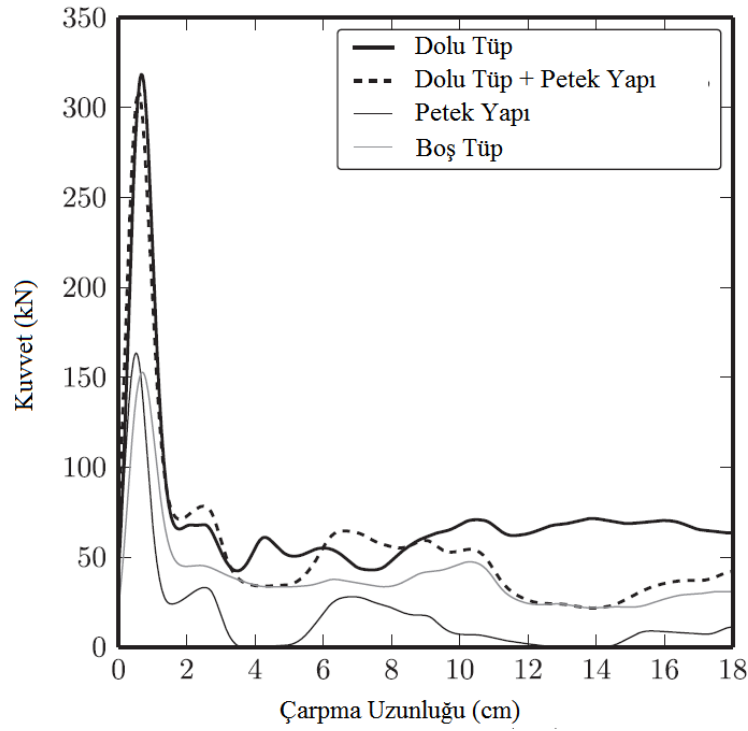
2014 yılında yapılan bir çalışmaya göre ise içi boş kare kesitli bir prizmanın içerisinde cam elyaf takviyeli polyamid den yapılmış petek yapıyla doldurulmasıyla elde edilmiş numunenin çarpışma esnasındaki davranışı incelenmiştir.



Şekil 1.13. İki kare tüp numunenin analiz sonuçları (a) Boş tüp (b) GFRP petek yapıyla dolu tüp (c) Kare tüp kesit (d) GFRP petek yapıyla dolu kare tüp kesit

Analiz sonuçlarında petek yapının sönümlenme kabiliyetini %22 oranında arttırdığı görülmüştür.

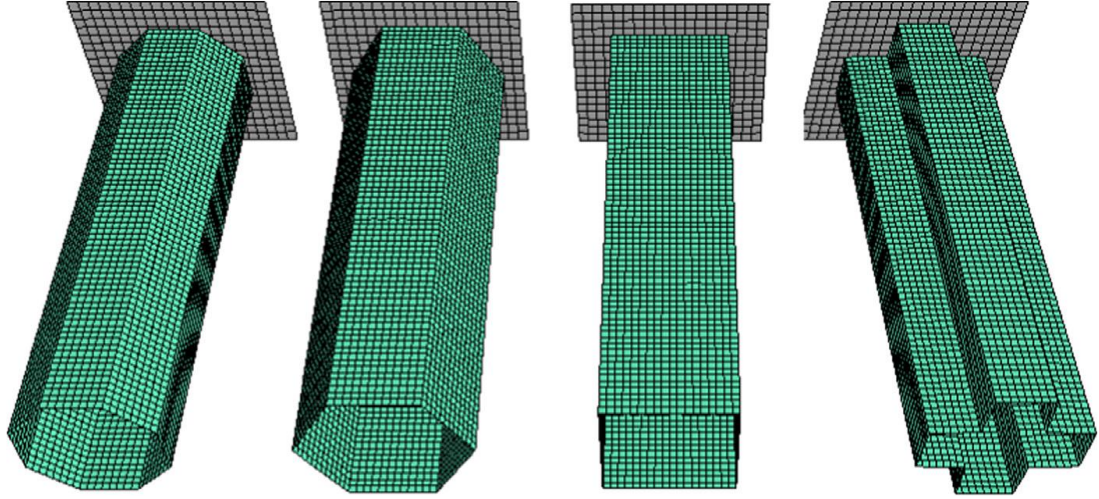
Absorbe edilen enerji miktarını artırmak amacıyla Şekil 1.15.'de görüldüğü gibi yapılan çalışmalarda değişik kesit geometrileri önerilmiş ve yüksek mukavemetli malzeme kullanımı ile daha hafif araç ağırlıkları hedeflenmiştir [21].



Şekil 1.14. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri

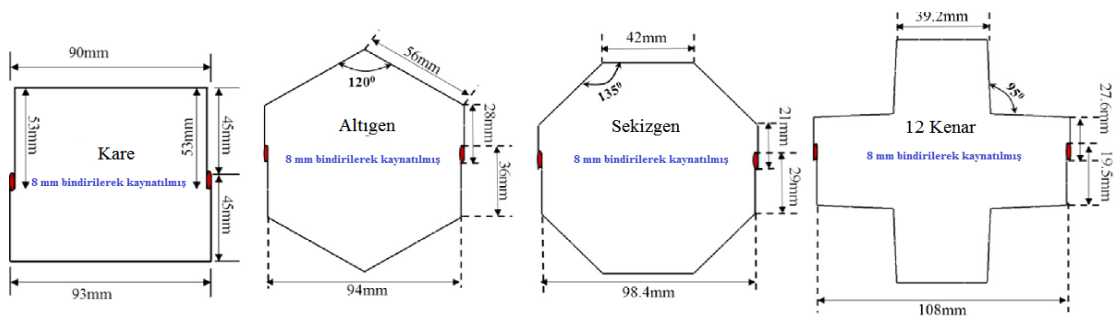
Boş çelik tüplerin enerji sönmüleme kabiliyetini arttırmak amacıyla 2015 yılında farklı geometrilere sahip çelik tüplerin LS-DYNA ile analizleri gerçekleştirilerek çarpışma uygunluğu en yüksek geometri, bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan numuneler kare, altıgen, sekizgen ve 12 kenarlı içi boş tüpler olarak belirlenmiştir [22].

Optimum tasarım için, numunelerin spesifik enerji emilimi (SEA) ve ezilme kuvveti verimliliği (CFE) tasarım amacı olarak belirlendi ve kesitsel konfigürasyon, duvar kalınlığı ve malzeme tipi olarak üç tasarım değişkeni seçildi. Maksimum SEA değerine ulaşmak için, DP600 yüksek mukavemetli çelikten yapılmış 12 kenar kesitin en iyi seçim olduğu; düşük mukavemetli çelikten yapılmış sekizgen kesitinde maksimum CFE değerine ulaşmada en iyi performansı sergilediği görülmüştür (Şekil 1.15.) [23].



Şekil 1.15. Sekizgen, altıgen, kare ve 12 kenarlı sütunlar

2015 yılında ise aynı kişiler tarafından bu çalışmanın devamı olarak çarpışma hasarının yolculara iletilmemesi için tampon bölgesine yerleştirilecek olan çok köşeli ince duvarlı sac metal tüpler incelenmiştir. İnce duvarlı sütunların enerji absorpsiyon verimliliğini artırmak için kesitlere ekstra köşeler getirilerek yeni bir strateji geliştirilmiştir. Kare, altıgen, sekizgen ve 12 kenarlı kesitlerden oluşan çok köşeli ince duvarlı sütunların enerji emme kapasiteleri ve çökme davranışları analitik ve sayısal olarak değerlendirildi. Bu arada, ince duvarlı yapıların yıkılma davranışını karakterize etmek için teorik temeller geliştirilmiştir. Analizler sonucunda en ideal olanların sekizgen ve 12 kenarlı tüpler olduğu görülmüştür (Şekil 1.16.) [24].

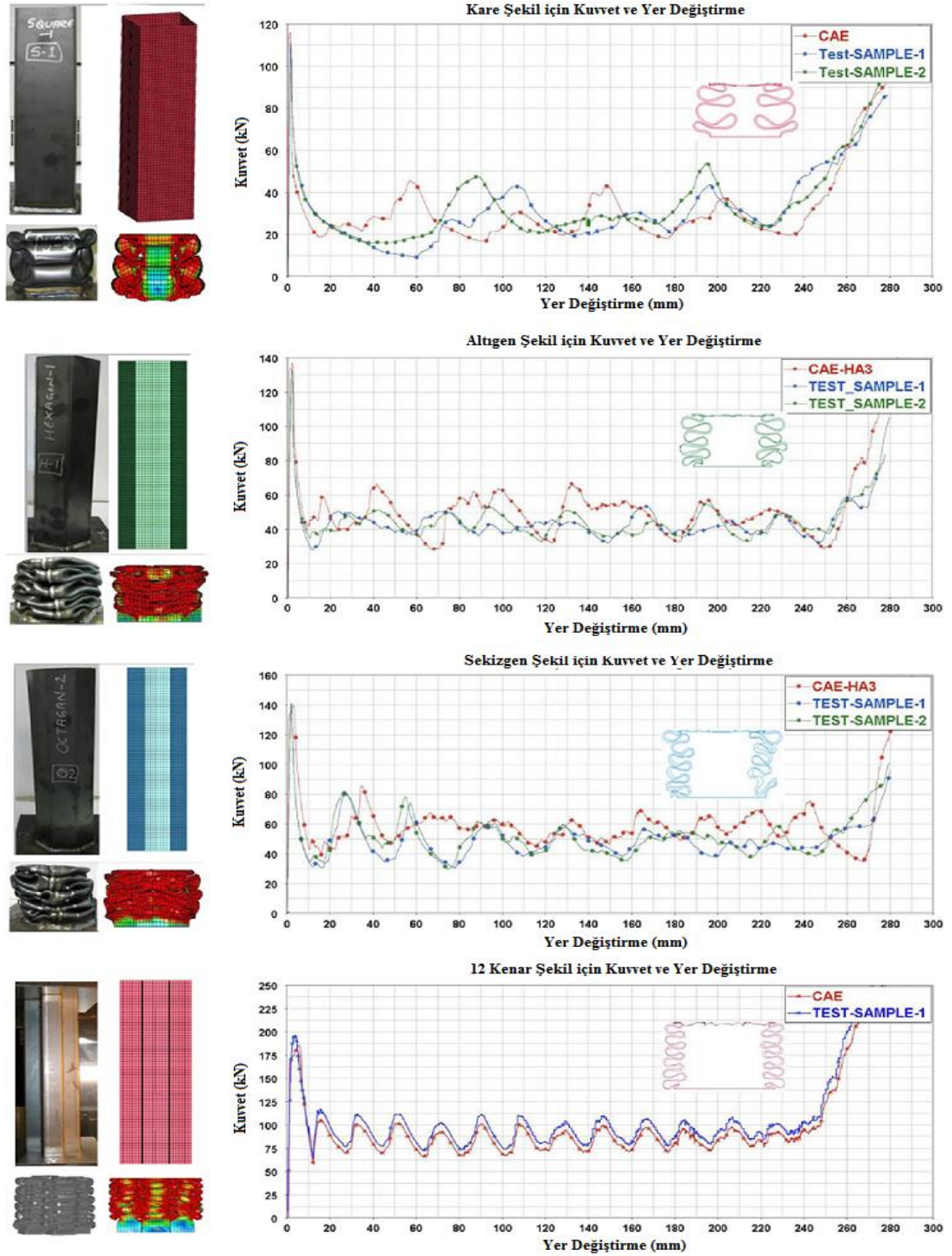


Şekil 1.16. Test örneklerinin kesitleri ve boyutsal detayları

Şekil 1.17.'de görüldüğü gibi sekizgen kesit haricindeki tüm nünemeler, düzenli bir karakteristiğe sahip modelde çökmüştür. Deneysel sonuçlar, LS-DYNA kullanılarak açık doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen sayısal simülasyon ile iyi bir uyum içindedir. Köşe açıları 90 derece olması sayesinde 12

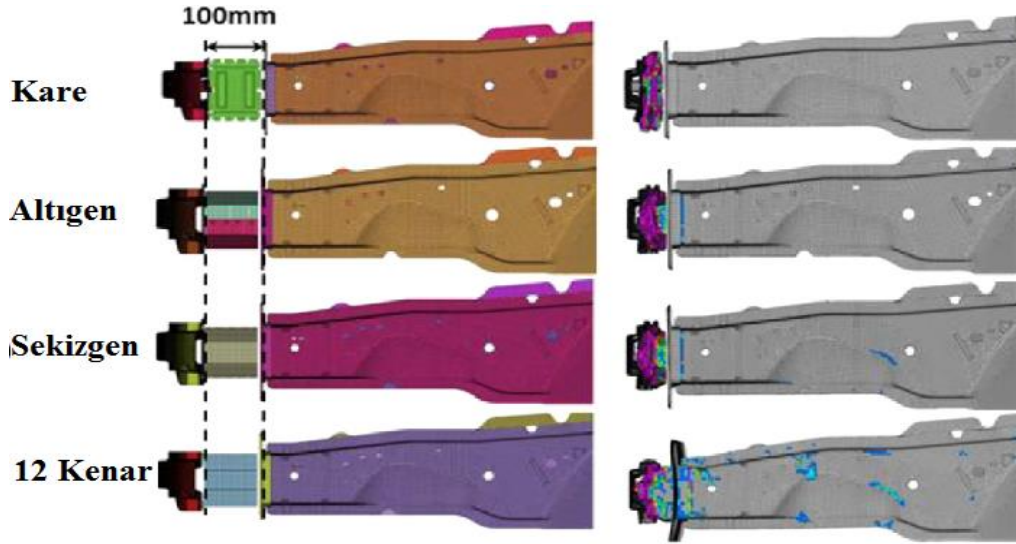


kenar şeklindeki nümune altı lob katlanarak daha fazla plastik deformasyona uğraması, daha yüksek enerji emilim verimliliğine sahip olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 1.17. Numunelerin geometrilerine göre analiz ve test sonuçları

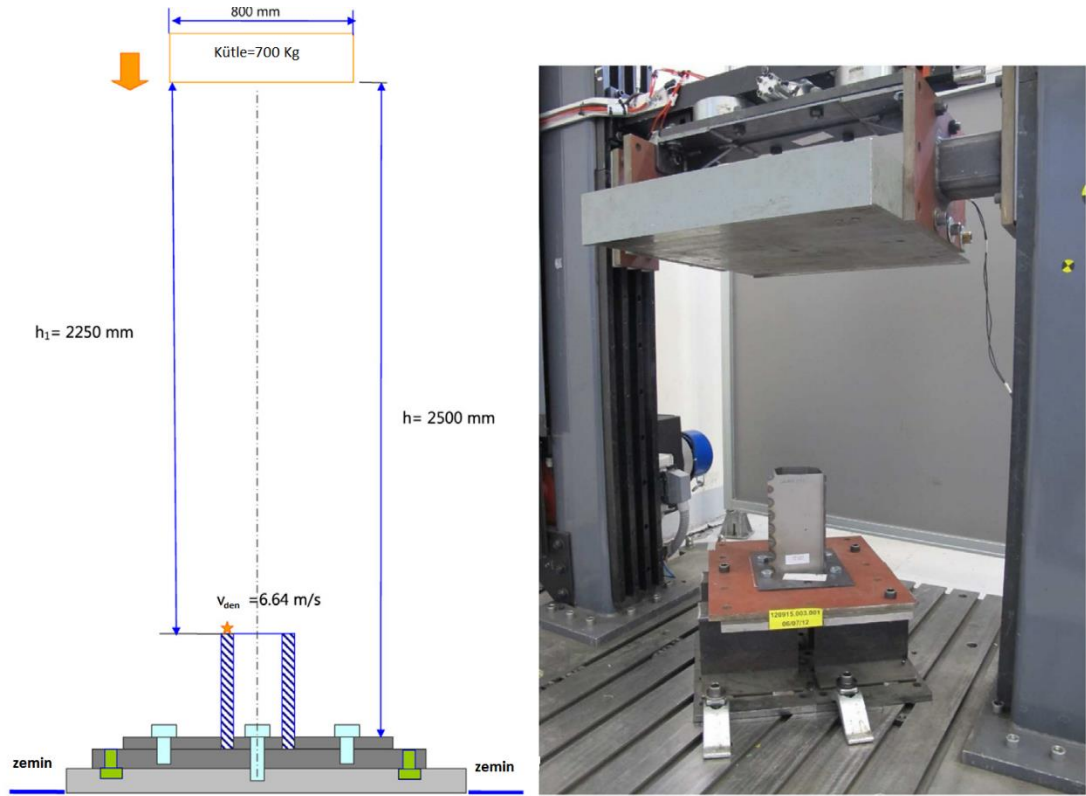
Ardından bir araç modeli oluşturulmuş ve numuneler bu modele yerleştirilip 56 km/h hızla çarpışma analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.18.).



Şekil 1.18. Ezme kutularının çarpışma modeli; deforme olmamış ve deforme olmuş halleri (56 km/h)

Analiz sonuçlarına bakıldığında kare ve altıgen numunelerin hemen aşırı deformasyona uğrayarak katlandığı görülmektedir. 12 kenar kesitli numunenin ise 90ms'de enerjinin bir kısmını sönmlemiş ve hala sönmleme kabiliyetine sahip hacim barındırdığı görülmektedir [25].

Elde edilen bu verilerden yola çıkılarak farklı malzemelerle metal tüplerin bir arada kullanılmasıyla çarpışma anında nasıl bir davranış sergileyeceği sorusu üzerine bu konuda yapılan literatür araştırması sonucunda soğuk şekillendirilmiş çokgen bir tüp ile içerisine yerleştirilecek olan farklı materyallerle hazırlanmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen düşürme testlerine ulaşılmıştır (Şekil 1.19.) [26].



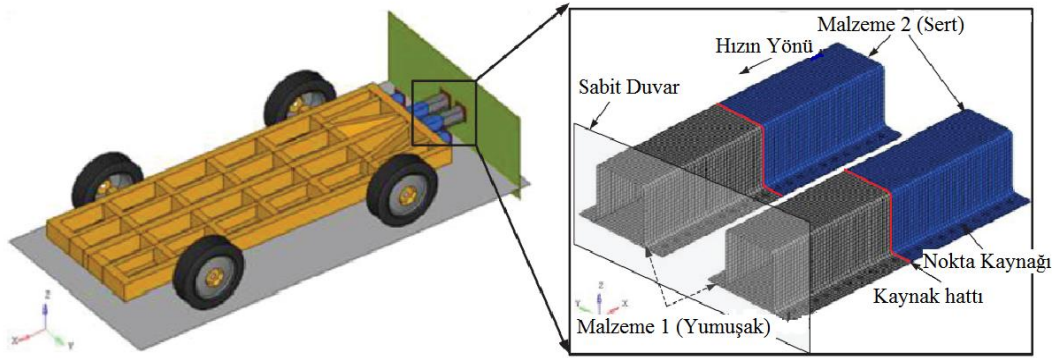
Şekil 1.19. Deney düzeneği ve düşürme testi cihazı

Bu araştırmada, soğuk şekillendirilmiş bir boş çelik kesit, polietilen tereftalat (PET) köpükle doldurularak hazırlanmış nümune, mantarla doldurularak hazırlanmış nümune, karbon fiber laminant takviyeli polimer (CFRP) ve cam elyaf laminant takviyeli polimer (GFRP) olmak üzere beş farklı numune analiz edilmiştir. Şekil 1.20.'de belirtildiği gibi, karbon fiber laminant takviyeli polimerin (CFRP) en iyi sonuçları verdiği görülmüştür [27].






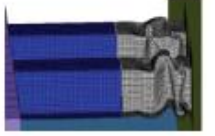


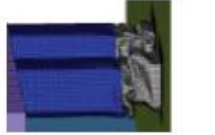






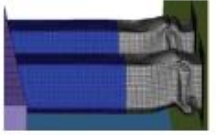
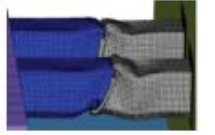
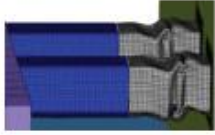



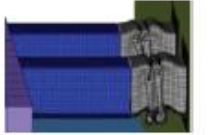



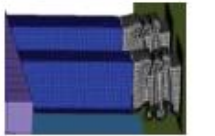

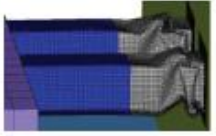

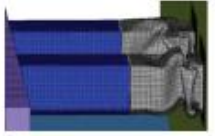

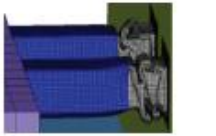

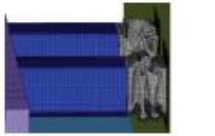



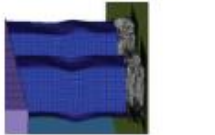
Şekil 1.20. Test sonrası numuneler ve numunelerin simülasyon sonuçları

Yüksek maliyet nedeniyle, darbe testini normal bir otomobile gerçekleştirmek önemli ölçüde zordur. Bu nedenle, performansı ve güvenliği normal bir aracın özelliklerini taşıyan bir aracın tasarımı yapılabilir. Şekil 1.21.'de F. Xu ve C. Wang böyle bir test örneğini bir aparat (kızaklı bir taşıyıcı) yardımıyla 30 km/h'e kadar hızlandırarak çarpışma testi senaryosu gerçekleştirmiştir [28].



Şekil 1.21. Çarpışma sisteminin modeli ve iki malzemenin birleşiminden yapılmış nokta kaynaklı numune

Testlerde, 80\*80mm kesite sahip numune DP590 ve DP790 malzemeden üç farklı kombinasyonla imal edilmiştir. Bu kombinasyonlar: 1- DP590 (1.00mm, Ön) / DP590 (1.50mm, Arka), 2- DP590 (1.50mm, Ön) / DP790 (1.50mm, Arka), 3- DP590 (1.00mm, Ön) - DP790 (1.50mm, Arka) şeklindedir. Şekil 1.22.'de görüldüğü gibi en kararlı sonuçları iki numaralı kombinasyon sağlamıştır [29].

Süre	Deney	CN	RL	CO
<b>Kombinasyon 1</b>				
10 ms				
20 ms				
50 ms				
<b>Kombinasyon 2</b>				
10 ms				
20 ms				
50 ms				
<b>Kombinasyon 3</b>				
10 ms				
20 ms				
50 ms				

Şekil 1.22. Punta kaynaklı nünunelerin deneysel ve numerik simülasyonlar arasındaki deforme olmuş modları (CN, RL, CO)

## **BÖLÜM 2. MATARYEL VE METOD**

### **2.1. Giriş**

Araç ve yolcu güvenliğinin artırılması amaçlanan bu çalışmada, önden çarpmalara karşı çarpışma kutuları (crash box) tasarlanmıştır. Kutuların tasarımı esnasında birçok farklı geometri ve malzeme kombinasyonları ile farklı numuneler elde edilmiştir. Mevcut numuneler, dayanım, malzeme özellikleri gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra, imalat, maliyet ve laboratuvar şartları da göz önüne alınarak elemelere tabi tutulmuş ve karar kılınan numuneler imal edilmiştir.

### **2.2. Numune Özellikleri**

Çalışma araç çarpışmalarında güvenliği artırmaya yönelik olduğu için, tasarlanacak numunelerin çarpışmalara karşı dayanıklı aynı zamanda maksimum enerji sönmüleyebilecek kabiliyet de olmaları gerekmektedir. Bunların tümü göz önüne alınarak farklı geometriler de numuneler tasarlanmıştır.

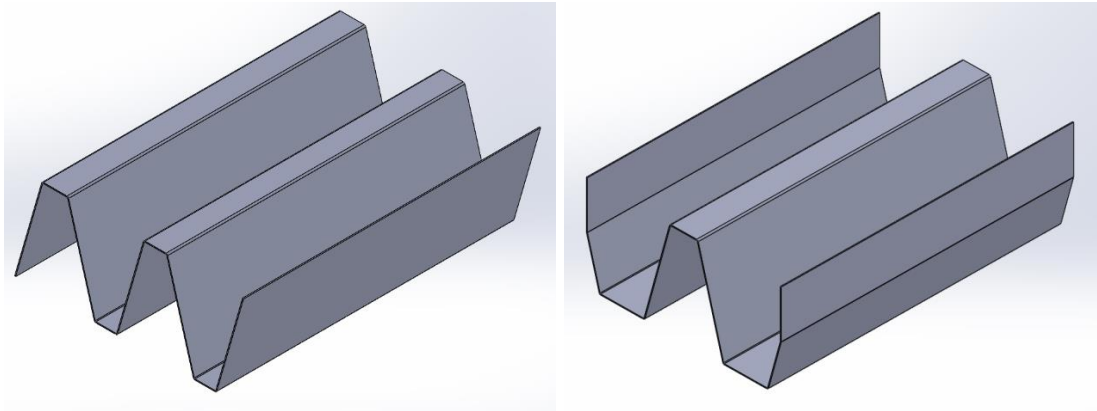
#### **2.2.1. Numune geometrisi**

Mevcut çarpışma kutularının birçoğu dikdörtgen ya da dairesel kesitte olmaktadır. Mevcut ile daha denenmemiş farklı kesitler üzerine yapılan incelemeler neticesinde enerji absorpsiyonunu artırmak amaçlı mühendislik çalışmaları yapılması ile W şekline benzer profilde tasarımlar yapılmasına karar verilmiştir.

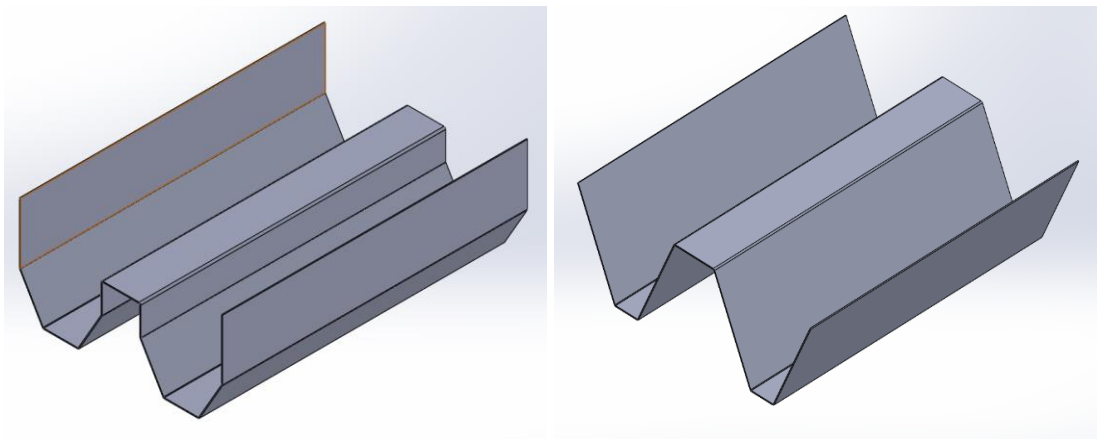
W kesitli profiller bugüne kadar çarpışma kutularında kullanılmamış olan bir profil şeklindedir. Ancak bazı markaların önceki yıllar da tampon sistemlerinin arkasına körük sistemi koyarak çarpışma sırasında meydana gelen enerjilerin bir kısmını

sönümleyebildiklerini bilinmektedir. Bu profile benzer bir sönümlenme sistemini I. K. Yılmazçoban tekerlekli sandalyeler üzerinde 2009 yılında denemiştir [30].

Buradan hareketle W profillerin darbe sönümlenme kabiliyetlerinin mevcut dikdörtgen ve dairesel kesitli sönümleyiciler ile karşılaştırılması enerji sönümlenme kabiliyetleri arasındaki farkı ortaya koyacaktır. Buna bağılı olarak da farklı kesitlerde çarpışma kutuları tasarlanmış ve bu profiller uygulanabilirlik ve üretim gibi bazı kriter ile değerlendirilmiştir. Yapılmış yeni çarpışma kutusu tasarımları Şekil 2.1. ve 2.2.'de verilmiştir.



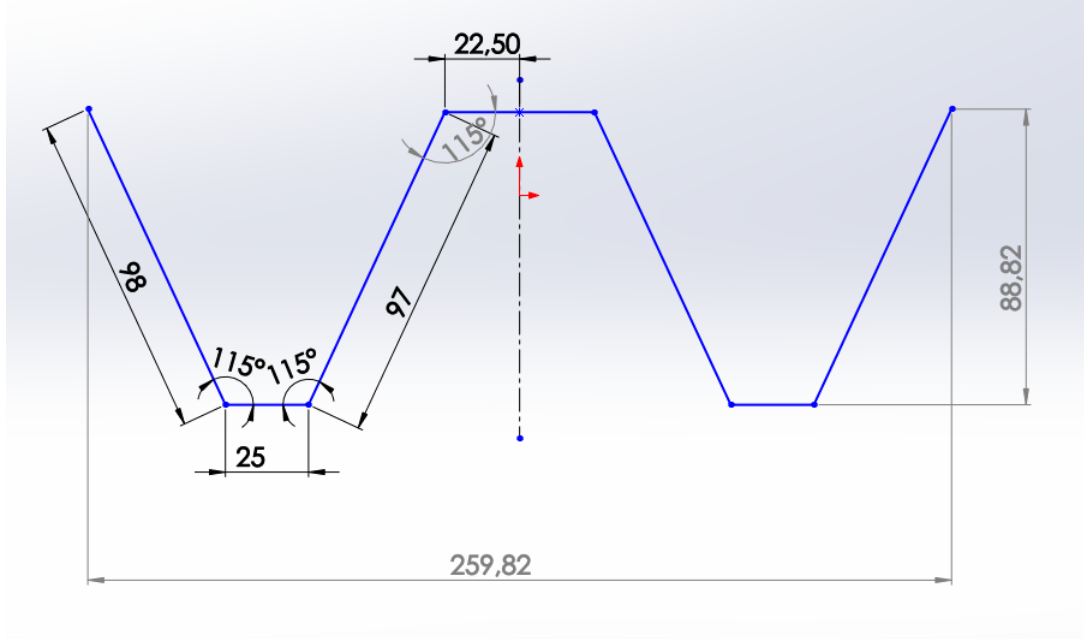
Şekil 2.1. Tasarımları yapılan profil örnekleri



Şekil 2.2. Geliştirilen tasarımlar

Tasarlanan profillerin imalatı gerçekleştirilmek istendiğinde, Abkant CNC büküm makinalarının sınır şartlarından dolayı, son resimde yer alan W profilin ölçüleri iyileştirilmiş (Şekil 2.3.) ve yeniden tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.





Şekil 2.3. İmalatı gerçekleştirilen profilin kesit ölçüleri

### 2.2.2. Numune malzemesi

İncelenen çalışmalar ve yapılan mühendislik hesapları sonrasında;

- Gerekli dayanıma sahip
- Enerji sönümlene kabiliyeti yüksek
- Temini ve imalatı kolay
- Maliyeti düşük ve hafif, gibi kriterlere uygun olarak Tablo 2.1.'de görülen mekanik ve kimyasal özelliklere sahip St-37 çelik kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 2.1. ST-37 Malzemesinin elastik özellikleri

Young Modülü	Akma dayanımı	Çekme dayanımı	Poison oranı
E=205000 MPa	235 MPa	360-510 MPa	0.29

Tablo 2.2. ST-37 Malzemesinin kimyasal özellikleri

Al	Kimyasal Bileşim(%ağırlık)													
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	W	Fe
St 37	0.217	0.001	0.426	0.026	0.022	0.0001	0.064	0.001	0.001	0.001	0.017	0.001	0.003	99.2199

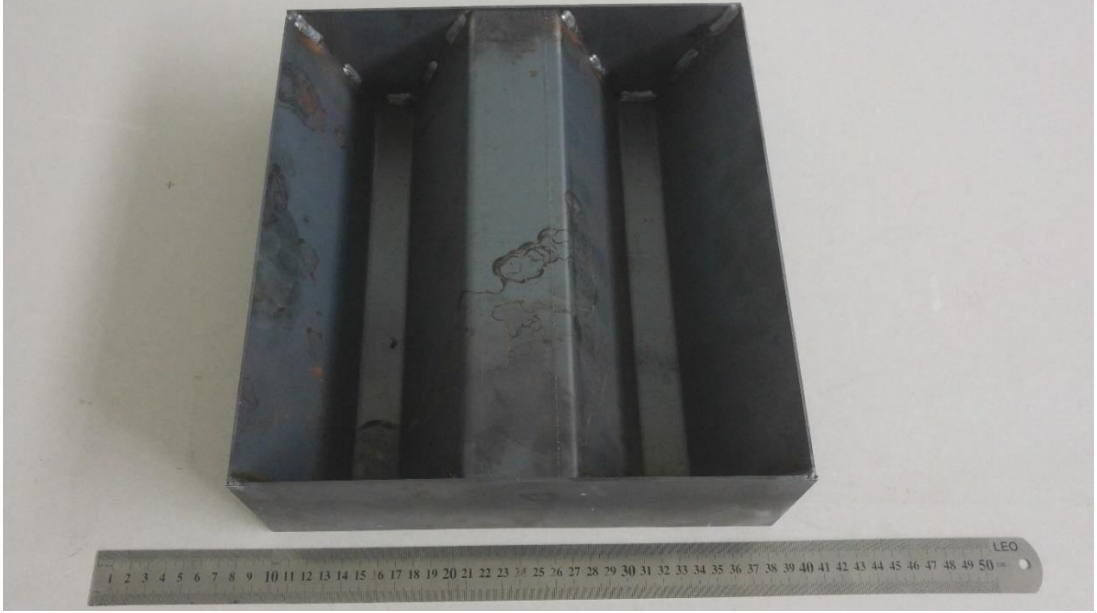
Geometri ve malzemesine karar verilen numuneler için bir aralık tayin etmek maksadıyla 2mm, 1,5mm, 1mm ve 0,8mm sac kalınlıklarına karar verilmiştir. Farklı kalınlıklara sahip numuneler üzerinde testlerin yapılması ile, ilk etapta optimum kalınlık bulunmuş sonrasında daha doğru sonuçlar elde edilmesi açısından 1,2mm sac kalınlığından üretilen numunelerde aynı testlere tabi tutulmuştur. Sonraki çalışmalarda farklı kesit tipleri üzerinde bu kalınlık uygulanarak karşılaştırma yapılacaktır. Numunelerin imalatı Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi CNC lazer kesim ve abkand büküm cihazları ile gerçekleştirilmiştir.



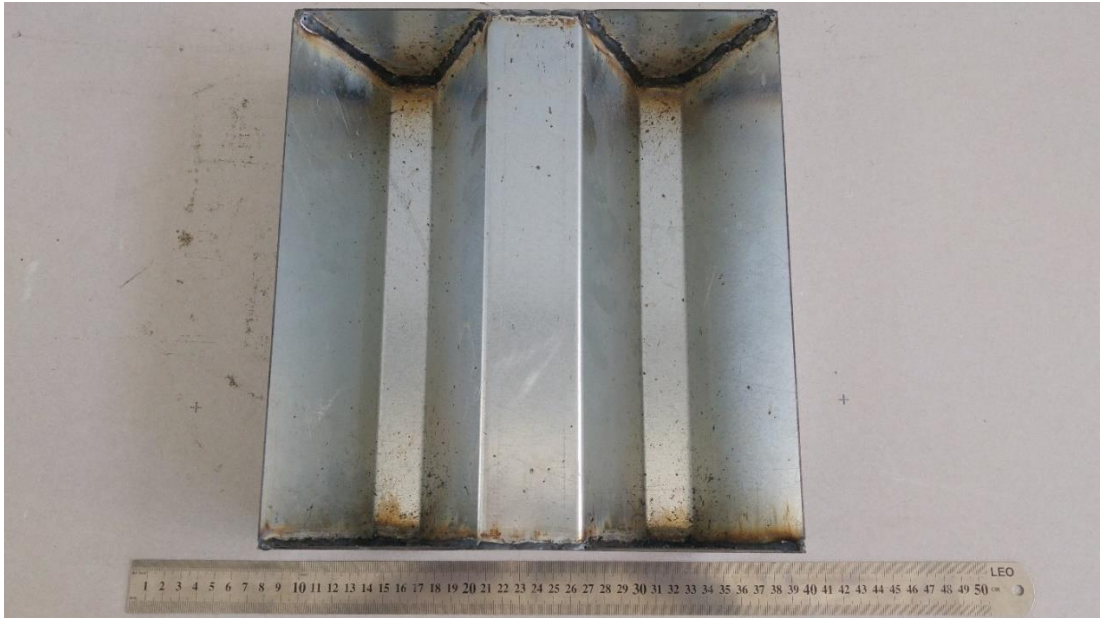
Şekil 2.4. W profil kesitine sahip numunenin abkant tezgahında büküm işlemlerinin gerçekleştirilmesi

St-37 malzemeden üretilen numunelerin bazıları eldeki imkânlardan dolayı galvaniz kaplı St-37 çeliklerden üretilmiştir. Yapılan incelemeler ve araştırmalar sonucunda yapılan kaplama işleminin malzemenin dayanım özelliklerinde ciddi bir değişim gerçekleştirmediği görülmüştür (Şekil 2.5.-2.6.).

Düşürme testi sırasında numunelerin düşey doğrultuda sabit kalmaları ve çarpışmanın sağlıklı gerçekleşmesi açısından profillerin üst ve alt yüzeylerine kapak sacları kaynatılmıştır.



Şekil 2.5. Kaplama olmayan 2mm kalınlığa sahip numune



Şekil 2.6. Galvaniz kaplı 1,5mm kalınlığa sahip numune

### 2.3. Numerik Çalışma

Enerjinin korunumu yasasına göre; belirli bir yükseklikten ilk hızsız düşen bir cismin potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü bilinmektedir. Deney düzeneğinde tablanın yüksekten aşağı düşerken numuneye çarpması anındaki teorik hızının belirlenmesinde aşağıdaki denklemlerden yararlanılmıştır.

Teorik hız:

$$m_{\text{plaka}} \times g \times (h_{\text{strok}} - h_{\text{profil}}) = \frac{1}{2} \times m_{\text{plaka}} \times V_{\text{teorik}}^2$$

$$\cancel{m_{\text{plaka}}} \times g \times (h_{\text{strok}} - h_{\text{profil}}) = \frac{1}{2} \times \cancel{m_{\text{plaka}}} \times V_{\text{teorik}}^2$$

$$g \times (h_{\text{strok}} - h_{\text{profil}}) = \frac{1}{2} \times V_{\text{teorik}}^2$$

$$V_{\text{teorik}}^2 = g \times (h_{\text{strok}} - h_{\text{profil}}) \times 2$$

$$V_{\text{teorik}} = \sqrt{g \times (h_{\text{strok}} - h_{\text{profil}}) \times 2}$$

$$V_{\text{teorik}} = \sqrt{9,81 \times (2,88 - 0,3) \times 2}$$

$$V_{\text{teorik}} = 7,11 \text{ m/s}$$

Yapılan deneyler sonrasında deney düzeneğindeki düşürme plakasının ortalama hızı 6,815 m/s olarak bulunmuştur. Burada teorik ve deneysel hızın farklılığının sebebi; deney düzeneğinden kaynaklanan sürtünme kayıplarının olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerin sönmülediği ve sönmülemeden iletği enerji miktarını hesaplamak için ivme ölçer sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerden elde edilecek verilerin doğruluğunu kıyaslama açısından temel bir hesaba ihtiyaç duyulmuştur. Yine aynı denklemlerden yararlanarak sönmüleyicilerin absorbe ettiği enerji miktarını teorik olarak hesaplayabiliriz.

$$K_{e_{\text{im}}} = \frac{1}{2} \times m_p \times V_{\text{den}}^2$$

$$P_{e_{\text{son}}} = m_p \times g \times h_{s,\text{ort}}$$

$$h_{s,\text{ort}} = \frac{h_{\text{sağ}} + h_{\text{sol}}}{2}$$

$$E_{\text{ab}} = K_{e_{\text{im}}} - P_{e_{\text{son}}}$$

Böylelikle absorbe edilen enerjiyi, tablanın kinetik enerjisinden numunenin potansiyel enerjisini çıkardığımızda teorik olarak bulabiliriz.

## **BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

İmal edilen numunelerin çarpışma testleri, laboratuvar şartları ve maddi imkânlardan dolayı gerçek araç çarpışma testleri şeklinde yapılmamıştır. Bunun yerine üniversitenin laboratuvar imkânlarında mevcut bulunan, düşürme test düzeneği vasıtasıyla testler gerçekleştirilmiştir. Mevcut test düzeneğinden elde edilen veriler deneysel yaklaşım metodu ile analiz edilmiştir.

### **3.1. Serbest Düşme Test Düzeneği**

Test düzeneği, 4 tane silindirik piston üzerine yataklanmış 150kg ağırlığında ki düşme tablası, tablayı manyetik kuvvet ile tutan mıknatıs ve mıknatısın yukarı aşağı hareketini sağlayan bir elektrik motorundan oluşmaktadır. Aynı zaman da düzenek üzerinde tablanın hızını ölçmeye yarayan iki adet hız sensörü ve sensördeki verileri okumaya yarayan bir dijital ekran mevcuttur (Şekil 3.1.).

### **3.2. Çarpışma Kutusu Testleri**

Labaratuvar ortamında gerçekleştirdiğimiz testlerde, deney düzeneğinin çalışma presibi şu şekildedir; Uyguladığı manyetik alan sayesinde mıknatıs, 80x80cm ölçülerindeki düşürme tablasının orta kısmından yapışarak elektrikli vinç yardımıyla yukarıda tutmaktadır. Elektrik panelinin anahtarı kapatılması ile mıknatısın uyguladığı manyetik alan ortadan kalktığından dolayı, düşürme tablası maksimum strok mesafesi olan 2.88m yükseklikten bırakılmaktadır. Düşürme tablası yaklaşık olarak 6,8 m/s hızla numuneye serbest olarak düşmektedir. Üst tablanın profile çarpma esnasındaki hızını ölçecek olan iki adet hız sensörü, araları düşeyde 45cm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Tablanın profile temas ettiği esnadaki hızını, hız göstergesinden okunarak kaydedilmektedir. Tablanın numuneye uyguladığı şok

dalgalarını ölçmesi için ivme sensörü, bal mumu vasıtasıyla veya kaynaklanmış bir somuna vidalanarak parçaya tutturulmuştur.

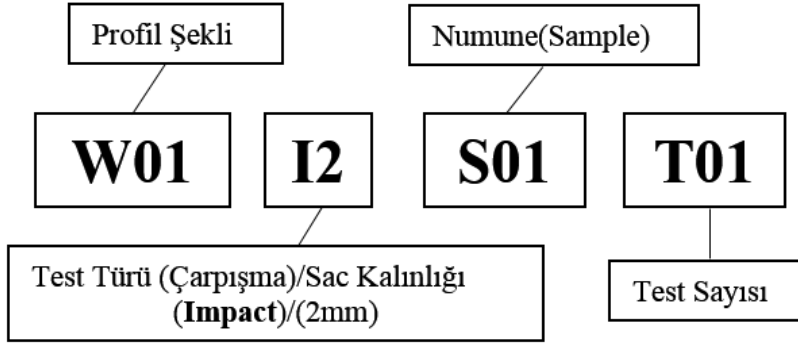


Şekil 3.1. Serbest düşme test düzeneği

Farklı açılarda deneyi kaydetmek üzere üç adet kamera belirlenen noktalara yerleştirilmiştir. Gerekli ölçümler ve kayıtlar yapıldıktan sonra vinç yardımıyla manyetik tutucu, düşen tablaya temas edecek şekilde aşağı indirilmektedir. Daha sonra elektrik panosunun anahtarı açılarak mıknatıs tekrar tablaya manyetik alanla tutturulmaktadır. Tabla yukarı kaldırılarak profil deney düzeneğinden alınmakta ve yeni numune yerleştirilmektedir.

## BÖLÜM 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan deneylerin sonucunda bir aracın önden çarpışması durumunda, çarpışma kutularının ne kadarlık bir deformasyona uğradığı ve ne kadarlık bir enerjiyi sönmülediği incelenecektir. Numunelerin ayırt edilebilmesi için her birine özel bir kod numarası verilmiştir. Şekil 4.1.'de bu kod numaralama sistemi, çarpışma ve basma testleri için ayrıntılı şekilde belirtilmektedir.



Şekil 4.1. Numunelere verilen profil numaralarının açılımı

### 4.1. 2mm Kalınlığındaki Numune

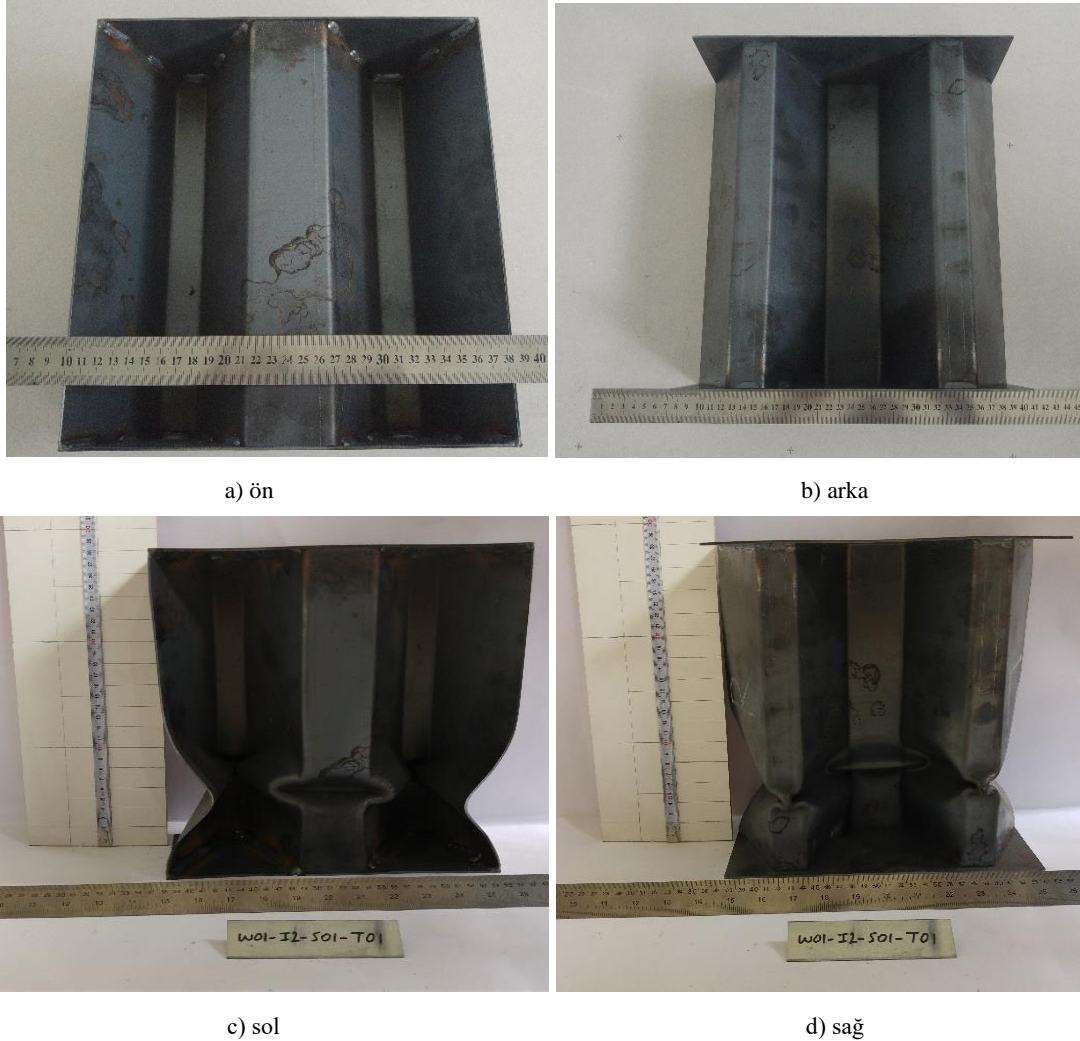
Öncelikle farklı sac kalınlıkları incelenmiş ve buna ekonomik olarak kolayca elde edilebilen 2mm kalınlığındaki St37 malzemedan imal edilmiş çelik W şeklindeki kesit profilden başlanmıştır.

#### 4.1.1. W01-I2-S01-T01

2mm kalınlığa sahip St-37 malzemedan imal edilmiş numunenin çarpışma öncesi durumu Şekil 4.2.'de verilmiştir. Bu numune için yapılan serbest düşürme testi sonrası, sol yüzeyde hafif burkulma görülmüştür. Profilin sağ kolonunda zeminden 69mm yukarıda, sol kolonunda 79mm ve orta kolonunda 75mm yukarıda



deformasyona uğrayarak katlanmaların gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 304mm olan numune boyunun ortalama olarak 279mm'ye düştüğü tespit edilmiştir. Taban ve tepe noktalarında sağ ve sol kolonlar arasındaki mesafenin ise aynı kaldığı saptanmıştır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Çarpışma öncesi ve sonrası 2mm'lik numune (a) Önden görünüm (b) Arkadan görünüm

Çekilen videolar incelendiğinde düşürme plakasının eğimli olarak profile temas ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum ise beklenmeyen ve uniform olmayan hatalara da sebep olabilmektedir. 2mm ve 1,5mm kalınlıktaki numunelerde kalınlığın fazla olması ile birlikte dayanım da çok yüksek olduğu için eğik çarpmanın etkileri pek hissedilmemektedir. Yalnız diğer numunelerde birtakım farklı sonuçların meydana gelmesine sebep olmaktadır.

2mm kalınlıĝa sahip numune ile eğimli tablanın çarpışma anı Şekil 4.3.'de görülürken, İlk temasın üst yüzeyin sol tarafında gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Yavaşlatılmış çekimden tablanın numuneye çarpma anı

2mm kalınlığındaki numunede meydana gelen deformasyonun ve yeterli enerjiyi zamana yayarak sönümleme kabiliyetinin az olduğu tespit edilmiş buna bağlı olarak sac kalınlığının kademeli olarak inceltilmesinin uygun olduğu bu noktada tespit edilmiştir. Numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,815)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3483,316 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{279}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 410,548 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3483,316 - 410,548 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3072,768 \text{ J}$$

2mm kalınlığındaki numunenin deney hızında fazla rijit kaldığı ve istenilen sönümleme etkisini yapmadığı görülmektedir. Numuneden, üzerine gelen darbeyi zamana yayarak ve olabildiğince deforme olarak sönümlemesi beklenilmektedir.

Aksi takdirde numune, enerjiyi aracın taşıyıcı elemanlarına iletecek ve bu noktalarda hasar meydana gelmesine sebebiyet verecektir. Bunun yanında daha tehlikeli olanı ise, rijit elemanın sönümlenmesi gereken şok dalgalarının, sürücü ve yolculara iletilmesi neticesinde, ciddi yaralanma ve hatta ölüm ile sonuçlanabilecek vakaların oluşmasıdır.

## **4.2. 1,5mm Kalınlığındaki Numune**

Sac sektöründe çok kullanılan ve 2mm' nin altında kolayca temin edilebilecek sac kalınlığının 1,5mm olduğu göz önünde bulundurularak, bir sonraki deney için bu kalınlıkta ve aynı ebatlarda başka bir numune hazırlanmıştır.

### **4.2.1. W01-I1.5-S01-T01**

1,5 mm kalınlığa sahip numunenin çarpışma öncesi ve sonrası durumu Şekil 4.4.'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen düşürme testi sonrası, sol ve sağ yüzeylerde burkulma gerçekleşmiştir. Sol yüzeyde gerçekleşen burkulmanın sağ yüzeydekinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. İlk oluşan katlanma tabana ulaştıktan sonra, ikinci katlanmanın sağ kolonda tabandan 33mm yükseklikte olduğu görülmüş ve sol kolonda ise 29mm yükseklikte deformasyonun başladığı gözlemlenmiştir. Sol kolonda gerçekleşen burkulmanın sağ kolondakinden daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Numunenin tepe noktasından sağ sütunda 14mm, sol sütunda 16mm ve orta sütunda ise 15mm aşağıda plastik deformasyon gözlemlenmiştir. Sağ sütunun yüksekliği 300mm'den 247mm'ye düştüğü, sol sütunun yüksekliğinin ise 300mm'den 243mm'ye düştüğü saptanmıştır. Bu farklılığın düşürme plakasının aşağı doğru hareket ederken hafif olarak bir eğime sahip olmasından kaynaklandığını belirtmek gerekmektedir (bkz.Şekil 4.3.). Nihai olarak, sütunların arasındaki mesafe alt ve üst noktalarda ölçülerek aradaki farkın 19mm olduğu ölçülmüştür (Şekil 4.4.).



a) ön

b) arka



c) sol

d) sağ

Şekil 4.4. (a) Çarpışma öncesi (b) Çarpışma sonrası (c) Soldan görünüm (d) Sağdan görünüm

Çekilen videolar incelendiğinde diğer testlerde olduğu gibi düşürme plakasının eğimli olarak numuneye temas ettiği görülmektedir. Bu numune yine 2mm kalınlığındaki numune gibi fazla rijit olduğundan eğik çarpışma etkisi hissedilmemektedir. İlk temasın ise üst yüzeyin sol tarafında gerçekleştiği durum Şekil 4.5.'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Tablanın numuneye açıyla çarptığı an ve temas anı

1,5mm et kalınlığına sahip numunenin serbest düşme testi yapılmasından sonra ortaya çıkan deformasyon miktarının 2mm kalınlığa sahip numunede olduğu gibi hem görsel hem de hesaplanan enerjiler açısından yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Burada deformasyon sonucu numune boyunda oluşan değişiklik göz önüne alınarak yapılan hesaplamalar aşağıda belirtilmektedir. Deney sonrasında hız sensöründen, tablanın numuneye çarpma hızı 6,815 m/s okunmuştur.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,815)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3483,316 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{247}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 363,460 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3483,316 - 363,460 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3119,856 \text{ J}$$

Yapılan hesaplama sonucunda numunenin absorbe ettiği enerji miktarı **3119,856 J** olarak bulunmuştur. Bu deneyde ivme sensörünün şok dalgalarından gelen veriyi hatalı okumasından dolayı, teorik olarak hesaplanan absorbe edilen enerjiyle kıyaslaması yapılamamıştır. Bu enerji ne kadar uzun sürede ve mesafede absorbe edilmesi sağlanırsa o kadar verim iyi olacaktır. Aksi takdirde numunenin az bir kısmı deforme olduğu durumda, deforme olmayan kısmın sönümlemesi gereken enerji,

önce araç şasisini istenmeyen bir biçimde zarar verecek, akabinde ise sürücü ve yolculara bu fazla enerji miktarı aynen iletilecektir. Bu da arzu edilmeyen bir durumu ortaya çıkartacaktır.

### **4.3. 1mm Kalınlığındaki Numune**

Gerçekleştirilen deneyler sonucu 1,5mm kalınlığından sonra yine kolayca temin edilecek 1mm kalınlığında St37 sacın kullanılmasına karar verilmiştir.

#### **4.3.1. W01-I1-S01-T01**

1 mm kalınlığa sahip ilk numune için yine geometrik ebatlar ve malzeme aynı tutulmuş sadece kalınlık 1,5 mm den 1 mm'ye indirilmiştir.

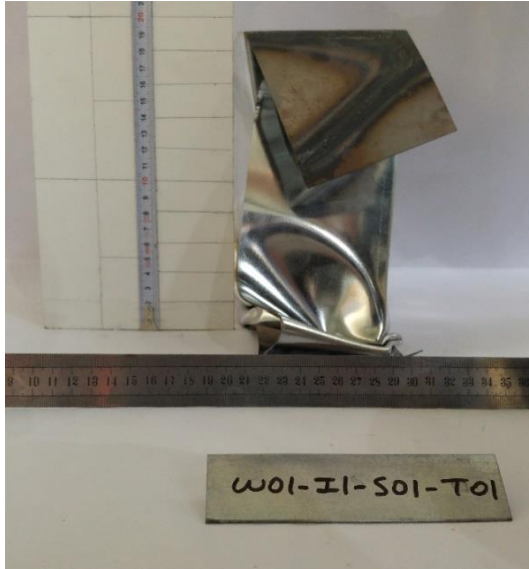
Gerçekleştirilen düşürme testi sonrası, sol ve sağ yüzeylerde burkulma gerçekleşmiştir. Sol yüzeyde gerçekleşen burkulmanın sağ yüzeydekinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. İlk oluşan katlanma tabana ulaştıktan sonra ikinci katlanmanın sağ kolonda tabandan 33mm yükseklikte sol kolonda ise 29mm yükseklikte başladığı saptanmıştır. Plakanın eğimli çarpmasının etkileri artık 1mm kalınlıktaki numunelerden itibaren anlaşılmaya başlanmış ve heterojen deformasyonlar oluşmuştur.

Sol kolonda gerçekleşen burkulmanın sağ kolondakinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin tepe noktasından sağ sütunda 14 mm, sol sütunda ise 16 mm, orta sütunda ise 15mm aşağıda plastik deformasyon görülmüştür. Sağ sütunun yüksekliği 300mm'den 247mm'ye düştüğü, sol sütunun yüksekliğinin ise 300mm'den 243mm'ye düştüğü saptanmıştır. Sütunların arasındaki mesafe alt ve üst noktalarda ölçülerek aradaki fark 19mm bulunmuştur. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.6.'da verilmiştir.

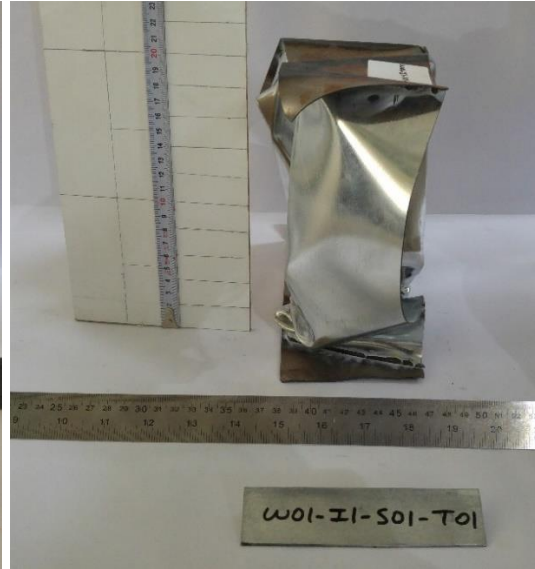


a) ön

b) arka



c) sol



d) sağ

Şekil 4.6. W01-II-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu

Test sonucunda numunenin sol kolonunda aşırı deformasyon gözlemlenmiştir. Malzemenin kesme gerilmesine maruz kalmasıyla numunenin üst tabakasının x eksenine doğrultusunda hareket gerçekleştiği belirlenmiştir. Sol sütun üç noktadan katlanma eğilimi göstermiştir. Tabandan başlayarak ilk katlanma düzgün ve ön görüldüğü üzere gerçekleşmiştir. İkinci katlanma içe doğru tabana yakın; üçüncü katlanma ise dışa doğru ve numunenin üst noktasından 56mm aşağıda gerçekleşmiştir. Sağ sütunda ise katlanma yine üç noktadan gerçekleşirken tabandan tepeye doğru ilk katlanma düzgün gerçekleşmiş ve ağırlıklı olarak basma gerilmesinin etkisi saptanmıştır. İkinci katlanma ise kayma, burulma ve basma

gerilmeleri etkisi altında gerçekleşmiştir. İkinci katlanmanın Y ekseninde saat yönünde burulmaya maruz kalmasıyla sağ kolonun sağ yüzeyinde kayma ve basma gerilmelerinin de etkisiyle dışa doğru burkulma ve aynı kolonun sol yüzeyinde katlanmanın devam ettiği görülmektedir. Üçüncü katlanma ise sağ sütunun sol yüzeyinde gerçekleşmiştir. Orta sütunda kayma ve burulma gerilmelerinin etkisi bariz bir şekilde görülmüş, ilk katlanmanın ardından sütunun sol yüzeyinde burkulma saptanmıştır (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Tablanın profile eğik olarak çarptığı an

Deneysel yapılan numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,790)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3457,807 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{243 + 247}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 360,517 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3457,807 - 360,517 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3097,29 \text{ J}$$

1 mm kalınlıktaki numune ile yapılan ilk test sonrasında, görüntü kayıtları ve deforme olan numune incelendiğinde, bu kalınlığın istenilen sönümlenme etkisine yaklaştığı görülmektedir. Bu deneyde ivme ölçer sensörü verileri hatalı okuduğu



için hesaplanan enerji miktarıyla kıyaslama yapılamamıştır. Bu kalınlık değeri için daha sağlıklı sonuçlar elde etmek ve numunenin davranışını daha iyi incelemek amacıyla 1mm kalınlığa sahip numuneler üzerinde test tekrarlanarak bu kalınlık üzerine yoğunlaşmıştır.

#### 4.3.2. W01-I1-S01-T02

1mm kalınlığa sahip 2. numune ile çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Bu test öncesinde numunenin test cihazına konumlandırılması, tablanın yaptığı açılı çarpmadan kaynaklı hatayı en aza düşürmek amacıyla 90° çevrilerek yeniden konumlandırılmıştır (Şekil 4.8.(a)). Yapılan deney sonrasında numune incelendiğinde numunenin alt yüzeyinin hemen üzerinde iki adet katlanma gerçekleştiği görülmektedir. İkinci katın 62mm üzerinde ise üçüncü katlanmanın başlangıç belirtileri görülmektedir numunede oluşan katlanmalar haricinde sol ve sağ yüzeylerinde neredeyse simetrik bir burkulma fark edilmiştir. Fakat sol yüzeydeki burkulmanın daha fazla olduğu ve numunenin sağ ve sol yüzeyleri ölçüldüğünde ise boyları arasında 3mm'lik bir fark oluşmuştur. Katlanmalar numunenin alt yüzeyinin hemen üzerinde gerçekleşmiştir. İkinci katın 62mm üzerinde ise üçüncü katlanmanın başlangıç belirtileri görülmektedir. Numunenin arka yüzü incelendiğinde ise sağ ve sol sütunlarının alt tarafta 18mm birbirine yaklaştığı görülmekte ve bu daralma numunenin üst noktasından 34mm aşağısına kadar azalarak devam etmektedir. Bu noktadan sonra ise her hangi bir daralma oluşmamaktadır. Fakat sağ ve sol sütunda, üst yüzeyin hemen altında gerçekleşen plastik deformasyonlar bu bölgede de bir katlanmanın başladığını göstermektedir. Deneye tabi tutulan numunenin boyunun 300mm'den 199mm'ye düştüğü saptanmıştır.

Test görüntüleri incelendiğinde düşürme levhasının numunenin sol tarafına erken teması sonucunda ilk darbeyi bu yüzeyin karşıladığı anlaşılmaktadır. Numunenin sağa doğru eğilme gerilmesi altında kaldığı orta sütundaki katlanmalardan ve yan yüzeylerdeki burkulmalardan da belli olmaktadır (Şekil 4.8.).

Bu numunenin absorbe ettiği enerji miktarı aşağıda belirtilmiştir.

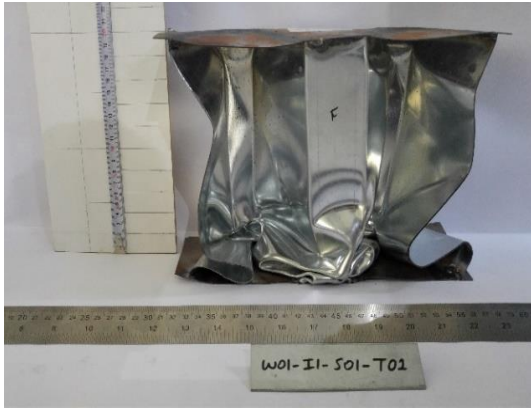
$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,827)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3495,594 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{199}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 292,828 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3495,594 - 292,828 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3202,766 \text{ J}$$



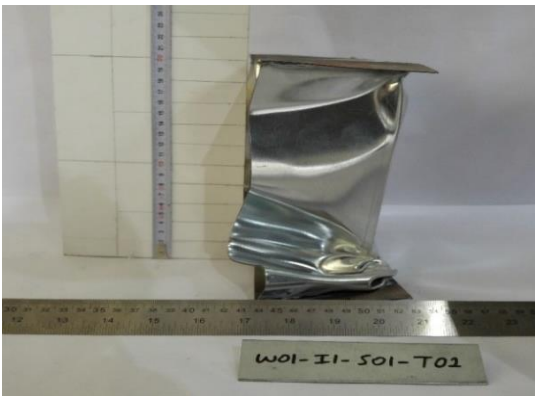
(a)



a) ön



b) arka



c) sol

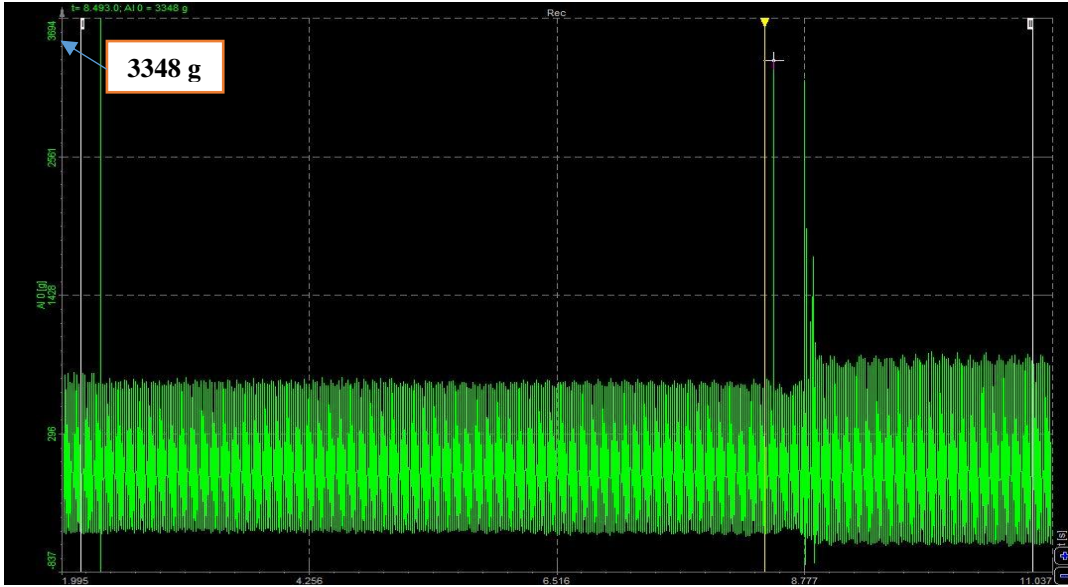


d) sağ

Şekil 4.8. (a) Numunenin 90 derece döndürülerek yeniden konumlandırılması ve W01-II-S01-T02 kodlu numune ait çarpışma sonrası fotoğraflar

### 4.3.3. W01-I1-S01-T03

1mm kalınlığa sahip 3. numuneye ivmeölçer sensörü takılarak çarpışma testi gerçekteşirilmıştir. Çarpışma anında ki şok ivmesini ölçebilmek amacıyla kullanılan ivme sensörü, bundan sonra ki deneylerde de kullanılmıştır. İvme sensöründen alınan veriler şekil 4.9.'da verilmiştir. Grafikten okunan değerlere göre ilk çarpma anında ki ivme (şok ivmesi) 3348 g olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda düşürme cihazında bulunan hız sensörleri ile levhanın çarpma anında ki yaklaşık hızı 6,809 m/s olarak ölçülmüştür (şekil 4.10.).



şekil 4.9. İvme sensöründen alınan grafik



şekil 4.10. Tablanın numuneye çarpma esnasında ki yaklaşık hızı

Bu deney sonucunda W01-I1-S01-T02’de gözlemlenen eğilmeden daha az bir eğilme söz konusudur. Numunede oluşan iki adet katlanma alt yüzeyin hemen üzerinde, ardışık ve aynı doğrultuda gerçekleştiği görülmüştür. Sağ ve sol yüzeylerde oluşan burkulmalar ikinci katlanmadan sonra değişiklik göstermektedir. Sol yüzey içe doğru sağ yüzey ise dışa doğru burkulmuştur. Orta sütunun ön yüzeyinde ise katlanmalar dışında her hangi bir plastik deformasyon gerçekleşmediği görülmektedir. Orta sütunun sağ ve sol yüzeylerinde üst yüzeyin 86 mm altından ikinci katlanmaya kadar olan aralıkta iki yüzeyin de içe doğru burkulduğu saptanmıştır. Numunenin arka yüzeyleri incelendiğinde ise sağ sütunun ekseninde her hangi bir değişiklik olmazken sol sütunun ekseni sağa doğru kaydığı fark edilmiştir. Sağ ve sol sütunların tepe noktasından 168mm aşağıda birbirine 18mm’ yaklaştığı belirlenmiştir. Bu daralma üst yüzeyin 68mm altına kadar azalarak devam etmekte ve bu noktadan sonra sütunlar arasında bir daralma görülmemektedir. Sol sütunun tepe noktasının hemen altında çok az da olsa bir burkulma gerçekleşmiştir. Numune boyu 300mm’den sağ tarafta 199mm’ye sol tarafta ise 201mm’ye düştüğü Şekil 4.11.’de belirtilmektedir.

Bu numunenin sönmülediği enerji miktarının hesaplanması aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,815)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3483,316 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{199 + 201}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 294,3 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3483,316 - 294,3 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3189,016 \text{ J}$$

Deney düzeneğindeki hız sensörlerinin yerlerinin değiştirildiği deney sonrasında fark edilerek bu konuda her hangi bir düzeltme yapılamamıştır. Sensörlerin aralarındaki mesafe olması gerekenden kısa olduğu için okunan hız değeri teorik hız değerinden büyüktür. Bu sebeple, hesaplanan enerji miktarı hatalı bir değer olup gerçeği yansıtmamaktadır.

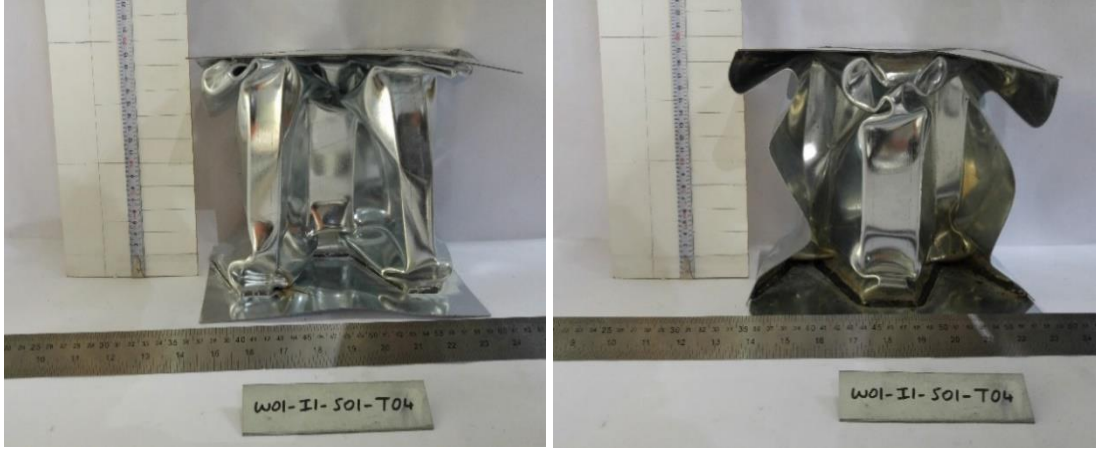


Şekil 4.11. W01-I1-S01-T03 nolu numunenin çarpışma sonunda ki ölçüleri

#### 4.3.4. W01-I1-S01-T04

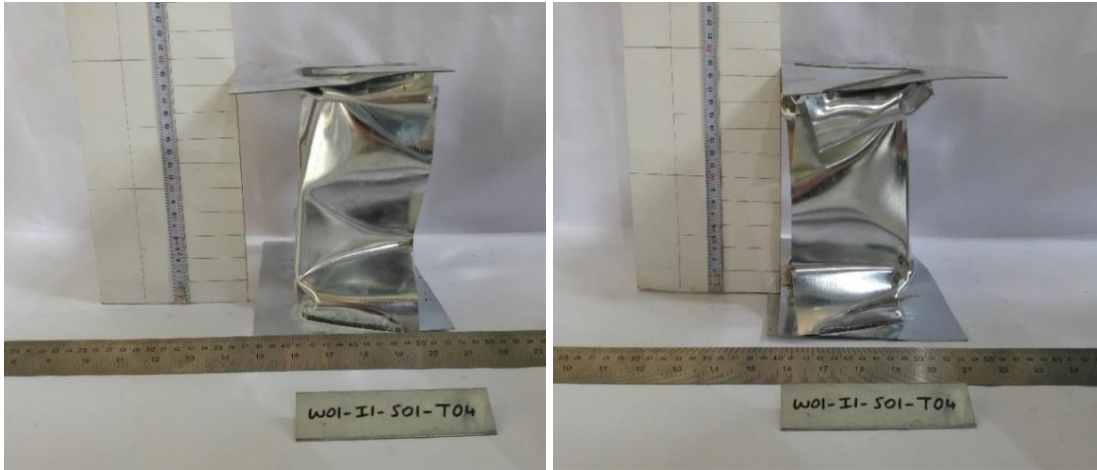
1mm kalınlığa sahip 4. numune ile çarpışma testi gerçekleştirildi. Deney sonrası numune incelendiğinde katlanmaların üst ve alt yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştiği görülmektedir. Üst yüzeyin hemen altında bir adet, alt yüzeyin 14mm üzerinde ise bir adet katlanma belirlenmiştir. Orta sütunda ise katlanma harici herhangi bir deformasyon saptanmamıştır. Numunenin sağ ve sol yüzeylerindeki burkulmalar birbirine çok yakın olmakla beraber üst yüzeyin sağ tarafında yüzeyin geri kalanına nazaran daha fazla deformasyon gerçekleşmiştir. Buradaki kaymalar incelendiğinde sağ sütunun sol sütuna göre daha fazla kendi ekseninden saptığı görülmektedir. Numunenin arka tarafı incelendiğinde ise üst yüzeye yakın gerçekleşen katlanmaların içe doğru kayarak sağ ve sol sütunu birbirine 36mm yaklaştırdığı fark edilmiştir. Bu daralma alt yüzeye doğru azalırken alt yüzeyden

4mm yukarıda (katlanmanın gerçekleştiği bölümde) 6mm'ye ulaşmaktadır. Numune boyu 300mm'den sağ tarafta 189mm'ye sol tarafta ise 184mm'ye düşmüştür. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



a) ön

b) arka



c) sol

d) sağ

Şekil 4.12. W01-II-S01-T04 kodlu numunenin çarpışma sonrası ölçüleri

Sensörlerden okunan değerlere göre, tablanın numuneye çarptığı andaki hızı 6,811 m/s, şok ivmesi ise 1886,3 g'dir (Şekil 4.13.).



(a)



(b)

Şekil 4.13. (a) İvme sensörünün grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s)

Testi gerçekleştirilmiş olan numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,811)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3479,229 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{189 + 184}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 274,434 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3479,229 - 274,434 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3204,795 \text{ J}$$

#### 4.3.5. W01-I1-S01-T05

1mm kalınlığa sahip 5. numune ile çarpışma testi gerçekleştirildi. Test sonrası numune incelendiğinde alt yüzeyin hemen üzerinde iki adet katlanma

gerçekleşmiştir. Üst yüzeyin hemen altında ise iki sütunda da katlanma başlangıcı görülmektedir. Fakat sağ sütundaki plastik deformasyon sol sütundakine göre daha fazladır. Orta sütunda ise katlanma haricinde oluşan plastik deformasyonlar incelendiğinde sadece ikinci katlanmadan üst yüzeye doğru orta sütunun sol kenarında 49mm boyunca devam eden bir burkulma oluşmuştur. Numunenin sağ ve sol yüzeylerinde katlanmaların bittiği noktadan üst yüzeye kadar olan kısımda oluşan burkulmalar incelendiğinde ise, neredeyse simetrik bir yapı göze çarpmaktadır. Simetriyi bozan tek deformasyon sağ yüzeyde, üst yüzeyin 37mm altında başlamaktadır. Bu noktada burkulma sonucu oluşan şerit izlendiğinde bu farkın, yukarıda bahsedilen sağ ve sol sütunlar arasındaki plastik deformasyon farklılığı sonucu oluştuğu anlaşılmaktadır. Numunenin arka yüzeyi incelendiğinde ise ilk katlanmanın düzgün gerçekleşir. Fakat ikinci katlanmanın bitim noktasında sağ sütunun eğilme gerilmesi altında dışa doğru hareket ettiği ve ekseninden uzaklaştığı görülmektedir. Sol sütunda ise bu sapmanın çok küçük olduğu saptanmıştır. Bu nedenlerden dolayı sütunlar arasındaki mesafe ikinci katlanmadan sonra 28mm kadar artmıştır. Bu artış üst yüzeye doğru azalarak devam etmektedir. Numune boyu 300mm'den sağ tarafta 209mm'ye sol tarafta ise 211mm'ye düştüğü saptanmıştır (Şekil 4.14.).

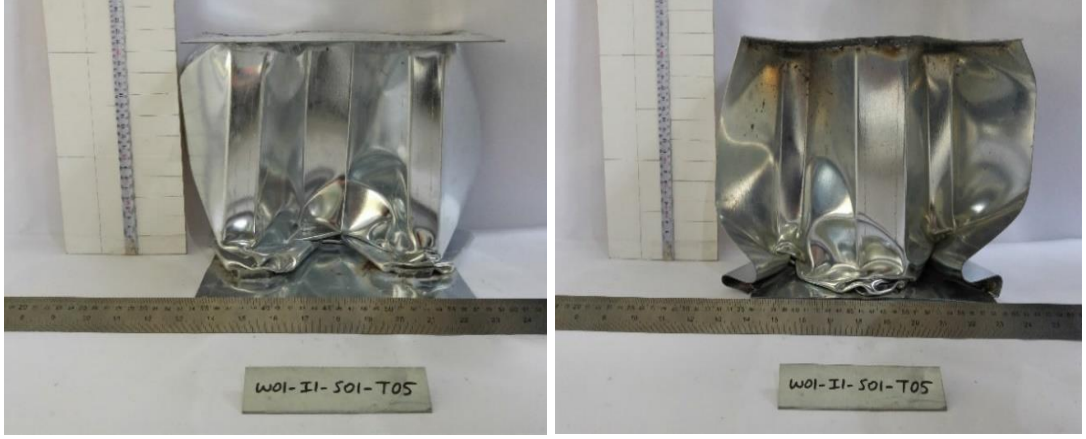
Deney sırasında tablanın numuneye çarptığı anda ki hızı ve o anda oluşan şok ivmesi Şekil 4.15.'de verilmiştir. Sensörlerden alınan değerlere göre tablanın numuneye çarptığı anda ki hızı 6,81 m/s, o anda ki şok ivmesi ise 3029,9 g'dir. Numunenin sönmlediği enerji miktarı ise aşağıda hesaplanmıştır. Hesaplanan teorik değerle, ivme sensöründen ölçülen değer birbiriyle neredeyse örtüşmekte olduğu görülmüştür.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,814)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3482,295 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{209 + 211}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 309,015 \text{ J}$$

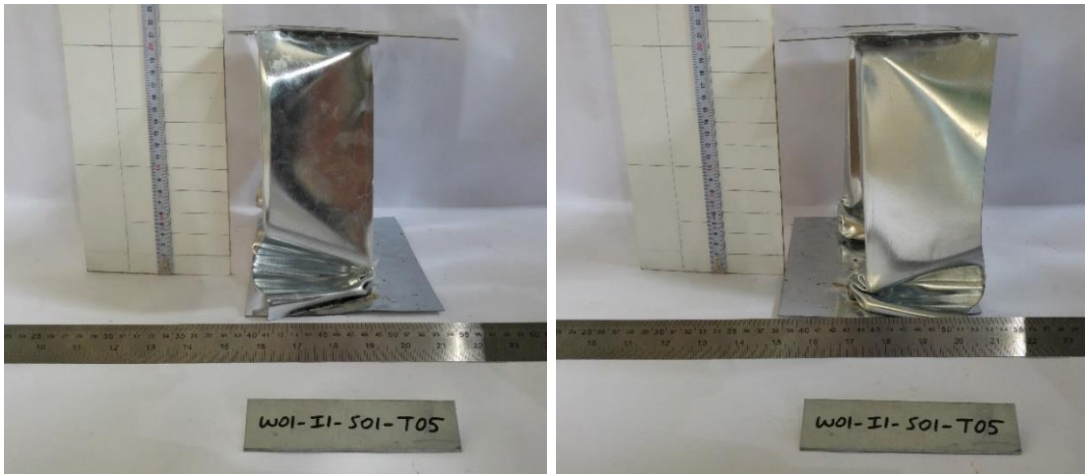
$$E_{ab} = 3482,295 - 309,015 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3173,28 \text{ J}$$





a) ön

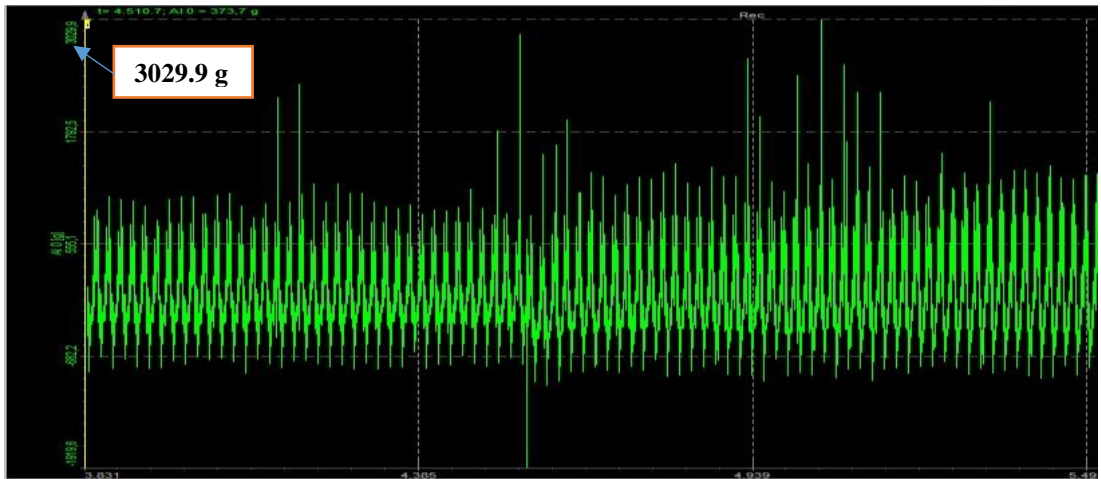
b) arka



c) sol

d) sağ

Şekil 4.14. W01-II-501-T05 kodlu numunenin çarpışma testi sonunda ki durumu



(a)

Şekil 4.15. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s)



(b)

Şekil 4.15. (Devamı)

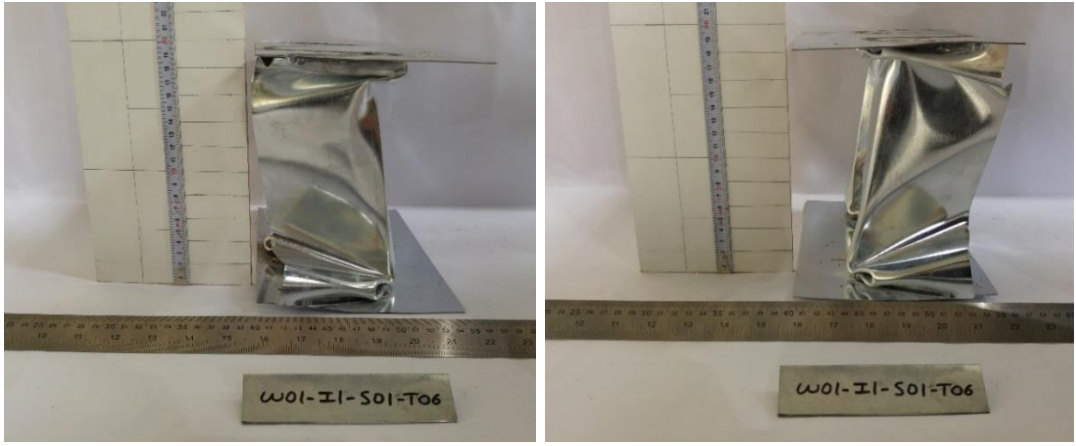
#### 4.3.6. W01-I1-S01-T06

1mm kalınlığa sahip 6. numune ile çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası numune incelendiğinde numunede iki adet katlanma görülmektedir. Bu katlanmalar alt yüzeyin hemen üzerinde ve st yüzeyin hemen altında gerçekleşmiştir. Alt yüzeyin hemen üzerindeki katlanmalar  sütunda da tamamlanmıştır. st yüzeyin hemen altındaki katlanmalar ise sağ ve sol sütunda bu katlanmaların tamamlandığı fakat orta sütunda tam katlanma gerçekleşmediği saptanmıştır. Numunenin arka yüzleri incelendiğinde ise alt yüzeye yakın gerçekleşen katlanmaların düzgün gerçekleştiği ve bu bölgede ikinci katlanma belirtileri gözlenmiştir. st yüzeyin hemen alt gerçekleşen katlanmalarda ise ilk katlanma sonrası sağ ve sol sütunların sağa doğru kaydığı fark edilmiştir. Sütunlarda, burulma gerilmesi sonucu oluşan herhangi bir plastik deformasyon oluşmamıştır. Fakat eğilme gerilmesinin etkileri sağ ve sol sütunda kendini belli etmektedir. Sol sütun sağ sütuna göre daha fazla eğilmiş ve sütunlar arasındaki mesafenin daralmasına sebebiyet vermiştir. Sütunlar arası mesafe st yüzeyin hemen altındaki katlanmadan sonra 18mm'ye kadar azalmıştır. Fakat bu azalma alt yüzeyin hemen üzerinde oluşan katlanmaya doğru yok olmaktadır. Test sonrası numune boyu sağ tarafta 300mm'den 187mm'ye, sol tarafta ise 300mm'den 185mm'ye dşmştir (Şekil 4.16.).



a) ön

b) arka

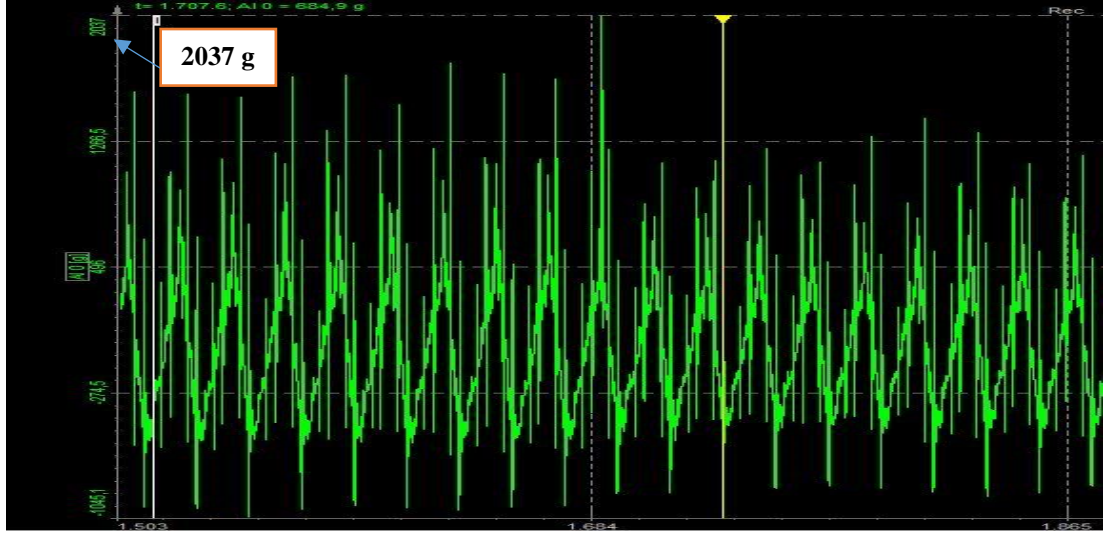


c) sol

d) sağ

Şekil 4.16. W01-II-S01-T06 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu

Sensörlerden okunan değerler Şekil 4.17.'de verilmiştir. İvme sensöründen okunan değer veri kirliliğinden dolayı 2037 g olup, grafikten de belli olduğu üzere çok sağlıklı bir ölçüm yapılamamıştır. Hız sensöründen okunan tablanın çarpma anında ki hızı ise 6,834 m/s dir.



(a)



(b)

Şekil 4.17. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s)

Testi gerçekleştirilmiş olan numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

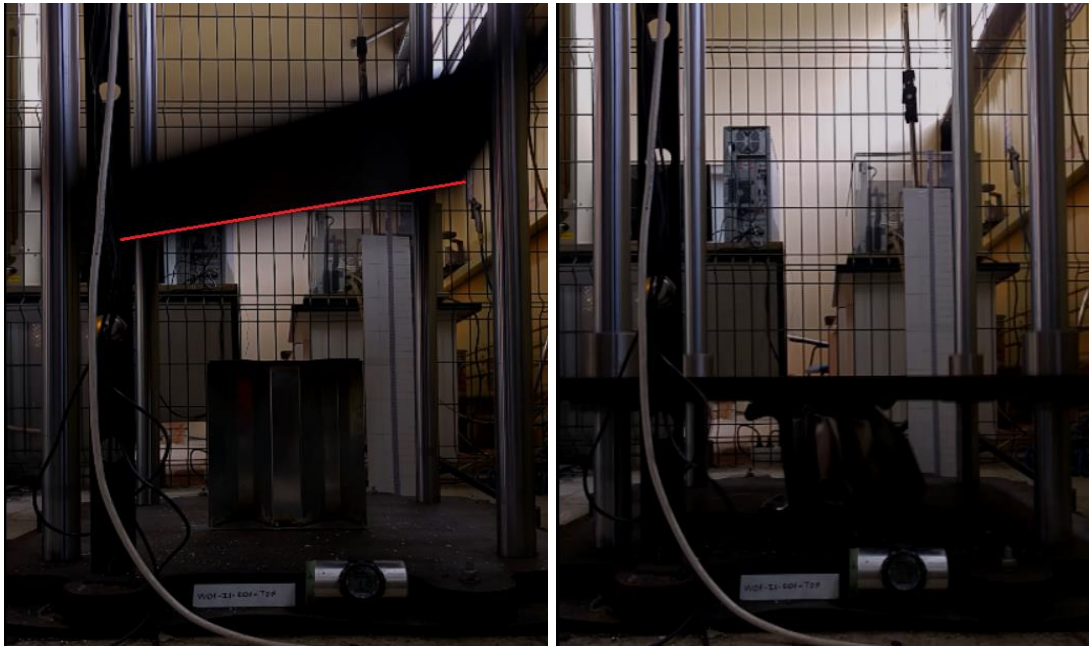
$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,834)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3482,767 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{187 + 185}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 273,699 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3482,767 - 273,699 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3209,068 \text{ J}$$

#### 4.3.7. W01-I1-S01-T07

1mm kalınlığa sahip 7. numune ile çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen dışurma testi sonucunda deforme olan numunenin sütünleri incelendiğinde sağ ve sol sütünlerde, st yüzeyin hemen altında iki adet, alt yüzeyin hemen üstünde ise bir adet katlanma meydana gelmiştir. Orta sütün incelendiğinde ise st yüzeyin hemen altında bir adet, alt yüzeyin hemen üstünde ise bir adet olmak üzere iki katlanma oluşmuştur. Numunenin alt ve st yüzeyleri kıyaslanırsa numunenin burulma momenti altında plastik deformasyona uğradığı görülmektedir. Burulma gerilmesinden kaynaklı orta sütunda her iki katlanmadan sonra oluşan deformasyonlar oluşmuştur. Orta sütunun alt tarafında oluşan katlanma, bu sütunun sağ ve sol yüzeyleri sağ tarafa burkulmasından dolayı orta sütunun alt noktasının ekseninden sağa kaydığı belirlenmiştir. Yan yüzeylerde oluşan burkulmalar incelendiğinde ise st yüzeyin hemen altında gerçekleşen katlanmaların hizasında ki burkulmaların içe doğru ve simetrik olarak gerçekleşmiştir. Fakat alt yüzeyin hemen üstünde gerçekleşen katlanmaların çizgilerini takip eden burkulmalar incelendiğinde, tablanın çarpma açısından kaynaklı sağ yüzeyin dışa, sol yüzeyin içe doğru burkulduğu görülmektedir (şekil 4.18.).



şekil 4.18. Tablanın numuneye çarpmadan önce ve sonraki halleri

Numunenin arka yüzü incelendiğinde ise sağ ve sol sütunda katlanmalar haricinde plastik deformasyon saptanmamıştır. Sol sütun alt tarafta ekseninden 14mm sağa, üst tarafta ise ekseninden 18mm sağa kaymıştır. Sağ sütun ise alt tarafta ekseninden 19mm sağa, üst tarafta ise ekseninden 29mm sola kaymıştır. Sütunlar arasındaki mesafe alt noktada 5mm azalırken, üst noktada ise 78mm azalmıştır. Test sonrası numune boyu sağ tarafta 300mm'den 181mm'ye, sol tarafta ise 300mm'den 182mm'ye düşmüştür (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. W01-II-S01-T07 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Serbest düşme testinde tablanın numuneye çarptığı anda ki hızı 6,825 m/s, o anda ki ivmesi ise sistemdeki hatalar sebebiyle 1700.4 g olarak ölçülmüştür (Şekil 4.20.).



(a)



(b)

Şekil 4.20. (a) İvme sensörü grafiği (b) Hız sensöründen okunan değer (m/s)

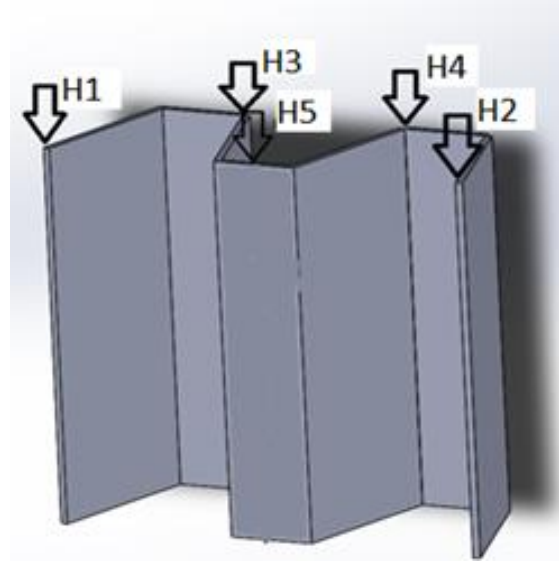
Çarpışma esnasında numunenin sönmülediği enerji miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,825)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3493,547 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{182 + 182}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 267,077 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3493,547 - 267,077 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3226,47 \text{ J}$$

Yapılan testler neticesinde W01-II-S01 kapsamındaki T01-T07 yedi adet numune sonuçlarının daha kolay bir şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm sonuçlar Tablo 4.1.'de verilmiştir. Şekil 4.21.'de ise tablolarda verilen H(mm) değerlerinin numunenin hangi kısımlarından alındığı belirtilmiştir.



Şekil 4.21. Tablolarda verilen H (mm) ölçü değerlerinin alındığı kısımlar

Tablo 4.1. W01 kesitli 300mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W01-II.0-S01-T01	300	192	190	191	190	181	188.8
W01-II.0-S01-T02	300	200	195	197	190	196	195.6
W01-II.0-S01-T03	300	150	160	150	150	165	155.0
W01-II.0-S01-T04	300	175	186	185	190	187	184.6
W01-II.0-S01-T05	300	210	210	203	206	210	207.8
W01-II.0-S01-T06	300	180	185	182	183	186	183.2
W01-II.0-S01-T07	300	182	180	175	180	180	179.4

#### 4.3.8. W01-II-S02-T(01-07)

1mm sac kalınlığına sahip numune ile yapılan deneylerin sonucunda istenilen sonuçlara yaklaşıldığı için boy ölçüsünde değişikliğe gidilmesinin daha isabetli olacağı düşünüldü. Bundan dolayı 300mm olan numune boyu 250mm'ye düşülerek elde edilen deney sonuçları incelenmiştir.

Bu başlık altında incelenecek W01-II-S02 kapsamında 7 adet T01-T07 arasındaki numunelerden birinci çarpışma-kutusunun detaylı incelemesi yapılmıştır. Diğer numunelerin şok enerjisini sönmleme davranışları benzer biçimde olduğundan bu



çarpışma kutularına ait sonuçlar (diğer altı adet numune sonuçları) Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Nümunenin darbe kuvveti sonrası ideal bir şekilde plastik deformasyona uğradığı görüldü. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.22.'de verilmiştir.



Şekil 4.22. W01-II-S02-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Tablanın hafif eğik düşmesi sonucu sağ üst ve sol alt kısım ilk darbeyi aldığından dolayı nümune kesme kuvvetine maruz kalarak, orta kısımdaki yüzeyler sola doğru bir burkulma gerçekleşmiştir. Tabana yakın olan alt kısımdaki yüzeylerde dışa doğru bir burkulma meydana gelmiş, sol kolonun üst kısmı stabil olarak iki kere katlanırken diğer sütun biraz daha düzensiz katlandığı görülmüştür. Alt tarafta ise iki kolondada dışa doğru kayma gerilmesi tesbit edilmiştir. Numunenin orta kolonu ise yarıdan katlanarak 250mm'den 116mm'ye düşmüştür. Sağ sütunun yüksekliği 250mm'den 100mm'ye düştüğü, sol sütunun yüksekliğinin ise 250mm'den 114mm'ye düştüğü saptanmıştır.

Deneyi yapılan numunenin sönümlediği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,837)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3505,845 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{116 + 114}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 169,222 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3505,845 - 169,222 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3336,623 \text{ J}$$

Tablo 4.2. W01 kesitli 250mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W01-II.0-S02-T01	250	114	116	95	100	116	108.2
W01-II.0-S02-T02	250	122	120	122	120	120	120.8
W01-II.0-S02-T03	250	100	115	110	114	115	110.8
W01-II.0-S02-T04	250	122	129	121	122	125	123.8
W01-II.0-S02-T05	250	111	88	109	105	110	104.6
W01-II.0-S02-T06	250	125	92	126	127	123	118.6
W01-II.0-S02-T07	250	83	90	90	90	91	88.8

Bundan sonraki deneylerde hız ve ivme sensor sistemi arızalandığı için bu veriler deney sürecinde alınamamıştır.

#### 4.3.9. W01-II-S03-T(01-07)

Yapılan W01-II-S02-T01 nolu deneyden (250mm yükseklikteki numuneler) verimli sonuçlar alındıktan sonra numune boyunun 200mm'ye düşürülerek tekrar teste tabi tutulması en doğru sonuçlara ulaşılması açısından önemli olduğundan yeni deney numunesi hazırlanarak düşürme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.23.).

W01-II-S03 segmentindeki 7 adet T01-T07 arasında bulunan numunelerden birincisi bu başlıkta detaylı incelenmiştir. Diğer numunelerdeki sönümleme davranışları fazla farklılık göstermediğinden bu numunelere ait sonuçlar (diğer altı adet numune sonuçları) Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Ortalama olarak 66mm'ye düşen numunede dört adet katlanma olması ve kolonlarda son derece kararlı katlanmaların olması darbenin en iyi şekilde emildiğinin kanıtıdır.

Fakat aşırı deformasyondan dolayı darbe kuvvetini absorbe edebilmekte yeteri kadar başarılı olamadığı görülmüştür. Bu nedenle 1mm sac kalınlığına sahip ve boyu 250mm olan numune en ideal ölçüler olduğuna karar verilmiştir.

Bu numunenin sönümlediği enerji miktarının hesaplanması aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,837)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3505,845 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{67 + 65}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 97.119 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3505,845 - 97.119 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3408.726 \text{ J}$$



a) üst



b) ön



a) arka



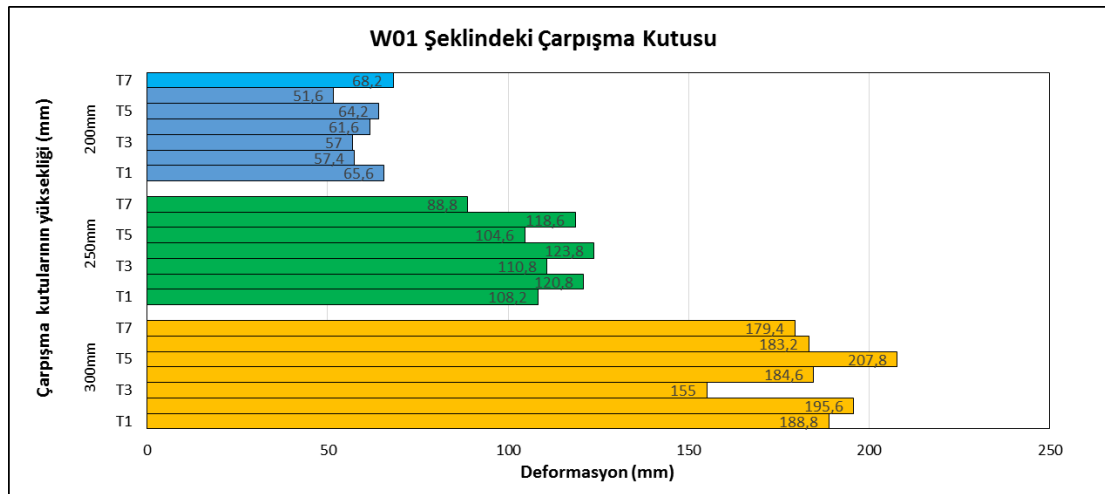
b) sağ

Şekil 4.23. W01-II-S03-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Tablo 4.3. W01 kesitli 200mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W01-II.0-S03-T01	200	68	67	65	60	68	65.6
W01-II.0-S03-T02	200	58	45	65	58	61	57.4
W01-II.0-S03-T03	200	68	26	65	58	68	57
W01-II.0-S03-T04	200	63	48	65	65	67	61.6
W01-II.0-S03-T05	200	66	63	65	62	65	64.2
W01-II.0-S03-T06	200	48	45	53	55	57	51.6
W01-II.0-S03-T07	200	69	66	69	69	68	68.2

W01 isimli ilk tasarıma ait düşürme veya çarpışma testleri tamamlandıktan sonra karşılaştırılmak istenen ikinci tasarım olan W02 için, W01 testlerinde en uygun sonucu veren 1mm et kalınlığı seçilerek bu noktadan sonra sadece 1mm kalınlığa sahip diğer numuneler için tesler gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.24.'de sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.24. W01-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 deney aralığına ait deformeasyon miktarları

W01-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 aralığı incelendiğinde 250mm yksekliliğe sahip numunelerin en iyi sonuçları verdiği tesbit edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; yüksekliliği 300mm olan numunelerin, bir miktar daha enerji snmleyebileceği ve yüksekliliği 250mm olan numunelerin ise aşırı deformeasyona uğradığı saptanmıştır.

#### 4.3.10. W02-II-S01-T(01-07)

Yapılan deneylerin sonucunda 1mm sac kalınlığına sahip numunede ufak bir tasarım değişikliğine gidilerek 25mm genişliğe sahip köşe genişlikleri kaldırılmıştır. Keskin köşeli W kesitli numunenin deney sonrasındaki darbeyi emme performansı incelendiğinde numune yüzeylerinde ve kolonlarında çarpık ve kararsız bir şekilde katlanmalar ve deformasyonlar oluştuğu için verimli sonuçlar elde edilmediği görülmüştür.

Çarpışma öncesi 300mm olan numune boyu ortalama yaklaşık olarak 126mm'ye inmiş ve yine tablanın hafif eğik düşmesi sonucu darbe ilk sağ tarafa gelerek bu kısmın ezilmesine sebep olmuştur. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.25.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. W02-II-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

W02-I1-S01 numunelerinin 7 adet T01-T07 arasında bulunanlardan birincisi incelenmiş ve diğer çarpışma kutularından sönümleme davranışları büyük farklılıklar içermediği için bu numunelere ait sonuçlar (diğer altı adet numune sonuçları) Tablo 4.4.'de verilmiştir.

Tablo 4.4. W02 kesitli 300mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W02-I1-S01-T01	300	120	122	130	122	120	122.8
W02-I1-S01-T02	300	65	106	104	103	106	96.8
W02-I1-S01-T03	300	74	84	88	86	85	83.4
W02-I1-S01-T04	300	102	103	102	104	103	102.8
W02-I1-S01-T05	300	71	123	123	124	127	113.6
W02-I1-S01-T06	300	97	56	94	91	92	86
W02-I1-S01-T07	300	44	78	80	79	78	71.8

Numunenin sönümlediği enerji miktarı ise aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,8)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3468 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{122 + 130}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 185,409 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3468 - 185,409 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3282,591 \text{ J}$$

#### 4.3.11. W02-I1-S02-T(01-07)

Keskin köşeli 1 mm kalınlığındaki numunenin çarpışma testi sonucu numune boyunun 250mm'ye düşürülerek tekrar teste tabi tutulmasına karar verilmiştir.

Darbe sonucu sol kolonda içe doğru burkulma görülürken sağ kolon ve orta kolonda ise "S" harfini andıran bir katlanma meydana gelmiştir. Deformasyon sonucu numune boyu ortalama 70mm'ye düşmüştür. Numunenin sönümlediği enerji miktarı ise aşağıda hesaplanmıştır. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.26.'de gösterilmiştir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,8)^2$$

$$\rightarrow K_{e_{im}} = 3468 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{72 + 68}{2 \times 1000}$$

$$\rightarrow P_{e_{son}} = 103,005 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3468 - 103,005$$

$$\rightarrow E_{ab} = 3364,995 \text{ J}$$



a) ön



b) arka



c) sol



d) sağ

Şekil 4.26. W02-I1-S02-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

W02-I1-S02 dahilindeki 7 adet T01-T07 numuneleri içerisindeki çarpışma kutularından birincisi burada incelenmiştir. Diğer numunelerdeki şok dalgası absorbe etme kabiliyetleri yakınsadığından dolayı bu numunelere ait sonuçlar (diğer altı adet numune sonuçları) Tablo 4.5.'de verilmiştir.

Tablo 4.5. W02 kesitli 250mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W02-II-S02-T01	250	71	68	73	72	68	70.4
W02-II-S02-T02	250	69	32	75	67	70	59.5
W02-II-S02-T03	250	22	49	70	69	69	55.8
W02-II-S02-T04	250	63	56	57	63	61	60
W02-II-S02-T05	250	21	25	49	46	45	37.2
W02-II-S02-T06	250	31	56	61	56	60	52.8
W02-II-S02-T07	250	57	46	70	68	70	66.3

#### 4.3.12. W02-II-S03-T(01-07)

1mm sac kalınlığına sahip keskin köşeli numunenin boyu 200mm'ye indirilmiştir. Bu başlık altında incelenecek W02-II-S03 kapsamında 7 adet T01-T07 arasındaki numunelerden birincisinin incelemesi yapılmıştır. Numunenin yüksekliği 200mm ye indirildiğinde ise darbe kuvvetine dayanmayarak aşırı deformasyona uğradığı görülmektedir. Darbe kuvvetinin etkisiyle boyu 30mm düşen numunenin yeterli enerji absorbe edebilme kabiliyetinin olmadığı görülmüştür (şekil 4.27.).



a) n

b) arka

şekil 4.27. W02-II-S03-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu





c) sol

d) sağ

Şekil 4.27. (Devamı)

Tablo 4.6. W02 kesitli 200mm yüksekliği olan 1mm kalınlığa sahip numunelerin çarpışma testi sonuçları

Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W02-I1-S03-T01	200	43	36	42	41	43	41.0
W02-I1-S03-T02	200	30	32	30	30	30	30.4
W02-I1-S03-T03	200	24	2	27	27	25	21.0
W02-I1-S03-T04	200	35	32	38	38	38	36.2
W02-I1-S03-T05	200	24	34	37	37	36	33.6
W02-I1-S03-T06	200	30	29	39	37	40	35.0
W02-I1-S03-T07	200	33	30	41	43	42	37.8

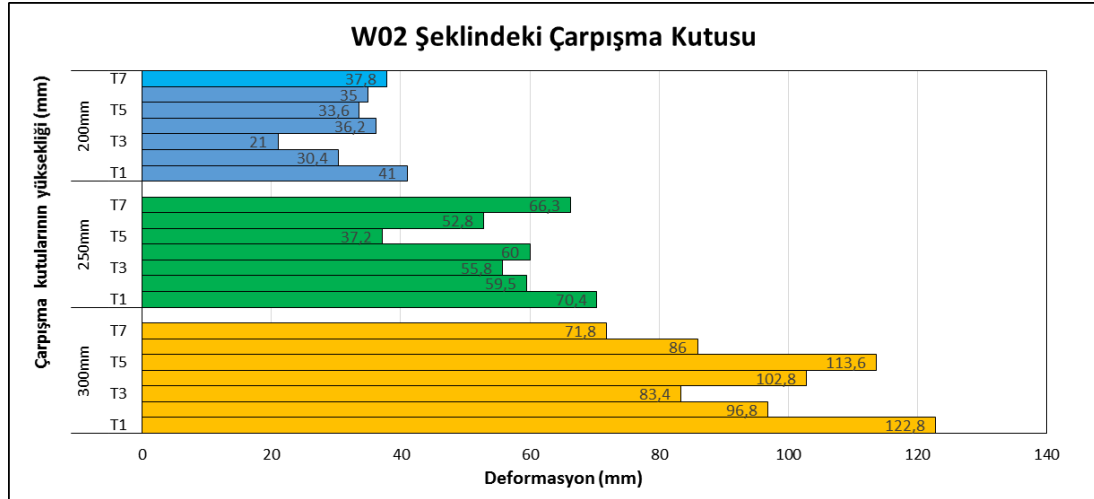
Numunenin sönmlediği enerji miktarı ise aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,8)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3468 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{30}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 44,145 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3468 - 44,145 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3423,855 \text{ J}$$

W02-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 aralığı incelendiğinde yine W01'deki sonuçlara yakın olarak 250mm yüksekliğe sahip numunelerin en iyi sonuçları verdiği tesbit edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; yüksekliği 300mm olan numunelerin, bir miktar daha enerji sönmleyebileceği ve yüksekliği 250mm olan numunelerin ise aşırı deformasyona uğradığı saptanmıştır (Şekil 4.28.).



Şekil 4.28. W01-S01, S02 ve S03 kodlu çarpışma kutularının T01-T07 deney aralığındaki deformasyon miktarları

#### 4.4. 0,8mm Kalınlığındaki Numune

1mm sac kalınlığına sahip numuneler ile yapılan testler sonrasında daha doğru sonuçlar açısından 0,8mm sac kalınlığından imal edilen numuneler ile testler yapılmıştır. 0,8mm kalınlıktaki numuneler ile gerçekleştirilen ilk testlerde çok fazla deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. 0,8mm kalınlığa sahip olan numunelerin aşırı deformasyona uğrama ihtimalleri göz önüne alınarak testler esnasında ivme sensörü de kullanılmamıştır. Bu deneylerin tamamında tahmin edildiği üzere çok aşırı deformasyon olduğu tespit edilmiş ve 0,8mm et kalınlığına sahip çarpışma kutularının deformasyon sonrası tamamen ezilmiş olduğundan ve daha fazla deforme olacak yeri kalmamış olmakla birlikte artık darbe sönümlenme yerine şok dalgalarının tamamen araca ve yolculara aktarılacağı anlaşılmıştır.

Buna ilave olarak 0,8mm et kalınlığına sahip sacların piyasada bulunma ihtimali diğer seçeneklere göre daha zor olduğundan bu numuneler daha sonra temin edilmiş, piyasada bulunma aralığına göre imalat zorluğu da göz önünde bulundurularak deneyler bu sıralama ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4.4.1. W01-I0.8-S01-T01

0,8mm kalınlığa sahip numune ile 1. Çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası numunede aşırı deformasyon görülmüştür. Malzeme sac kalınlığı gerekli enerji sönümlemeyi yapmaya yetersiz kalmış ve malzeme birçok noktasından katlanarak flambajlar oluşturmuştur (şekil 4.29.).



a) n

b) sağ

şekil 4.29. W01-I0,8-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu

#### 4.4.2. W01-I0.8-S01-T02

0,8mm kalınlığa sahip numune ile çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrasında 0,8mm'lik numunenin basma gerilmesiyle beraber burulma gerilmesi altında kalmasıyla aşırı deformasyona uğramıştır. Numune boyu 300mm'den 44mm'ye düşmüştür (şekil 4.30.).



a) arka

b) sol

Şekil 4.30. W01-I0,8-S01-T02 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu

Gerçekleştirilen test esnasında numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,741)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3408,081 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{44}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 64,746 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3408,081 - 64,746 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3343,329 \text{ J}$$

#### 4.4.3. W01-I0.8-S01-T03

0,8mm kalınlığa sahip, St-37 malzeme ile imal edilmiş numune ile yapılan deney sonrasında numunede herhangi bir burulma gerilmesi belirtisi görülmemektedir. Numunenin sağ ve sol yüzeyinde oluşan flambaj birbirinden farklı olup sol yüzeydeki flambajın daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ise düşürme plakasının eğimli olarak numuneye teması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir. Numunenin boyu 300mm'den 70mm'ye düşmüştür (Şekil 4.31.).



a) ön

b) sağ

Şekil 4.31. W01-I0,8-S01-T03 kodlu numunenin çarpışma sonrası durumu

Görüntü kayıtları incelendiğinde düşürme plakasının numuneye açılı olarak yaklaştığı ve ilk temasın sol tarafta gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.32.).



Şekil 4.32. Tablanın numuneye çarptığı açı

Çarpışma esnasında numunenin sönmülediği enerji miktarı aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,880)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3550,080 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{70}{1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 103,005 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3550,080 - 103,005 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3447,075 \text{ J}$$

Bu üçüncü numuneden sonra diğerleriyle gene benzer davranışlar sergileyen W01-I0,8-S01 kapsamında 4 adet daha T04-T07 arasındaki numunelerin sonuçları da incelemenin tüm yedi numune açısından incelenebilmesi için bu çarpışma kutularına ait sonuçlar da (diğer dört adet numune sonuçları) dahil olmak üzere Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. 0,8mm sac kalınlığına sahip nünunelerin deney öncesi ve deformasyon sonrası ölçüleri

Numune No	H(mm)	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H4(mm)	H5(mm)	ORT.(H)
W01-I0.8-S01-T01	300	52	52	47	57	55	52.6
W01-I0.8-S01-T02	300	42	45	45	44	43	43.8
W01-I0.8-S01-T03	300	67	68	65	66	67	66.6
W01-I0.8-S01-T04	300	57	32	73	71	71	60.8
W01-I0.8-S01-T05	300	90	100	100	100	100	98.0
W01-I0.8-S01-T06	300	58	57	70	68	69	57.0
W01-I0.8-S01-T07	300	82	63	80	85	75	77.0

#### 4.5. 1,2mm Kalınlığındaki Numune

Deneyleyler, 2mm et kalınlığındaki numuneler kullanılarak sırasıyla 1,5mm ve sonra da 1mm lik saclar piyasadan kolaylıkla tedarik edilebilirlik sırasına göre tatbik edilmişlerdir. 2mm ve 1,5mm kalınlığındaki numunelerin sonucu rijit çıkmış ve 0,8mm et kalınlığındaki numuneler de aşırı deforme olmuştur. Akabinde 1mm kalınlığındaki numune sonuçlarının beklenenin üzerinde uygun çıkması sebebiyle, 1,5mm ve 1mm arasında uygunluk bakımından bir geçiş olabileceği göz önünde bulundurularak, piyasadan nispeten kolay tedarik edilebilen 1,2mm lik numunenin deneylerinin de yapılması uygun bulunmuştur.

0,8mm'lik sac numuneler gibi 1,2mm et kalınlığına sahip sacların da piyasada bulunma ihtimali de güçtür. Bu sebeplerden ötürü daha sonra temin edilen bu numunelerin deneyleri en son olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

0,8mm'lik numunelerin testlerinin sonucunda daha doğru sonuçlar elde edebilmek için araform olarak 1,2mm'lik sacın vereceği sonuçları da görmenin faydalı olacağı düşünülmüştür.

#### 4.5.1. W01-I1.2-S01-T01

1.2mm sac kalınlığına sahip numune ile yapılan ilk deney sonrasında numune incelendiğinde numunenin üst yüzeyinin yani tablanın vurduğu yerin hemen altında gayet stabil bir adet katlanma gerçekleştiği görülmektedir. Alt tarafa yakın kısımlarda ise katlanma belirtileri vardır. Numunenin sol ve sağ yüzeylerinde neredeyse simetrik burkulmalar görülmektedir. Tabla pik kuvvetini uyguladıktan sonra numunede öne doğru burkulma başlangıcı belirtileri saptanmıştır. Deformasyon sonucu numuneye ölçülerini incelediğimizde bu daha açık şekilde anlaşılmaktadır. Ön taraftan ölçtüğümüzde 220mm'ye düşen numune boyu arkadan 224mm olarak ölçülmüştür. 1.2mm'lik numune hakkında daha fazla bilgi edinebilmek için deneylerin tekrar edilmesi uygun görüldü. Düşürme cihazında bulunan hız sensörleri ile levhanın çarpma anında ki yaklaşık hızı 6,819 m/s olarak ölçülmüştür (Şekil 4.33.).

Bu numunenin absorbe ettiği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,819)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3487,41 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{222 + 224}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 328,144 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3487,41 - 328,144 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3159,266 \text{ J}$$



Şekil 4.33. W01-I1.2-S01-T01 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

#### 4.5.2. W01-I1.2-S01-T02

1.2mm kalınlığa sahip 2. numune ile çarpışma testi gerçekleştirildi. Önceki yapılan deneye göre 2mm daha fazla ezilme gözlemlenerek, deformasyon sonucu ortalama boyunun 221mm'ye indiği belirlenmiştir. Bu farkın sebebi hız sensöründen okunan tablanın numuneye çarpmasındaki yaklaşık hızının önceki ölçüme göre biraz daha artarak 6,830 m/s olmasıdır. Dikkatlice incelendiğinde sağ ve sol sütündeki katlanma belirtisi dahada artmıştır. Aynı şekilde üst yüzeyin hemen altında bir adet katlanma vardır. Yine aynı doğrultuda yandan çekilen fotoğraflara bakıldığında numune öne doğru burkulma ilerlemesi dahada artmıştır. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.34.'de gösterilmiştir.





Şekil 4.34. W01-I1.2-S01-T02 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Testi gerçekleştirilmiş olan numunenin sönümlendiği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,830)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3498,667 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{220 + 222}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 325,201 \text{ J}$$

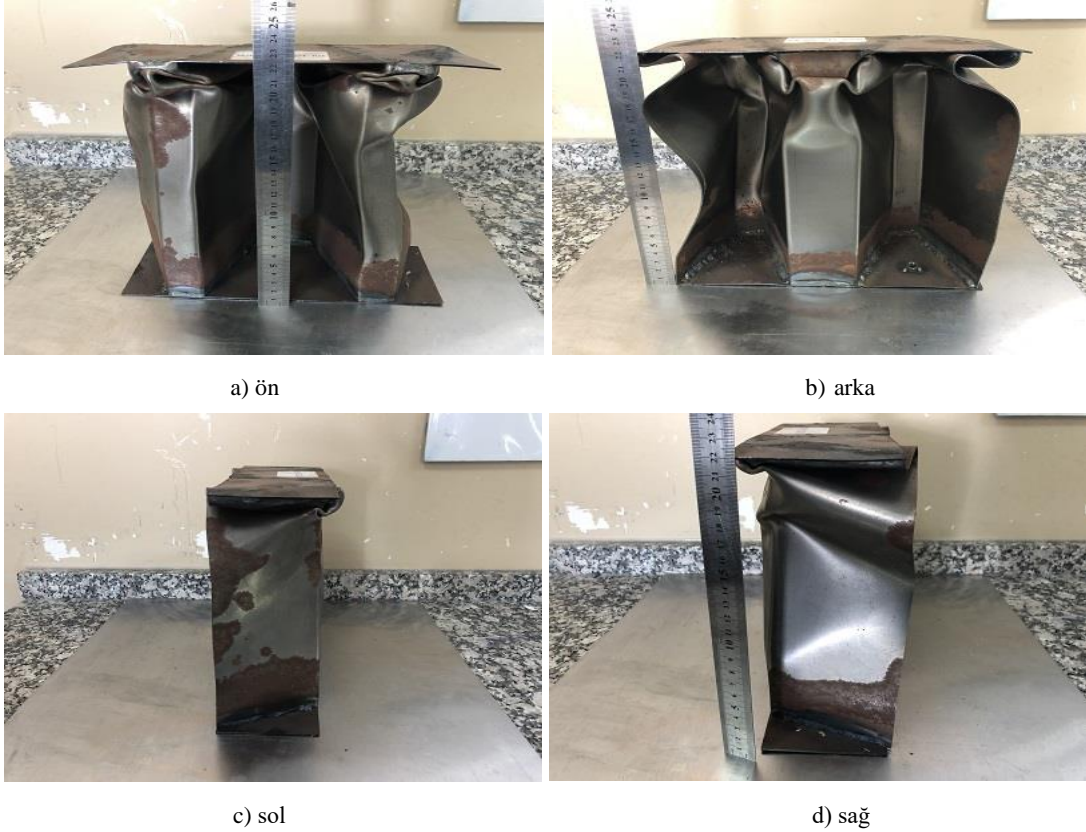
$$E_{ab} = 3498,667 - 325,201 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3173,466 \text{ J}$$

Ezilme miktarının artışıyla doğru orantılı olarak absorbe edilen enerji miktarında ( $E_{ab}$ ) artmıştır.

#### 4.5.3. W01-I1.2-S01-T03

1.2mm kalınlığa sahip 3. numune ile çarpışma testi gerçekleştirildi. Sonuçlar incelendiğinde 2. Numuneye çok yakın sonuçlar elde edildiği görüldü. Yine tablanın

çarptığı yerin hemen altında tüm kolonlarda bir adet katlanma mevcuttur. Sağ kolonun içe doğru sol kolonun ise dışa doğru burkulma oluşturduğu saptanmıştır. Deney sonrası numune boyu 222mm'ye inmiştir. Numunenin çarpışma sonrası fotoğrafları Şekil 4.35.'de verilmiştir.



Şekil 4.35. W01-II.2-S01-T03 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Deneyi yapılan numunenin sönmülediği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,837)^2$$

$$\rightarrow K_{e_{im}} = 3505,845 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{222}{1000}$$

$$\rightarrow P_{e_{son}} = 326,673 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3505,845 - 326,673$$

$$\rightarrow E_{ab} = 3179,172 \text{ J}$$

#### 4.5.4. W01-II.2-S01-T04

1.2mm kalınlığına sahip 4. numunenin çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Düşürme cihazında bulunan hız sensörleri ile levhanın çarpma anındaki yaklaşık hızı 6,791

m/s olarak ölçülmüştür. Genel itibariyle düzenli deformasyonların olması şok dalgasının heryere eşit şekilde kuvvet uyguladığının belirtisidir. Tablanın çarptığı yerin hemen altında kolonlarda bir adet katlanmanın olduğu ve alt tarafa yakın kısımda ise bir adet katlanma başlagıcı olduğu görülmüştür. Şok kuvvetinin etkisiyle öne doğru flambaj belirtilerinin olduğu saptanmıştır. Numune boyu sol kolonda 223mm sağ kolonda ise 224mm olarak ölçülmesi tablanın düzgün bir şekilde numuneye çarptığını göstermektedir. Numunedeki şekil değişikliklerinin kararlı olması bunun bir sonucudur (Şekil 4.36.). Deneyi yapılan numunenin sönmülediği enerji miktarı aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,791)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3458,827 \text{ J}$$

$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{223 + 224}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 328,144 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3458,827 - 328,144 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3130,683 \text{ J}$$



a) ön



b) arka



c) sol



d) sağ

Şekil 4.36. W01-II.2-S01-T04 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

#### 4.5.4. W01-I1.2-S01-T05

1.2mm kalınlığa sahip 5. numune ile çarpışma testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası numune incelendiğinde st ve alt yüzeylere yakın bölgelerde birer adet katlanmanın gerçekleştiği tesbit edilmiştir. Tablanın arpma anındaki yaklaşık hızı 6,71 m/s olarak ölçülmüştür. Gayet stabil şekilde plastik deformasyona uğrayan numunenin dış yüzeylerinin içe doğru büküldüğü görülmektedir. Ortalama yaklaşık olarak 211mm ölçülmüştür. Bu değer önceki ölçümlere göre neredeyse 12mm daha düşüktür. Bunun sebebi ise hem alt hemde st taraflardaki katlanmalardır. nceki testlerdeki numunelerin katlanma sayısı birer kere olmasına rağmen bu testde iki adet katlanma gerçekleşmiştir. Buda emilen enerjinin daha fazla olması demektir. Katlanma başlatıcı olarak kullanılan crash bead' lerin önemi burada dahada net anlaşılmıştır. (Bkz. Sayfa 11). Numunenin arpışma sonrası fotoğrafları şekil 4.37.'de belirtilmiştir.



şekil 4.37. W01-I1.2-S01-T05 kodlu numunenin çarpışma testi sonrası durumu

Deformasyon sonucu numune boyunda oluşan değişiklik göz önüne alınarak yapılan hesaplamalar aşağıda belirtilmektedir.

$$K_{e_{im}} = \frac{1}{2} \times 150 \times (6,830)^2 \quad \rightarrow \quad K_{e_{im}} = 3498,667 \text{ J}$$

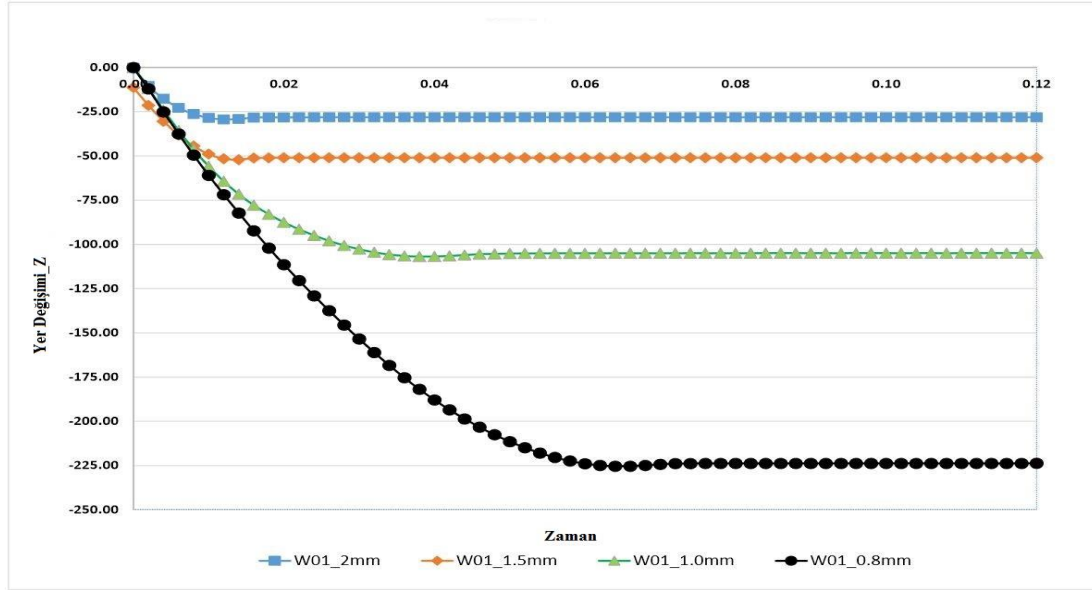
$$P_{e_{son}} = 150 \times 9,81 \times \frac{220 + 222}{2 \times 1000} \quad \rightarrow \quad P_{e_{son}} = 325,201 \text{ J}$$

$$E_{ab} = 3498,667 - 325,201 \quad \rightarrow \quad E_{ab} = 3173,466 \text{ J}$$

Bu beşinci numuneden sonra benzer davranışlar sergileyen W01-II,2-S01 kapsamında 2 adet daha T06, T07 numunelerinin sonuçları da incelemenin tüm yedi numunenin karşılaştırılabilmesi maksadıyla bu çarpışma kutularına ait sonuçlar (diğer iki adet numune sonuçları dahil olmak üzere) Tablo 4.8.'de ve Şekil 4.38.'de verilmiştir.

Tablo 4.8. 1,2mm sac kalınlığına sahip nümunelerin deney öncesi ve deformasyon sonrası ölçüleri

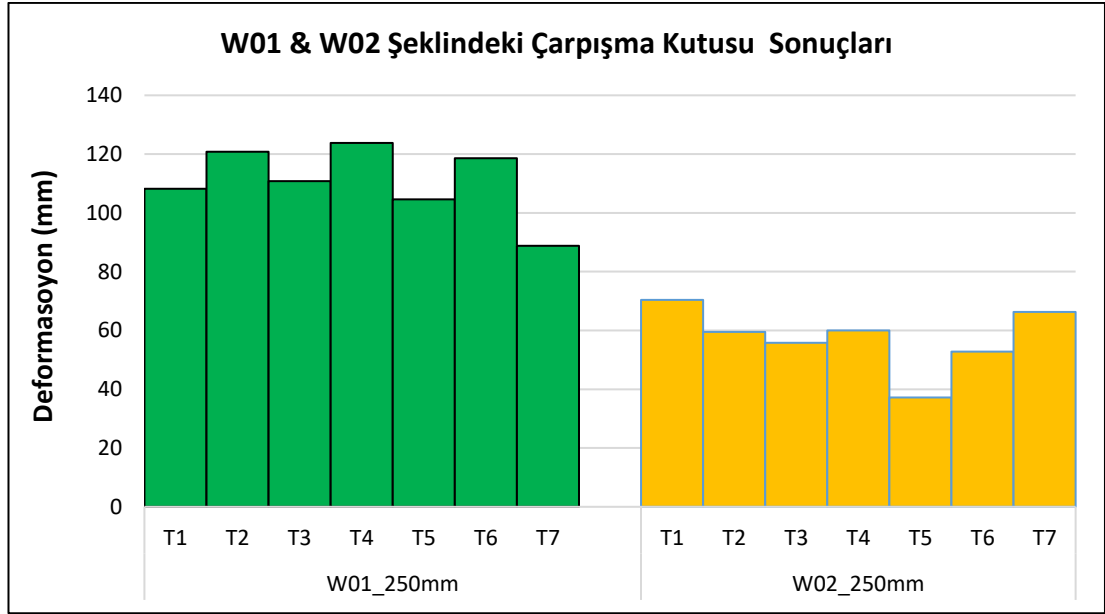
Numune No	H (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	ORT.(H)
W01-II,2-S01-T01	300	220	220	224	223	222	221.8
W01-II.2-S01-T02	300	220	221	225	222	219	221.4
W01-II.2-S01-T03	300	222	222	222	223	222	222.2
W01-II.2-S01-T04	300	223	211	223	224	222	220.6
W01-II.2-S01-T05	300	206	207	214	208	204	207.8
W01-II.2-S01-T06	300	205	205	204	204	206	204.8
W01-II.2-S01-T07	300	220	219	225	223	222	221.8



Şekil 4.38. W01 profil numaralı numunenin 2mm-1.5mm-1.0mm-0.8mm'lik sac kalınlıklarına ait yer değişimi ve zaman grafiği

Yapılan deneylerin ve incelemelerin sonucunda 1mm kalınlığa sahip W kesitli profilin çalışmamız için kullanabileceğimiz optimum profil olduğuna karar verilmiştir. Zira 2mm, 1,5mm ve 1,2mm kalınlıkta olan profillerin yeterli sönmlemeyi gösteremedikleri tesbit edilmiş, 0,8mm kalınlığında ki profilin ise aşırı deformasyona uğrayarak enerjinin tamamının absorbe edilebilmesinde yetersiz kaldığı saptanmıştır. Malzeme kalınlık ve şekil optimizasyonları göz önüne alındığında 1mm sac kalınlığı uygun görülmüştür.

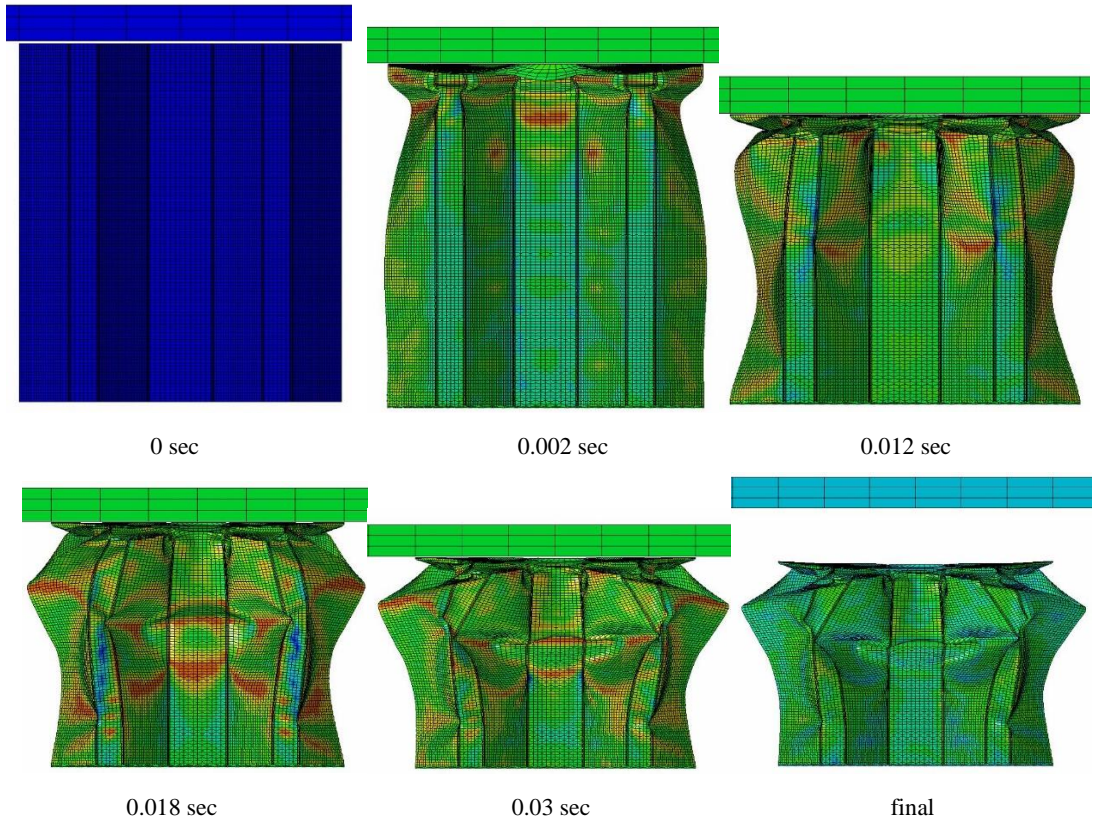
Şuana kadar yaptığımız tüm deneysel verileri kıyasladığımızda; 1mm sac kalınlığına sahip çarpışma kutularının en iyi sonuçları verdiği, bu kalınlıkla şekil ve boyut optimizasyonu yapıldığında ise 250mm yüksekliğindeki W01 profilili numunenin en ideal sonuçları verdiği kanıtlanmıştır (Şekil 4.39.).



Şekil 4.39. 250mm yüksekliğindeki W01 ve W02 profillerine ait sonuç grafiği

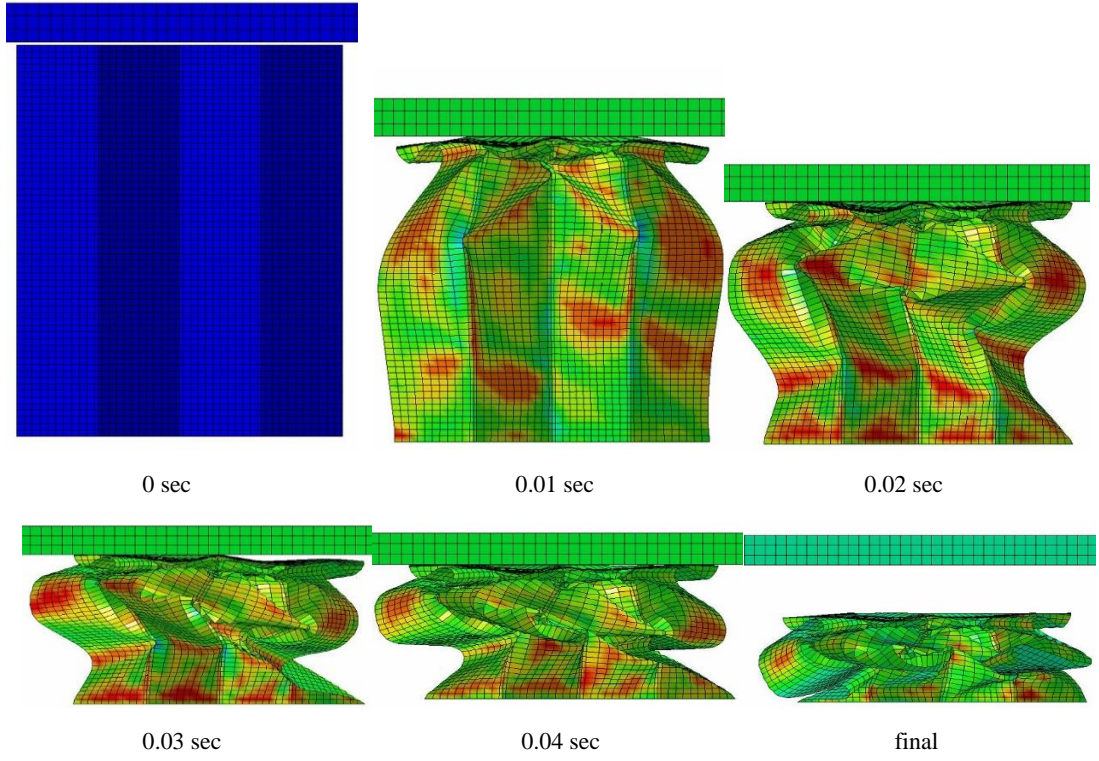
#### 4.6. Yapılan Deneylerin Analiz Sonuçları

FEM yöntemi kullanılarak LS-DYNA analiz programı ile, yüksekliği 300mm olan W01 ve W02 profil numaralı 1mm sac kalınlığı olan numelerin analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), verilen herhangi bir fiziksel olgunun sonlu elemanlar analizini yapmak için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bir CAD modeli oluşturulduktan sonra, sonlu elemanlar analizi için LS-DYNA yazılımına model dosya aktarılmıştır. Bu dosya, alt plaka modeline sahip çarpışma kutusu geometrisi modeline sahiptir. Bu yazılımda modelde model (kabuk ve katı), meshing, sınır koşulu, uygulanan yük vb. fiziksel bir durum verilmiştir. Malzeme tanımı olarak, birebir aynı adı taşıyan malzeme bulunamadığından, St37 çeliği ile aynı özellikleri taşıyan PIECEWISE malzeme özellikleri setini içerir. St37 çeliğinin lineer elastik malzeme özellikleri Tablo 2.1.'de belirtilmiştir. Sınır şartlarının seçimi, hız kontrolü ve çarpma kutusunun LS-Dyna yazılımında düşmeyle teması gibi sonlu elemanlar analizi adım adım tamamlandı. Analiz ve deney sonuçlarını kıyasladığımızda birbirine çok yakın veriler elde edildiği görülmektedir. Yapılan analiz sonuçları Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'de verilmiştir.



Şekil 4.40. 1mm sac kalınlığına sahip W01 profil numaralı numunenin analiz sonuçları





Şekil 4.41. 1mm sac kalınlığına sahip W02 profil numaralı numunenin analiz sonuçları

Deney sonuçlarında olduğu gibi W01 profilin analiz sonucunda da stabil katlanmalar, W02 profilin analiz sonucunda ise kararsız katlanmalar görülmektedir.

## BÖLÜM 5. ÖNERİLER

Yapılan çalışmalarda kullanılan numunelerin boylarının uzun seçilmiş olması, ince malzemelerle çalışıldığında sönümleme miktarının görülmesi ve aşırı deformasyona uğrayan bu numuneler hakkında net bir fikir sahibi olunmasına yol açmıştır.

1mm kalınlığa sahip numunelerin test sonrası durumları incelendiğinde hala deformasyona uğramamış bölümlerin olduğu görülmektedir. Bu durumdan yola çıkılarak, kesit geometrisi aynı 1mm kalınlığa sahip numuneler üretilerek bunların testleri gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler daha hafif ve önceki numunelere göre daha mukavemetli olacaktır. Boyun kısılmasıyla katlanmaların başlangıcındaki zorlanma dolayısıyla daha ince malzemeler kullanılarak aynı geometride numuneler üretilerek deneyleri yapılmalıdır. Deneyi yapılan numuneler açık kesit geometrisine sahiptir. Bu numuneler birleştirilerek elde edilecek kapalı geometrilerin deneyleri yapılabilir.

Ağırlığı yaklaşık 1000 kg olan Peugeot 301 bir araç için, 1mm sac kalınlığı olan numuneler kullanılarak oluşturulacak sönümleyici bir sistem için gerekli numune sayısı ve çarpışma etkisini tamamen sönümleyebileceği hız değeri aşağıda hesaplanmıştır.

Ölçü ve ağırlık değerleri kullanılmak üzere seçilen aracın özellikleri:

Seçilen araç: Peugeot 301 1.2 L Pure Tech

Boş Ağırlık: 980 kg

$$m_{\text{araç}} = \text{Araç (980 kg)} + \text{Sürücü (75 kg)} + n \times \text{Profil (1,528 kg)}$$

Araç Hızı Tayini:

$$m_{\text{araç}} \times V_{\text{araç}} = n \times m_{\text{plaka}} \times V_{\text{deney}}$$

$$V_{\text{araç}} = \frac{n \times m_{\text{plaka}} \times V_{\text{deney}}}{m_{\text{araç}}}$$

(a) n = 6 Adet Profil

$$\text{Araç (980 kg) + Sürücü (75 kg) + 6 x Profil (1,528 kg) = } m_{\text{araç}} = 1064,168 \text{ kg}$$

$$V_{\text{araç}} = \frac{6 \times 150 \times 6,815}{1070,28}$$

$$V_{\text{araç}} = 5,76 \text{ m/s} = 20,75 \text{ km/h}$$

(b) n = 8 Adet Profil

$$\text{Araç (980 kg) + Sürücü (75 kg) + 8 x Profil (1,528 kg) = } m_{\text{araç}} = 1067,224 \text{ kg}$$

$$V_{\text{araç}} = \frac{8 \times 150 \times 6,815}{1067,224}$$

$$V_{\text{araç}} = 7,663 \text{ m/s} = 27,58 \text{ km/h}$$

(c) n = 10 Adet Profil

$$\text{Araç (980 kg) + Sürücü (75 kg) + 10 x Profil (1,528 kg) = } m_{\text{araç}} = 1070,28 \text{ kg}$$

$$V_{\text{araç}} = \frac{10 \times 150 \times 6,815}{1070,28}$$

$$V_{\text{araç}} = 9,551 \text{ m/s} = 34,38 \text{ km/h}$$

Hesaplamalarda kullanılan deneysel hızlar, deney düzeneğinin kapasitesi dahilince çıkılabilmiş hızlardır. Numunelerde deforme olmamış bölgelerin bulunması numunelerin hala enerji sönmleme kabiliyetinin olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen düşürme testleri neticesinde, 6 adet çarpışma kutusu kullanılmasına karar verilmiştir. Daha yüksek hızlara ulaşabilen veya daha ağır düşürme plakalarına sahip deney düzeneklerinde yapılacak deneylerle mevcut tasarımın maksimum enerji sönmleme kabiliyeti ölçülerek, bu deneylerde elde edilen hız değerleri kullanıldığı takdirde maksimum hangi hızda seçilen araçla yapılacak olan çarpışmanın etkisini sönmleyebileceği hesaplanabilir. Hesaplarda ölçü ve ağırlık değerleri kullanılan

aracın seçilmesindeki amaç ise segmentindeki hafif araçlardan biri olması ve tampon bölgesinde yeterli sayıda numune alabilecek genişliği barındırmasından kaynaklıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] [www.kgm.gov.tr](http://www.kgm.gov.tr), Erişim Tarihi: 11.02.2018.
- [2] Temiz, F., (TEZ) Araçların Karşılıklı Çarpışmasında Sürücüye Etkiyecek Kuvvet Ve İvme Değişimlerinin Analizi, 32-116, (2008).
- [3] Zarei, H.R., Kröger, M., Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes, *Thin-walled Structures*, 44, 301-308, 2006.
- [4] Öztürk, İ., Kaya, N., Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 13, Sayı 1, 119-120, 2008.
- [5] Tarigopula, V., Langseth, M., An experimental and numerical study of energy absorption in thinwalled high-strength sections, 49, 495-507, 2005.
- [6] [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com), Simms Manufacturing. Erişim Tarihi: 16.03.2018.
- [7] [www.pontiacsonline.com](http://www.pontiacsonline.com), The Online Pontiacs Magazine. John Delorean. Erişim Tarihi: 19.03.2018.
- [8] Abramowicz, W., Thin-walled structures as impact energy absorbers, 91-107, 2003.
- [9] [www.ond.org.tr](http://www.ond.org.tr), Teknik Yazılar. Altın M. Erişim Tarihi: 18.03.2018.
- [10] Lee, S., Hahn, C., Rhee M., Oh J-E., Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes, 20, 31-40, 1999.
- [11] Yamazaki, K., Han, J., Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells, *Advances in Engineering Software*, 31, 425-434, 2000.
- [12] Nakazawa, Y., Tamura, K., Yoshida, M., Tagaki, K., Kano, M. Development of crash-box for passenger car with high capability for energy absorption, VIII. International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, Spain, 2005.
- [13] Chiandussi, G., Avalle, M., Maximization of the crushing performance of a tubular device by shape optimisation, *Computers and Structures*, 80, 2425-2432, 2002.

- [14] Jacob, G.C., Fellers, JF., Starbuck, J.M., Simunovic, S., Crashworthiness of automotive composite material systems. *Journal of Applied Polymer Science* 92, 2004.
- [15] Johnson, AF., David M., Failure mechanisms and energy absorption in composite elements under axial crush. *Key Engineering Materials*, 488-489, 2012.
- [16] Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 475-570, 2000.
- [17] Fengxiang, Xu., Enhancing material efficiency of energy absorbers through graded thickness structures, 250-265, 2015.
- [18] Caihua Zhou, Yan Zhou, Bo Wang, Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes, 257-267, 2017.
- [19] Jianguang Fang, Yunkai Gao, Guangyong Sun, NaQiu, QingLi, On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads, 115-126, 2015.
- [20] Tabacu S., Axial crushing of circular structures with rectangular multi-cell insert, 297-309, 2015.
- [21] Paz J., Díaz L., Romera L., Costas M., Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled energy absorption devices, 30-39, 2014.
- [22] Abbasi M., Reddy S., Ghafari-Nazari A., Fard M., Multiobjective crashworthiness optimization of multi-cornered thin-walled sheet metal members, 31-41, 2015.
- [23] Reddy S., Abbasi M., Fard M., Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection, 56-66, 2015.
- [24] [www.hascometal.com](http://www.hascometal.com)., Erişim Tarihi: 19.10.2018.
- [25] [www.nscceelik.com](http://www.nscceelik.com)., Erişim Tarihi: 19.10.2018.
- [26] Costas M., Díaz J., Romera L.E., Hernández S., Tielas A., Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers, 166-181, 2013.
- [27] Xu F., Wang C., Dynamic axial crushing of tailor-welded blanks (TWBs) thin-walled structures with top-hat shaped section, 70-82, 2016.
- [28] Xu F., Sun G., Li G., Li Q., Experimental study on crashworthiness of tailor-welded blank (TWB) thin-walled high-strength steel (HSS) tubular structures, 12-27, 2014.

- [29] Xu F., Sun G., Li G., Li Q., Crashworthiness design of multi-component tailor-welded blank (TWB) structures, 653-667, 2013.
- [30] Yilmazcoban I.K., Mimaroglu A., Frontal impact absorbing systems in wheelchairs like sheet metal hood in vehicles, 20-26, 2012.

## ÖZGEÇMİŞ

Ömer Adanur, 13.04.1984'de Sakarya'nın Karasu ilçesinde doğdu. İlk ve orta eğitimini burada tamamladıktan sonra 2002 yılında Sakarya Anadolu Meslek Lisesi Makine Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği'ni kazandı. Üniversite öğrencisi iken 2006 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi'nde Teknisyen olarak göreve başladı. Akabinde 2007 yılında Talaşlı Üretim Öğretmenliği'ni bitirdi. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi'ne atanarak, 4 yıl görev süresinin ardından 2012 yılında Sakarya Üniversitesi'ne naklen atandı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa devam etti. Yüksek lisans öğrencisi iken, 2014 Yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Mühendislik Tamamlama Programı'na başlayarak aynı yıl mezun oldu. 2018 yılında yeni üniversite kurulması ile Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya Üniversitesi'nden ayrıldı. Bu tarihten itibaren Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'nde Teknisyen (Mühendis) olarak görevine devam etmektedir.