

Crash Analysis of a Pre-Engineered Electromobile Vehicle

 Bora YILDIRIM^{ID} Zekeriya ÖZCAN^{ID} Erdem AKTAŞ*^{ID}

Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Beytepe/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info :

Research article
 Received: 21/01/2020
 Revision 24/04/2020
 Accepted: 27/04/2020

In scope of this study, frontal collision of a pre-engineered electromobile vehicle to straight rigid wall is examined via ANSYS Workbench LS-DYNA computer aided engineering (CAE) software. The data obtained are compared with the critical limit values accepted by various authorities and the inferences were made regarding the injury status of dummy.

Highlights

- LS-DYNA
- Explicit Method
- Injury Criteria
- Case Studies

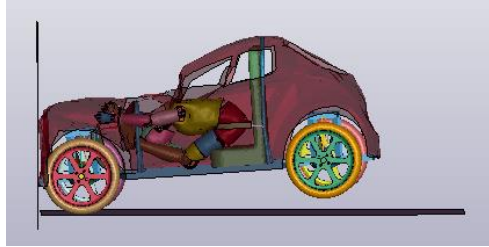


Figure A. Crash moment of numerical model to the wall

Keywords

Crash Analysis
 Finite Element Method
 Electromobile Vehicle
 Dummy Model

Purpose: Main objective of this study was to examine different collision scenarios of a pre-engineered vehicle with a dummy including the usage of seat belt and various structural material types in a numerical analysis platform.

Theory and Methods: Internationally accepted injury criteria (HIC: Head Injury Criteria, CSI: Chest Severity Index and Axial Femur Forces) which will be the objective assessment tool for obtained results, are briefly explained. Technical data of electromobile vehicle and DC engine are provided. Orthotropic, isotropic and anisotropic material parameters of numerical model are tabulated. This section also includes initial and boundary conditions and mesh structure used in ANSYS Workbench LS-DYNA.

Results: In terms of axial femur forces, seat belted dummy models are subjected to lower axial forces for all kinds of structural material scenarios in comparison to unbelted dummy model (Unbelted dummy right femur: from -2,47 kN up to -5,48 kN; left femur: from -1,56 kN up to -4,02 kN. Belted dummy right femur: from 1,6 kN up to 3,75 kN, left femur: from 1,93 kN up to 3,28 kN). Resultant head and chest and injury criteria of belted dummies are far higher (from 220,8 up to 1355) than unbelted ones (between 168,7 and 209,1).

Conclusion: Under the light of the presented results, the first thing that draws attention is that head and chest injury parameters are lower in models without seat belt compared to models with seat belt. This situation, which initially convinces one to perceive that models without seat belts are safer, actually demonstrates the life-saving feature of the seat belt. The dummy model strain in the models with seat belts has been excessive due to the fact that the seat belt overcomes the inertia of the dummy model. In models without seat belts, the dummy model continued its movement towards the front of the vehicle while maintaining its inertia. Therefore, their head and chest strain parameters were lower than the models with seat belts.

In models without a seat belt, the feet of the dummy model directly hit the support plate, causing huge forces and moments to occur. In this case, the feet were severely damaged, the ankles turned upside down and the solution could not be continued. Assuming that the solution continues, it is straightforward to estimate that models without seat belts will be thrown out of the vehicle and they would be exposed to a serious injury risk.



Önceden Tasarlanmış Elektromobil Aracın Çarpışma Analizi

Bora YILDIRIM^{ID} Zekeriya ÖZCAN^{ID} Erdem AKTAŞ^{ID}

Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Beytepe/ANKARA

Öz

Ulaştırma sektöründe yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorların enerji kaynağı olan fosil yakıtlara olan ihtiyaç sürekli artmasına rağmen rezervler ise sürekli olarak azalmaktadır. Bununla birlikte yakıt yanma reaksiyonu sonucu egzoz gazı emisyonlarının etkisi ile çevreye büyük zararlar verilmektedir. Bu nedenler ile alternatif enerji kaynakları ile çalışan araçlar geliştirilmeye başlanmıştır. Bu kapsamda, günümüzde tamamen elektrikli araç geliştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Jant içi elektrik motoru çalışmaları ise tamamen elektrikli araç geliştirmelerinden birisidir. Bu çalışmada, önceden tasarlanmış bir elektromobil aracın düz sert bir duvara önden çarpışması, ANSYS Workbench LS-DYNA bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımı aracılığı ile numerik olarak incelenmiştir. Analiz, yapısı gereği zamana bağlı dinamik bir analiz olduğundan dolayı açık (İng. Explicit) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak icra edilmiştir. Araç modeli içine kukla model yerleştirilerek kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde çarpışma etkisi ile oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerleri verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler, çeşitli otoriteler tarafından kabul görmüş olan yaralanma kritik sınır değerleri ile karşılaştırılarak kukla modelin yaralanma durumu ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur.

Crash Analysis of a Pre-Engineered Electromobile Vehicle

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 21/01/2020
 Düzeltme: 24/04/2020
 Kabul: 27/04/2020

Anahtar Kelimeler

Çarpışma Analizi
 Sonlu Elemanlar Yöntemi
 Elektromobil Araç
 Kukla Model

Keywords

Crash Analysis
 Finite Element Method
 Electromobile Vehicle
 Dummy Model

Abstract

Although the need for fossil fuels, which is the energy source of internal combustion engines that are widely used in the transportation sector, increases continuously, the reserves are continuously decreasing. However, the fuel combustion reaction results in large damages to the environment due to effects of exhaust gas emissions. For these reasons, vehicles that work with alternative energy sources are being developed. In this context, the development of fully electric vehicles is being carried out today. In-wheel electric motor studies are one of the most fully electric vehicle developments. In scope of this study, frontal collision of a pre-engineered electromobile vehicle to straight rigid wall is examined via ANSYS Workbench LS-DYNA computer aided engineering (CAE) software. Since the analysis is a time-dependent dynamic analysis due to its structure, it has been performed by using explicit finite element method. The data of the acceleration, force and deflection values formed by collision effect on the head, chest and femur of the dummy were obtained by placing dummy into the vehicle model. The data obtained were compared with the critical limit values accepted by various authorities and the inferences were made regarding the injury status of dummy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan geleneksel içten yanmalı motorların tarih sahnesine çıkışı 17. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Gücünü fosil yakıtların yanma reaksiyonu sonucu elde eden motorlar, gerek fosil yakıtların gün geçtikçe tükenmesi gerekse de çevreye verdiği zararlar yüzünden günümüzde yerlerini alternatif enerjili araçlara bırakmaya başlamışlardır. Kimyasal enerji kaynağının yerini almaya başlayan elektrik enerjili araçlar gün geçtikçe yeni tasarımları ile otomobil pazarında ağırlığını hissettirmeye başlamıştır.

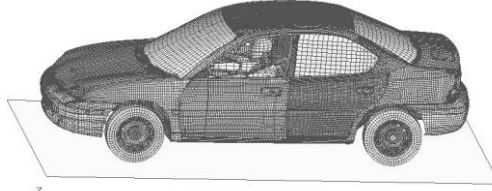
Ülkemizde ise geleneksel içten yanmalı motoru ile elektrik motorunu bünyesinde barındıran hibrit araç piyasası ile tam elektrikli araçların önünün açılacağı yadsınamaz bir gerçektir. Avantajlarının yanı sıra tam elektrikli araçların dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemli ise elektrik motorunun tahriğini

sağlayan araç bataryasının ömrünün kısa olmasıdır. Bu sorun kullanıcıya batarya değişimi veya kiralanması gibi ek maliyetler getirmektedir. Bu sorunun üstesinden gelinmesi için birçok ar-ge çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalardan önemli biri de jant içi elektrik motorları olarak gösterilebilir. Jant içi elektrik motorları ile herhangi bir güç aktarım elemanına ihtiyaç duyulmadan güç direk olarak tekerlere verilmektedir. Bu özelliği ile fazla ağırlığın ve güç aktarım elemanlarında vuku bulan güç kayıplarının önüne geçilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ise önceden tasarlanmış arka jant içi elektrik motorlarına sahip önceden tasarlanmış elektromobil aracın düz bir duvara çarpışması, sonlu elemanlar yazılımı ile nümerik olarak simüle edilecektir. Çarpışma analizi araç içinde bulunan kukla modelin (dummy) baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerlerinden yola çıkılarak yaralanma durumları ile ilgili değerlendirmelerde bulunulacaktır.

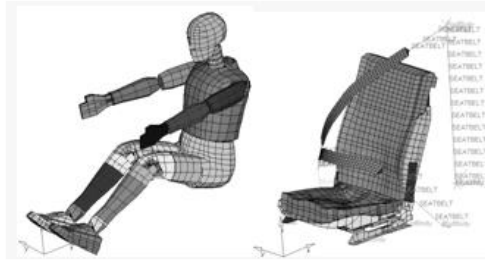
Çarpışma analizi konusunda literatüre geçmiş pek çok yayın bulunmaktadır. Ambati ve diğ. [1] tarafından yapılan nümerik çarpışma analizi bunlardan birisidir. Bu çalışmada Chevrolet C-1500 aracın yaklaşık 56 km/h hızla rijit bir duvara önden çarpması incelenmiştir. Aracın motor, radyatör, kapı, kaporta, tampon gibi parçalarının malzeme parametreleri değiştirilerek oluşan deformasyon incelenmiş ve NCAC araç modeli ile yapılan çarpışma analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Berzi ve diğ. [2] tarafından yapılmış olan diğer bir çalışmada, dört tekerlekli prototip elektrikli aracın dört ayrı çarpışma senaryosu üzerinde durulmuştur. Çarpışma senaryolarında, aracın rijit bir bariyere önden çarpması, araca bir otomobilin arkadan çarpması (ISO13232, tip 131), araca bir otomobilin yandan çarpması (ISO13232, tip 143) ve aracın bir otomobile yandan çarpması (ISO13232, tip 413) durumları konu alınmıştır. Her bir senaryoda, araç için kritik bileşen olarak belirlenen sağ ve sol bataryaların hasar durumu hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Li ve diğ. [3] kukla modele sahip bir aracın, 50 km/h hızla rijit bir duvar tarafından arkadan çarpılma durumunu incelemiştir. Analizde kullanılan araç modeli Şekil 1’de gösterilmektedir.



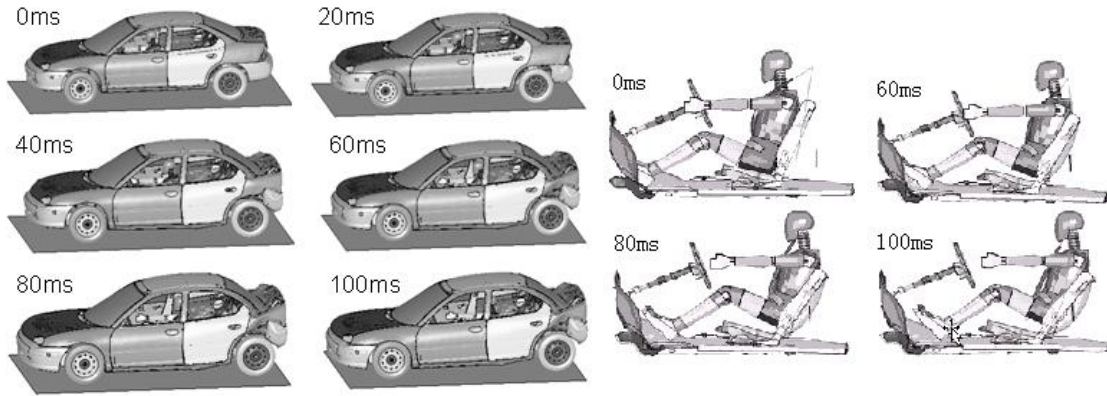
Şekil 1. Sonlu eleman araç modeli [3]

Kukla model olarak %50’lik Hibrit III kukla modeli kullanılmıştır. Kukla model için ayrıca emniyet kemeri oluşturulmuştur. Kukla model ve emniyet kemerli koltuk modeli Şekil 2’de gösterilmektedir.



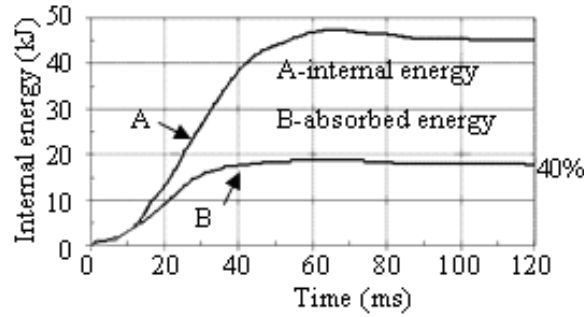
Şekil 2. Sonlu eleman kukla ve koltuk modeli [3]

Analiz sonunda aracın ve kukla modelin durumları Şekil 3’te yer almaktadır.



Şekil 3. Analiz sonrası aracın durumu (solda), kukla modelin durumu (sağda) [3]

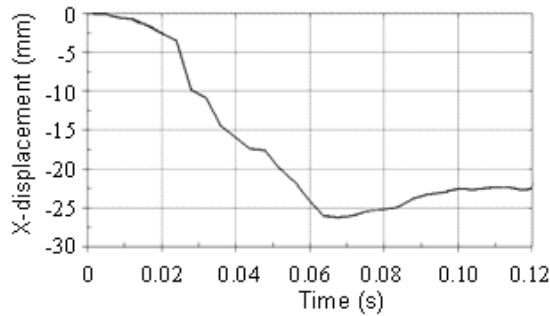
Analizde temel olarak aracın arka kısmının, yakıt tankının hasar durumları ve kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiği yaralanmaları incelenmiştir.



Şekil 4. Enerji sönümleme eğrisi [3]

Şekil 4'te gösterilen aracın arka yapısal parçalarının, 0-40 ms arasındaki iç ve sönümlenen enerji grafiklerine göre aracın arka tamponu toplam enerjinin %24,7'sine karşılık gelen 12,5 kJ enerjiyi sönümlenmektedir. Aracın arka tarafı ise 7,74 kJ büyüklüğünde enerjiyi sönümleyebilmiştir. Buradan aracın enerjiyi sönümleyen arka tamponunun iyi bir etki yaptığı söylenebilmektedir. Ancak aynı durumun, aracın arka iskelet dizaynı için söylenemeyeceği görülmektedir.

Arkadan çarpışmalarda, yakıt deposunun deformasyonu ve yakıt sızdırmazlık durumu önemli bir değerlendirme unsurudur. Yakıt tankının destek köşebendinin sıkışması nedeni ile tankın alt kısmı ciddi deformasyona uğramıştır. Şekil 5'te yakıt tankının deformasyona uğramayan civata ile sabitlenmiş alt noktasına göre tankın arka duvarındaki ciddi deformasyon noktasının yer değiştirme grafiği yer almaktadır.



Şekil 5. Yakıt deposunun deformasyon sonucu yer değiştirmesi [3]

Grafik incelendiğinde GB-20072-2006 standardına göre yakıt deposu emniyeti sağlandığı görülmektedir.

Kukla modelin baş, göğüs ve uyluk ve uyluk kemiği yaralanma parametreleri Tablo 1’de görülebilmektedir. Baş yaralanma kriteri HIC, göğüs yaralanma kriteri THPC, C_{3ms} ve uyluk kemiği yaralanma kriteri FPC değerleri limitlerin altında kalmıştır. Ancak sürücü ve yolcu boyun korumasının geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 1. Kukla model yaralanma kriterleri simülatif ve kritik değerleri [3]

Yaralanma Kriterleri	Simülatif Değer	Kriter
HIC	664	≤ 1000
THPC	30 mm	≤ 50 mm
C_{3ms}	48 g	≤ 60 g
FPC	1,6 kN (sol) 1,13 kN (sağ)	≤ 10 kN

2. TEORİK ÖZET (THEORETICAL SUMMARY)

Bu bölümde yapılan analizlerin değerlendirmesine temel teşkil eden yaralanma kriterleri özetlenecektir. Yaralanma kriterlerine giriş yapmadan önce kısaltılmış yaralanma derecesi (AIS) üzerinde durulması önem arz etmektedir.

Otomotiv Tıbbi Gelişimi Derneği (AAAM) tarafından AIS, mevcut tıbbi terminoloji içerisinde uluslararası kabul görmüş bir yaralanma şiddeti derecelendirme aracı olarak tanımlanmaktadır. AIS, anatomiye dayalı vücudun değişik bölgelerindeki yaralanma şiddetini 1’den 6’ya kadar numaralandıran (1=en düşük, 6=en yüksek) küresel şiddet puanlama sistemidir. AIS, çarpışma sonucu yaralanan hastanın yaralanma şiddeti skoru (ISS) hesaplamasının temelidir [4].

AIS, yaralanmaları tanımlamak için standardize edilmiş bir terminoloji sağlar ve yaralanmaları şiddetine göre tasnif eder. AIS içinde her türlü sağlık ve araştırma kayıtları ileriye dönük olarak kodlanabilmektedir. AIS kodlarına, DSÖ Uluslararası Kökenli Hastalıkların Sınıflandırılması örneğinde olduğu gibi yaygın kullanılan hastalık ve yaralanma kodlarını haritalayan algoritmalar atanabilmektedir. Bu haritalamalardan bazıları travma kayıtlarına ve tıbbi kayıt yazılımlarına programlanmıştır. Bazıları da geliştiriciler tarafından sağlanmıştır [4].

Tablo 2’de AIS şiddet puanları yer almaktadır:

Tablo 2. AIS şiddet puanları [5]

AIS	Şiddet kodu
0	Yaralanma yok
1	Hafif
2	Orta
3	Ciddi
4	Ağır
5	Kritik
6	Maksimum (Ölümün kaçınılmaz olduğu)
9	Bilinmeyen

Ek Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu (SNPRM) tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tabloda her bir vücut bölümü için tavsiye edilen yaralanma kriteri ve kritik değerleri yer almaktadır.

Baş koruması için tavsiye edilen HIC [6-15], bütün kukla model büyüklükleri için uygun bir şekilde ölçeklendirilmiştir. SNPRM Nij 1,0 boyun kriteri, kritik değeri ile birlikte bütün kukla modeller için tavsiye edilmektedir.

Göğüs yaralanması olasılık oranlarının tahmininde kullanılan CTI [16-19] için tavsiye edilen göğüs sapması ve omurga ivmesi limit değerleri tavsiye edilmiştir. Uyluk kemiği yükü [20] ise sadece yetişkin kukla modeller için tavsiye edilmiştir [9].

Tablo 3. SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri [9]

Tavsiye edilen kriter	Büyük cüsseli erkek	Orta cüsseli erkek	Küçük cüsseli kadın	Çocuk (6 yaş)	Çocuk (3 yaş)	Bebek (1 yaş)
Baş kriteri: HIC ₁₅	700	700	700	700	570	390
Boyun kriteri: SNPRM Nij	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Kritik Değerler						
Çeki ve bası (N)	5440	4500	3370	2800	2120	1465
Bükülme (Nm)	415	310	155	93	68	43
Uzama (Nm)	166	125	62	39	27	17
Göğüs kriteri						
1. Omurga ivmesi (g)	55	60	60	60	55	50
2. Göğüs sapması (mm)	70	63	52	40	34	30
Alt uzuv kriteri						
Uyluk kemiği yükü (kN)	12,7	10,0	6,8	-	-	-

Bununla birlikte SNPRM tarafından önerilen kriterlere çeşitli dernekler, motorlar üreticileri tarafından çeşitli yorumlar yapılmıştır. Baş yaralanma kriteri (HIC) ile ilgili olarak Amerikan Tıp Asistanları Birliği (AAMA) öneride bulunmuştur. AAMA, Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenmiş olan 36 milisaniye HIC aralığı yerine Kanada Federal Motorlu Taşıt Güvenliği Standardında kullanılan 15 milisaniye aralığı ile değerlendirme yapılmasını önermiştir [9].

Ayrıca verileri analiz etmek için farklı bir istatistik tekniği ve değişik kukla model büyüklükleri için farklı ölçeklendirme tekniği önermiştir. AAMA tarafından önerilen HIC değerleri, NRPM tarafından önerilen değerler ile birlikte Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. AAMA ve NRPM tarafından önerilen baş yaralanma kriterleri [9]

Kukla model büyüklüğü	AAMA tavsiyesi HIC ₁₅	NRPM tavsiyesi HIC ₃₆
CRABI 12 aylık	390	660
HIII – 3 yaş	570	900
HIII – 6 yaş	723	1000
HIII – küçük cüsseli kadın	779	1000
HIII – orta cüsseli erkek	700	1000

Göğüs yaralanma kriteri ile ilgili olarak AAMA ve NRPM tarafından önerilen değerler ise Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. AAMA ve NRPM tarafından önerilen göğüs yaralanma kriterleri [9]

Kukla model	Göğüs sapması (mm)		Göğüs sapma oranı (m/s)		Göğüs ivmesi (g)	
	AAMA	NRPM	AAMA	NRPM	AAMA	NRPM
CRABI 12 aylık	31	37	7,6	-	50	40
HIII 3 yaş	36	42	8,0	-	55	50
HIII 6 yaş	40	47	8,5	-	60	60
HIII küçük cüsseli kadın	53	62	8,2	-	73	60
HIII orta cüsseli erkek	64	76	8,2	-	60	60

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, 2015 yılı TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları için imal edilen elektromobil aracın analizinde izlenen aşamalar üzerinde durulacaktır. Analize giriş yapılmadan önce imal edilen araç özellikleri hakkında bilgi verilmesi daha uygun olacaktır. Araç teknik özellikleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Araç teknik özellikleri [21]

Özellik	Birim	Değer
Uzunluk	mm	2916,5
Genişlik	mm	1240
Yükseklik	mm	1260

Tekerlek sayısı	adet	4
Şasi	malzeme	40x40 mm çelik profil
Ağırlık (pilotsuz)	kg	130
Kabuk	malzeme	karbon elyaf-epoksi kompozit şasi üstü kabuk gövde
Fren sistemi	hidrolik, disk, pabuç, ön, arka, el freni	ön, arka, el freni: hidrolik, disk ve kaliperli fren
Lastikler yarıçapı ön	mm	300
Lastikler genişliği ön	mm	85
Lastikler yarıçapı arka	mm	300
Lastikler genişliği arka	mm	85
Güneş paneli	tipi	yok
Güneş paneli verimliliği	%	-
Güneş paneli alanı	m ²	-
Güneş paneli gücü	Watt	-
Mppt	(var/yok); kendi tasarım, hazır ürün	yok
Telemetri	(var/yok); aktarılan bilgiler (hız, batarya durumu, sıcaklık vb.)	var (hız, sıcaklık, akım, voltaj)
Motor	tipi	fırçasız DC motor (BLDC) – kendi tasarım ve imalat
Motor sürücü	(var/yok); kendi tasarım, hazır ürün	var (hazır ürün)
Motor gücü	kW	1 kW x 2
Motor verimliliği	%	91
Motor ağırlığı	kg	4,5 x 2 = 9
Batarya	türü	Li-FePO ₄
Batarya nominal voltajı	Volt	48
Bataryanın maksimum voltajı	Volt	54
Nominal batarya gücü	Wh	1000
Yakıt pili gücü	kW	-
Hidrojen tüpü sayısı	#	-

Hidrojen tüpü basıncı	bar	-
-----------------------	-----	---

Aracın arka tekerleklerinde jant içi 2 adet elektrik motoru kullanılmıştır. Yarış takımının kendi tasarım ve imalatı olan fırçasız DC motorun özellikleri Tablo 7’de yer almaktadır.

Tablo 7. Fırçasız DC motor özellikleri [21]

Parametre	Değer
Anma çıkış gücü	1000 Watt
Anma gerilimi	48 Volt
Kutup sayısı	46
Stator oluk sayısı	51
Stator iç çapı	148 mm
Stator paket uzunluğu	25,8 mm
Stator sacı	M330-50A
Oluk başına sarım sayısı	12
Hava aralığı	1 mm
Rotor çeliği	St-37
Mıknatis kalınlığı	3,2 mm
Mıknatis malzemesi	NdFeB-N40SH (150 °C)
Toplam ağırlık	3,32 kg
Hava aralığı akı yoğunluğu	0,834 T
Vuruntu torku	0,0021 Nm
Ortalama giriş akımı	22,868 A
Spesifik elektrik yüklemesi	20,104 A/mm
Stator sargısı akım yoğunluğu	4,89 A/mm ²
Demir kaybı	53,677 W
Bakır kaybı	43,974 W
Toplam kayıplar	97,652 W
Verim, %	91,103 (Sürtünme ve rüzgar kayıpları hariç)
Anma hızı	452 d/d
Anma momenti	21,102 Nm
Sargı düzenlemesi	3 faz, 51 oluk tam kalıp sarım

Aracın imalatı tamamlanmış görüntüsü Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Aracın görüntüsü [21]

Analiz, aracın 7,1 m/s (25,56 km/h) hızla rijit bir duvara önden tam çarpışması durumu için yapılmıştır. ANSYS Workbench LS-DYNA yardımı ile yapılan analiz aşamaları detaylı olarak incelenecektir.

3.1. Analizde Kullanılan Model (Utilized Model in Analysis)

Analizi yapılan araç, Tablo 8’de adedi ve biçimi verilen parçalardan oluşmaktadır.

Tablo 8. Araç parçaları

No	Parça Adı	Parça Biçimi	Adet
1	Kabuk Kasa	Yüzey (Surface)	1
2	Destek Sacı	Yüzey (Surface)	1
3	İskelet Şasi	Katı (Solid)	1
4	Koltuk	Katı (Solid)	2
5	Amortisör	Katı (Solid)	4
6	Jant	Katı (Solid)	4
7	Lastik	Katı (Solid)	4

Araç parçalarından; iskelet şasi, destek sacı ve amortisörler yapı çeliği, kabuk kasa tek katmanlı dokuma karbon epoksi kompozit, koltuklar anizotropik silikon, jantlar alüminyum, lastikler kauçuk malzeme olarak aslına uygun tanımlanmıştır. Analizi tamamlayıcı parçalardan duvar ve zemin yapı çeliği olarak tanımlanmıştır. Analizde kullanılan izotropik elastik, anizotropik elastik, ortotropik malzemeler ve mekanik özellikleri Tablo 9-11 arasında gösterilmiştir.

Tablo 9. İzotropik elastik malzeme parametreleri

Malzeme Özellikleri	Yapı Çeliği	Alüminyum	Lastik
Yoğunluk [kg/m ³]	7850	2770	2768
Young modülü [Pa]	2,1E11	7,1E10	6,9E9
Poisson oranı	0,3	0,33	0,49
Kayma modülü [Pa]	7,69E10	2,67E10	2,31E9
Bulk modülü [Pa]	1,67E11	6,96E10	1,15E11

Tablo 10. Anizotropik elastik malzeme parametreleri

Malzeme Özellikleri	Silikon					
Yoğunluk [kg/m ³]	2330					
Anizotropik elastisite	166E3					
	64E3	166E3				
Young modülleri [MPa]	64E3	64E3	166E3			
	0	0	0	80E3		
	0	0	0	0	80E3	
	0	0	0	0	0	80E3

Tablo 11. Ortotropik malzeme parametreleri

Malzeme Özellikleri	Dokuma Karbon Epoksi Kompozit
Yoğunluk [kg/m ³]	2330
Ortotropik elastisite	
X yönündeki young modülü [MPa]	59160
Y yönündeki young modülü [MPa]	59160
Z yönündeki young modülü [MPa]	7500
XY poisson oranı	0,04
YZ poisson oranı	0,3
XZ poisson oranı	0,3
XY kayma modülü [MPa]	17500
YZ kayma modülü [MPa]	2700
XZ kayma modülü [MPa]	2700
Ortotropik gerilme limitleri	
X yönündeki çekme [MPa]	513
Y yönündeki çekme [MPa]	513
Z yönündeki çekme [MPa]	50
X yönündeki basma [MPa]	-437
Y yönündeki basma [MPa]	-437
Z yönündeki basma [MPa]	-150
XY yönündeki kayma [MPa]	120
YZ yönündeki kayma [MPa]	55
XZ yönündeki kayma [MPa]	55

3.2. Model Ağ Yapısı ve Başlangıç Koşullarının Oluşturulması (Creation of Model Mesh and Initial Conditions)

Modelin, sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilebilmesi için uygun bir ağ yapısı (mesh) oluşturulması gerekmektedir. Ağ yapısı oluşturmadan önce tanımlanan değerler Tablo 12’de gösterilmektedir.

Tablo 12. Tanımlanan değerler

Seçenek	Varsayılanlar	
1	Fiziksel referans	Eksplisit
2	Eleman düzeni	Lineer
3	Eleman boyutu	Varsayılan
Seçenek	Boyutlandırma	
1	Uyarlanabilir boyutlandırma kullanımı	Evet
2	Çözünürlük	5
3	Ağ yapısı düzeltilmesi	Evet
4	Düzeltilme boyutu	Varsayılan
5	Geçiş	Yavaş
6	Yayıma açısı merkezi	Kaba
7	Başlangıç tane boyutu	Montaj
Seçenek	Kalite	
1	Ağ yapısı kalitesini kontrol et	Evet, hatalar ile
2	Hedef kalite	Varsayılan (0,050000)
3	Yumuşatma	Yüksek
4	Ağ yapısı metriği	Hiçbiri
Seçenek	Şişirme	
1	Otomatik şişirme kullan	Hiçbiri
2	Şişirme seçeneği	Yumuşak geçiş
3	Geçiş oranı	0,272
4	Maksimum tabaka	5
5	Büyüme oranı	1,2
6	Şişirme algoritması	Ön
7	Gelişmiş seçenekleri göster	Hayır
Seçenek	Gelişmiş	
1	Paralel parça ağ yapısı oluşturmak için CPU sayısı	Program kontrollü
2	Yeniden denemelerin sayısı	0
3	Rijit cisim davranışı	Tamamen ağ yapısı
4	Rijit yüz ağ yapısı	Dörtgen/üçgen

5	Üçgen yüzey ağ yapıcı	Program kontrollü
6	Topoloji kontrolü	Hayır

Fiziksel olarak hareket etmesi gereken araç ve parçalarına başlangıç koşulları alt başlığı ile öteleme ve/veya dönme hızı verilmesi gerekmektedir. Aracın bütün parçaları için sabit 7,1 m/s (25,56 km/h) hız değeri, lastik ve jant parçalarına ise ilaveten 23,665 rad/s (225,98 rpm) dönme hız değeri tanımlanmıştır.

4. BULGULAR (FINDINGS)

Analizde, 6 farklı durum için kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde çarpışma etkisiyle oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerleri incelenecektir. Tablo 13'te analizi yapılacak olan durumlar gösterilmektedir.

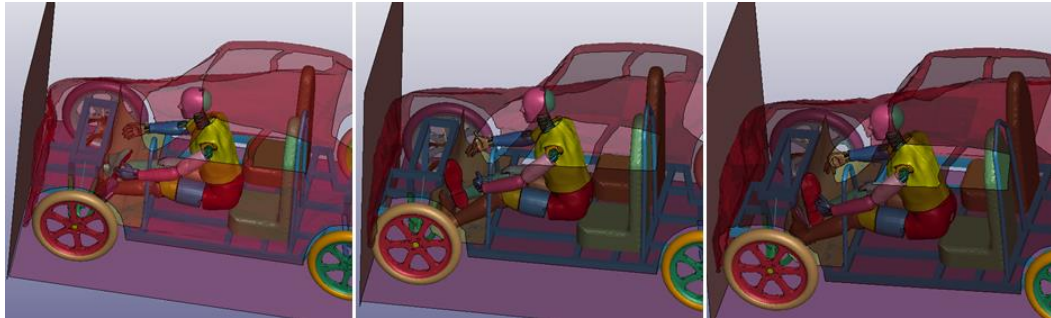
Tablo 13. Analiz senaryoları

No	Emniyet Kemeri Durumu	Yapı Çeliği Elemanları Durumu
1	Yok	Elastik
2	Yok	Plastik
3	Yok	Mukavim Plastik
4	Var	Elastik
5	Var	Plastik
6	Var	Mukavim Plastik

Baş yaralanması durumu için baş yaralanma kriteri (HIC – Head Injury Criteria), göğüs yaralanması durumu için ise göğüs şiddet indeksi (CSI – Chest Severity Index) ve göğüs sapması parametreleri elde edilecektir. Uyluk kemikleri aksenal kuvvet grafikleri ile birlikte olası yaralanma durumları tespit edilebilecektir. HIC, CSI ve uyluk kemikleri grafiklerinin elde edilmesinde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Channel Frequency Class (CFC) filtresi ile benzer olan LS-PrePost SAE filtresi (108 Hz) kullanılmıştır.

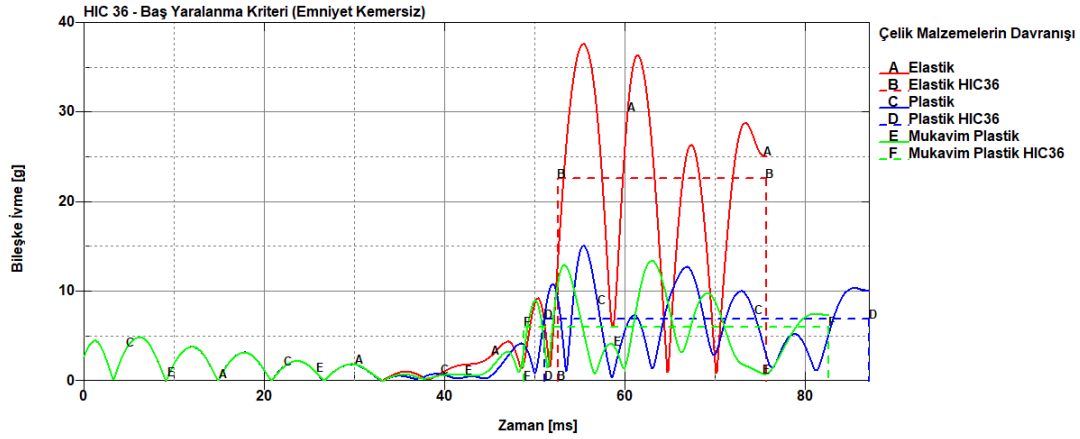
4.1. Emniyet Kemersiz Durumlar için Bulgular (Findings for Cases without Seat Belt)

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 75,7487 ms sürmüştür. Plastisite özelliği sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 87,1227 ms sürmüştür. Mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm ise 82,6882 ms sürmüştür.



Şekil 7. Emniyet kemersiz durumlar için kukla modelin görünümüleri (Soldan sağa: elastik Model, plastik model, mukavim plastik model)

Görsellerden de anlaşılacağı üzere tüm modeller için (Elastik, Plastik ve Mukavim Plastik) emniyet kemeri tanımlanmadığından dolayı kukla modellerin ayak kısımları destek sacı parçasına çarparak kırılmış ve ayak bilekleri ters dönmüştür. Elastik, plastik ve mukavim plastik özellikleri sergileyen malzeme parametresi atanan modeller için elde edilen baş yaralanma kriteri değerleri Şekil 8’de gösterilmektedir.



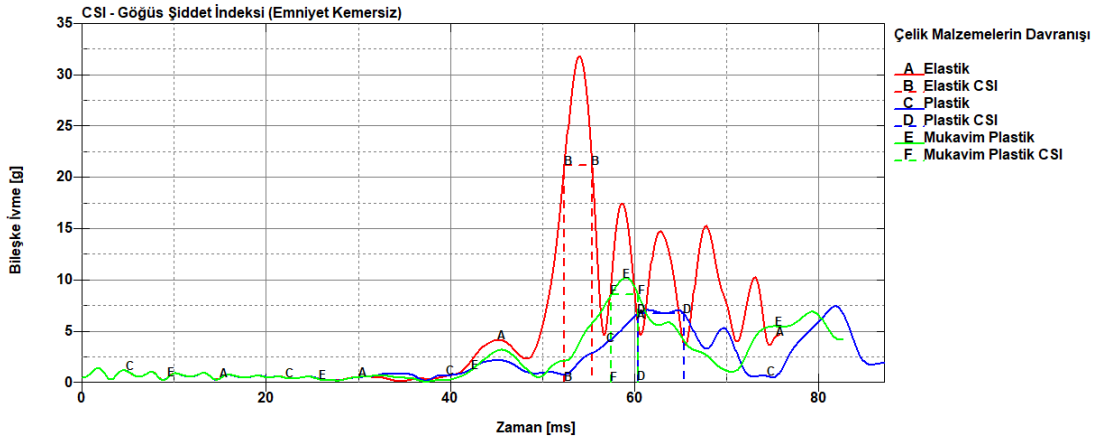
Şekil 8. Tüm modeller için baş yaralanma kriter değerleri

Elastik malzeme analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için değerler incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55,4 ms anında 37,7 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 209,1 olduğu görülmektedir.

Tablo 3’te belirtildiği üzere orta büyüklükteki Hibrit III erkek kukla model için 1000 HIC₃₆ değeri NRPM tarafından kritik sınır değer olarak önerilmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 210 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %2,87’dir.

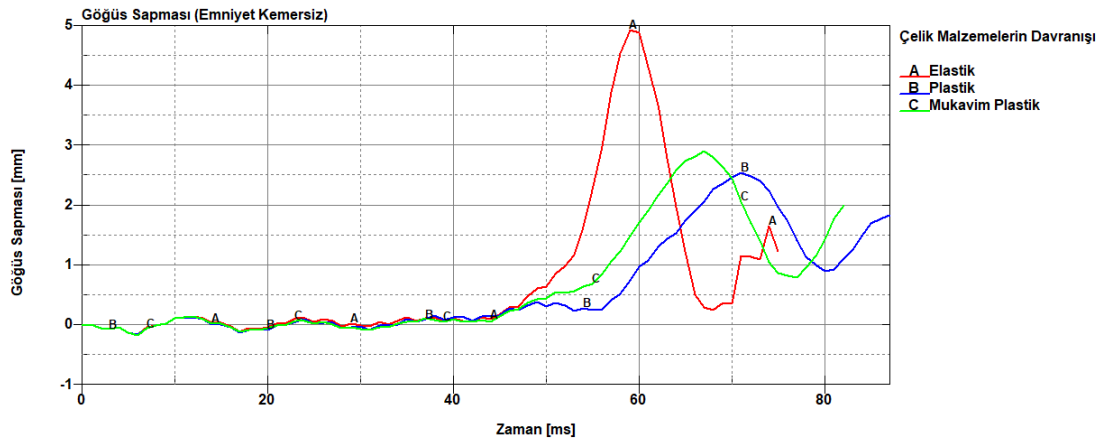
Plastik malzeme analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55,4 ms anında 15,2 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 169,9 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. 170 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %1,54’tür.

Mukavim plastik analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 63 ms anında 13,4 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 168,7 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 169 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %1,5’tir.



Şekil 9. Tüm modeller için CSI (Chest severity index) değerleri

Şekil 9 incelendiğinde, elastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 54 ms anında 31,9 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 21,22 g büyüklüğündedir. Plastik analiz sonucunda göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 81,8 ms anında 7,47 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 6,782 g büyüklüğündedir. Mukavim plastikte ise maksimum bileşke ivmenin 59 ms anında 10,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 8,602 g büyüklüğündedir.



Şekil 10. Tüm modeller için göğüs sapmaları

Şekil 10'daki göğüs sapmaları incelendiğinde elastik durumda maksimum sapmanın 59 ms anında 4,94 mm, plastikte 71 ms anında 2,56 mm, mukavim plastik için ise 67 ms anında 2,91 mm olduğu anlaşılmaktadır.

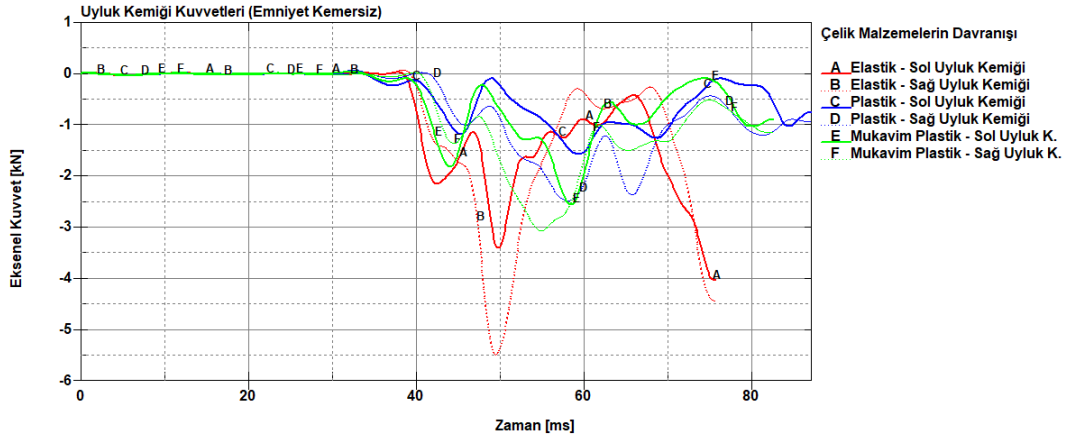
Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 3 ms aralığında 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) göğüs yaralanması riski %4,08'dir.

Plastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) göğüs yaralanması riski %1,42'dir.

Mukavim plastikte FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %94,68'dir.

Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) göğüs yaralanması riski %1,63'dür.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan aksenal kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 11'de yer almaktadır.



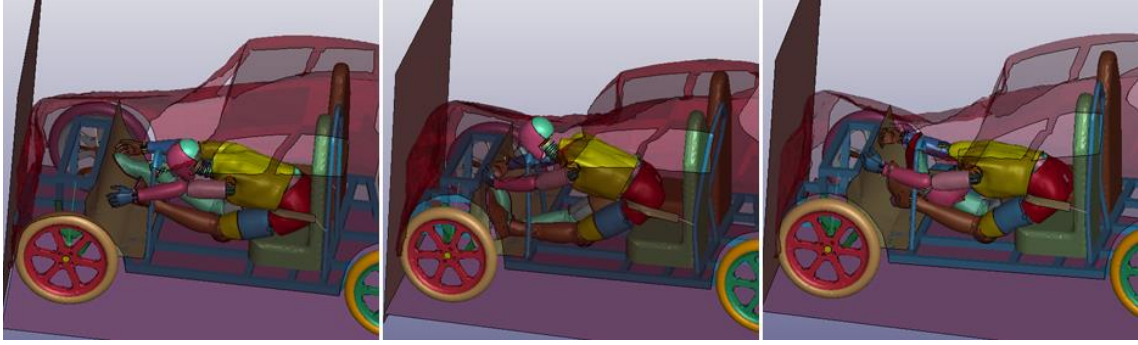
Şekil 11. Tüm modeller için zamana göre aksenal uyluk kuvvetleri

Sağ ve sol uyluk kemikleri için, tüm durumlarda kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 40 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve elastikte sağ uyluk kemiği için 49,5 ms anında 5,48 kN, sol uyluk kemiği için ise 75,7 ms anında 4,02 kN maksimum bası kuvveti oluşmaktadır. Plastikte sağ uyluk kemiği için 58,1 ms anında 2,47 kN, sol uyluk kemiği için ise 59,3 ms anında 1,56 kN, mukavim plastik için ise sağ uyluk kemiği için 54,9 ms anında 3,06 kN, sol uyluk kemiği için ise 58,5 ms anında 2,55 kN maksimum bası kuvvetleri oluşmaktadır.

Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN aksenal kuvvet sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastikte belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %35,46'dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri aksenal kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %4,98 ve %2,40'dır. Plastikte bu değerler uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %35,46'dır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %1,09 ve %0,68'dir. Mukavim plastikte ise uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre olasılık ($AIS \geq 2$) %35,46'dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri aksenal kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %1,47 ve %1,13'dür.

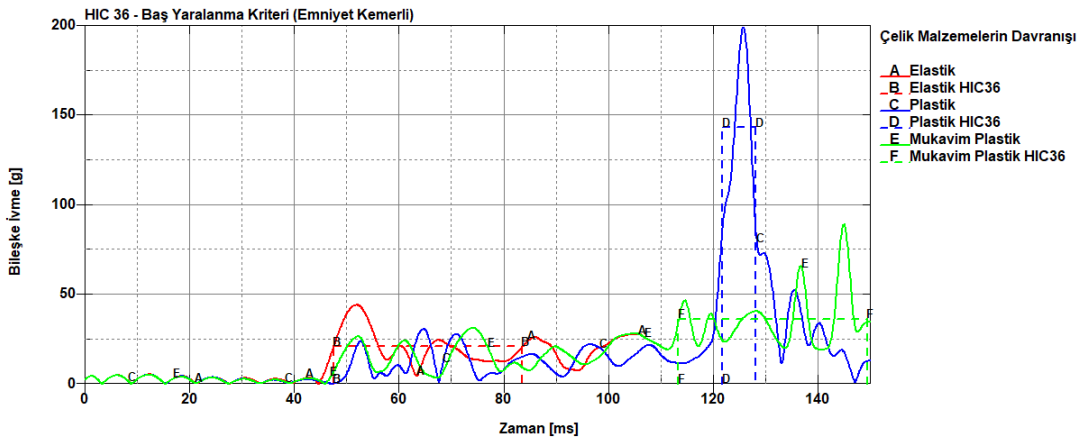
4.2. Emniyet Kemerli Durumlar için Bulgular (Findings for Cases with Seat Belt)

Emniyet kemeri takılan modelde, şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 106,33 ms sürmüştür. Plastisite özelliği sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 150 ms sürmüştür. Mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm de aynı şekilde 150 ms sürmüştür.



Şekil 12. Emniyet kemerli durumlar için kukla modelin görünüşleri (Soldan sağa: elastik model, plastik model, mukavim plastik model)

Emniyet kemerli modellerin hiçbirinde önceki modellerde olduğu üzere kırılma/bilek dönmesi vs. bulgulara rastlanmamış ve tüm modeller sorunsuz çalışmıştır. Emniyet kemerli durumlar için elastik, plastik ve mukavim plastik özellikleri sergileyen malzeme parametresi atanan modeller için elde edilen baş yaralanma kriteri değerleri Şekil 13'de gösterilmektedir.



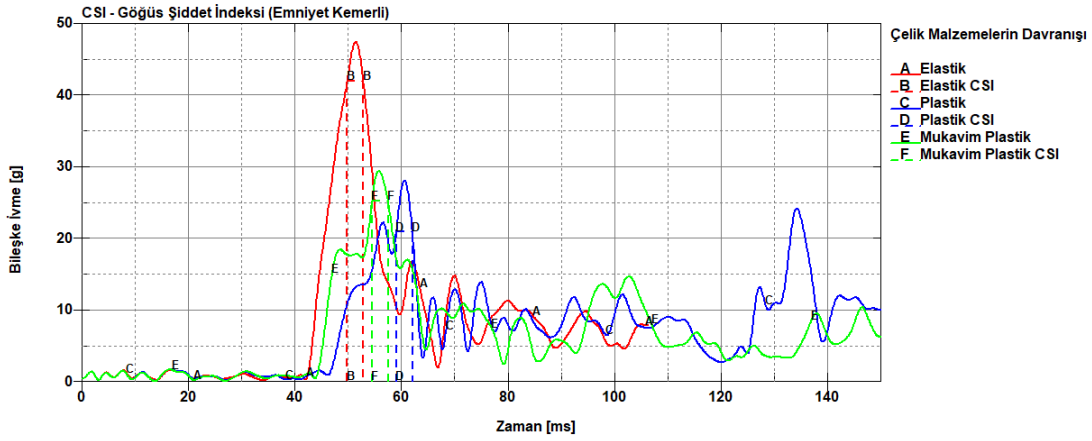
Şekil 13. Tüm modeller için baş yaralanma kriter değerleri (Emniyet kemerli)

Elastik malzeme analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için değerler incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 51,9 ms anında 44,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 220,8 olduğu görülmektedir.

Tablo 3'te belirtildiği üzere orta büyüklükteki Hibrit III erkek kukla model için 1000 HIC₃₆ değeri NRPM tarafından kritik sınır değer olarak önerilmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 221 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %3,22'dir.

Plastik malzeme analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 126 ms anında 200 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 1355 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde 1355 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerin üstünde kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %61,41'dir.

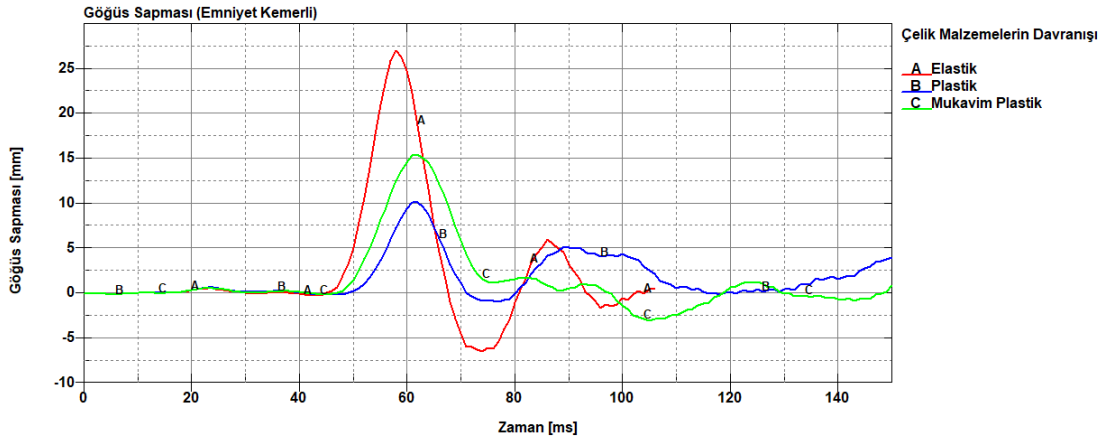
Mukavim plastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 145 ms anında 89,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 382,6 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 383 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %11,51'dir.



Şekil 14. Tüm modeller için CSI (Chest severity index) değerleri (Emniyet kemerli)

Şekil 14 incelendiğinde, elastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 51,4 ms anında 47,6 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 42,11 g büyüklüğündedir. Plastik analiz sonucunda göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 60,6 ms anında 28,2 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 21 g büyüklüğündedir.

Mukavim plastikte ise maksimum bileşke ivmenin 55,8 ms anında 29,5 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 25,33 g büyüklüğündedir.



Şekil 15. Tüm modeller için göğüs sapmaları (Emniyet kemerli)

Şekil 15'deki göğüs sapmaları incelendiğinde elastik durumda maksimum sapmanın 58 ms anında 27,06 mm, plastikte 61 ms anında 10,19 mm, mukavim plastik için ise 62 ms anında 15,49 mm olduğu anlaşılmaktadır.

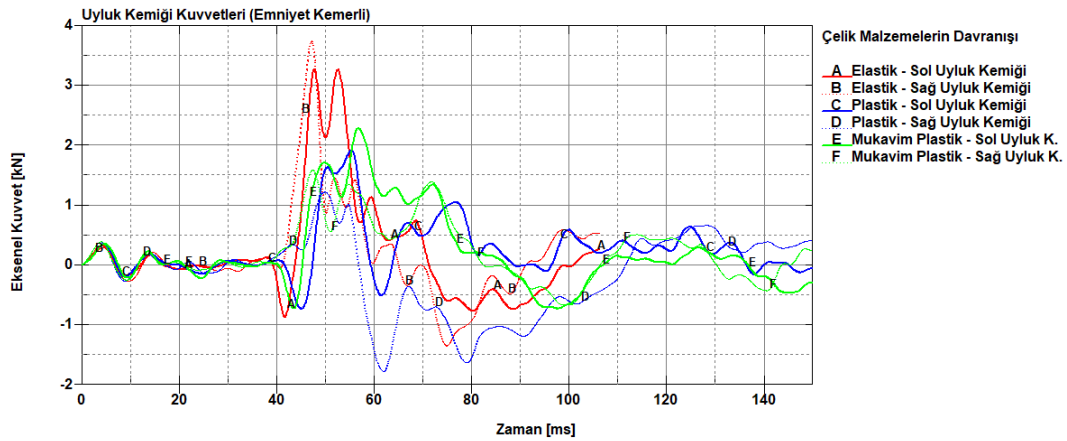
Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için göğüs yarananma kriterleri olarak 3 ms aralığında 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) göğüs yarananması riski %39,24'tür.

Plastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) göğüs yarananması riski %5,51'dir.

Mukavim plastikte FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) %94,68'dir.

Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) göğüs yarananması riski %9,62'dir.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan aksenal kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 16'da yer almaktadır.



Şekil 16. Tüm modeller için zamana göre eksenel uyluk kuvvetleri (Emniyet kemerli)

Sağ ve sol uyluk kemikleri için, tüm durumlarda kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 40 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve elastikte Sağ uyluk kemiği için 47,2 ms anında 3,75 kN, sol uyluk kemiği için ise 47,7 ms anında 3,28 kN maksimum çeki kuvvetleri oluşmaktadır. Plastikte sağ uyluk kemiği için 62 ms anında 1,77 kN bası, sol uyluk kemiği için ise 55,3 ms anında 1,93 kN, mukavim plastikte sağ uyluk kemiği için 47,4 ms anında 1,6 kN çeki, sol uyluk kemiği için ise 56,7 ms anında 2,29 kN çeki maksimum kuvvetleri oluşmaktadır.

Tablo 2’de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastikte belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %35,46’dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %2,09 ve %2,73’tür.

Plastikte bu değerler uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %35,46’dır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %0,76 ve %0,82’dir. Mukavim plastikte ise uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre olasılık (AIS≥ 2) %35,46’dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %0,69 ve %0,99’dur.

4.3. Sonuçların Doğrulaması (Verification of the Results)

Bu bölümde, sonuçları elde edilen 6 farklı durumun doğrulaması yapılacaktır. Doğrulama, kinetik ve toplam enerji dengesi üzerinden yapılacaktır. Analizlerde yapılan çözümün doğruluğunun kontrolünün sağlanması için toplam enerji verisi kullanılabilir. Toplam enerji dengesi eşitliği, icra edilen simülasyonun hassasiyetinin tespit edilmesinde kullanılır:

$$\underbrace{E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg}}_{E_{total}} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan;

E_{kin} , kinetik enerjiyi (kinetic energy)

E_{int} , iç enerjiyi (internal energy)

E_{si} , kayan ara yüzey enerjisini (sliding interface energy)

E_{rw} , sert duvar enerjisini (rigid wall energy)

E_{damp} , sönümlenme enerjisini (damping energy)

E_{hg} , kum saati enerjisini (hourglass energy)

E_{kin}^0 , ilk kinetik enerjisi (initial kinetic energy)

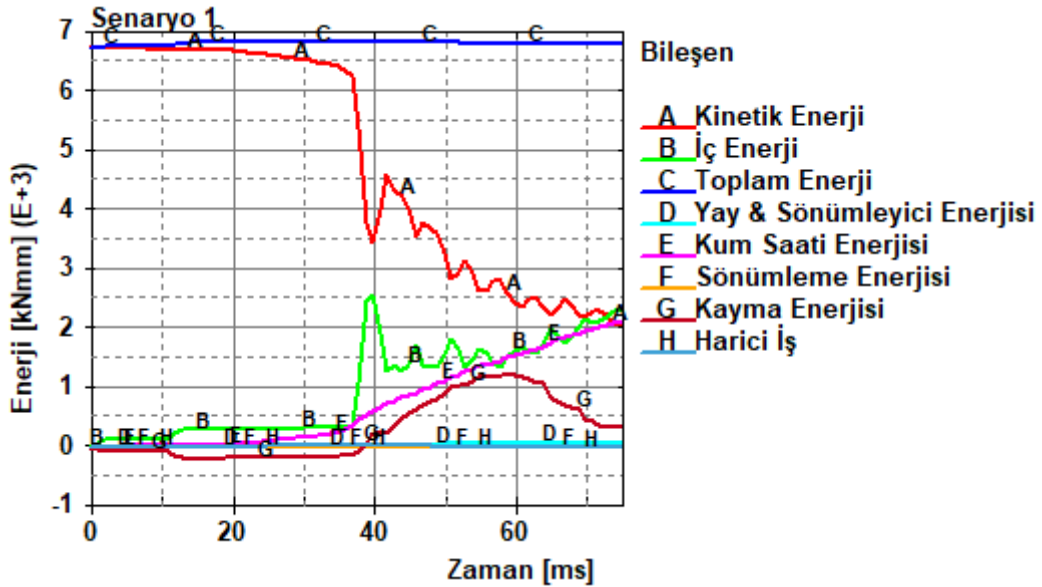
E_{int}^0 , ilk iç enerjisi (initial internal energy)

W_{ext} , harici işi (external work)

E_{total} ise toplam enerjisi (total energy) ifade etmektedir.

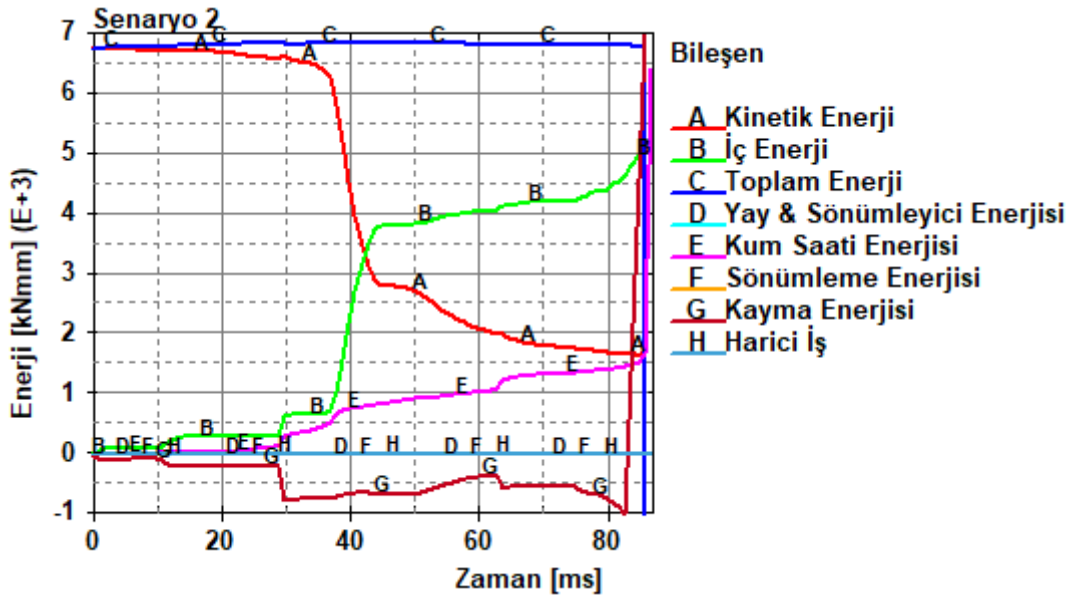
Yukarıdaki eşitlik, sisteme giren işin, yapılan işe eşit olduğunu göstermektedir. Denklemden oluşabilecek herhangi bir eşitsizlik analizin hatalı olduğunu gösterecektir. Analizi yapılan 6 farklı durum için enerji grafikleri elde edilerek toplam enerji kontrolü yapılacaktır. Analiz başlangıcı ve sonundaki toplam enerji değerleri ile yüzdelik enerji değişimleri elde edilecektir.

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 17’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde $t = 0$ ms ile $t = 75$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,79 olarak hesaplanmıştır.



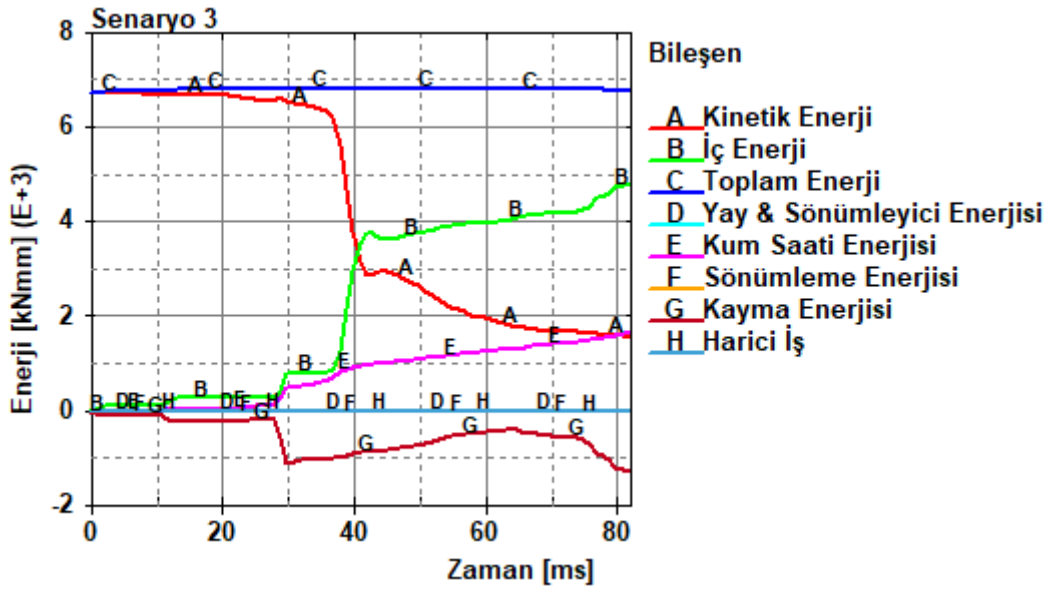
Şekil 17. Durum 1 için enerji dengesi

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 18’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Durum 2’nin çözüm sonunda kukla modelin sağ ayak kısmı destek sacı parçasına çarpmaktadır. Çarpmanın etkisi ile kukla modelin sağ ayak kısmı elemanları negatif hacimden dolayı aşınmaya (erode) başlamıştır. Aşınmanın başladığı andan itibaren enerji değerleri pik değere ulaşmış ve kararsız olmaya başlamıştır. Bu yüzden aşınma başlamadan önceki toplam enerji dikkate alınarak doğrulama yapılmıştır. Bu itibarla $t = 0$ ms ile $t = 86$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,56 olarak hesaplanmıştır.



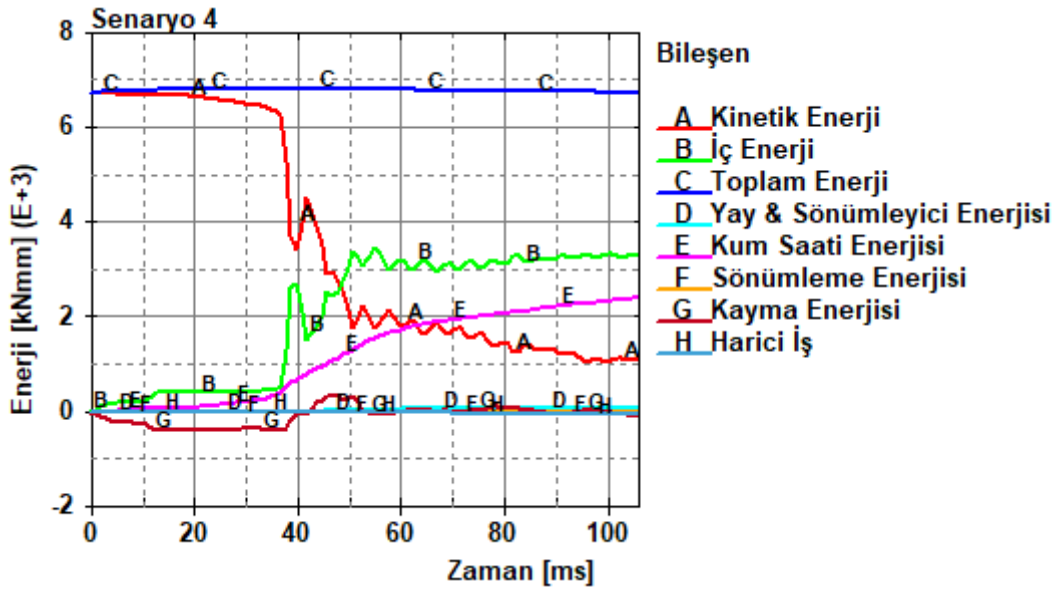
Şekil 18. Durum 2 için enerji dengesi

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 19'da gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde $t = 0$ ms ile $t = 82$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,92 olarak hesaplanmıştır.



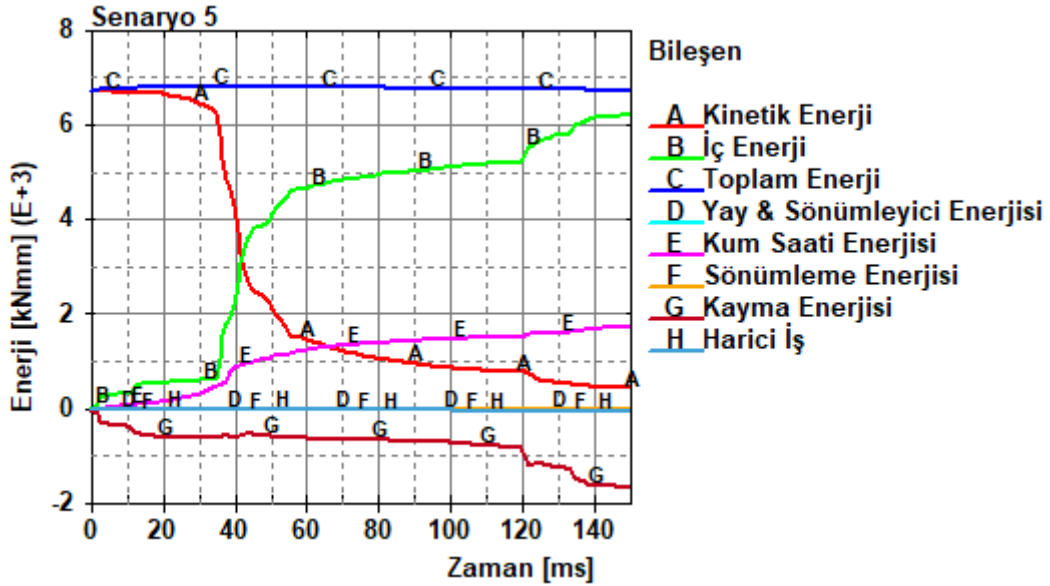
Şekil 19. Durum 3 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 20'de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde $t = 0$ ms ile $t = 106$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,28 olarak hesaplanmıştır.



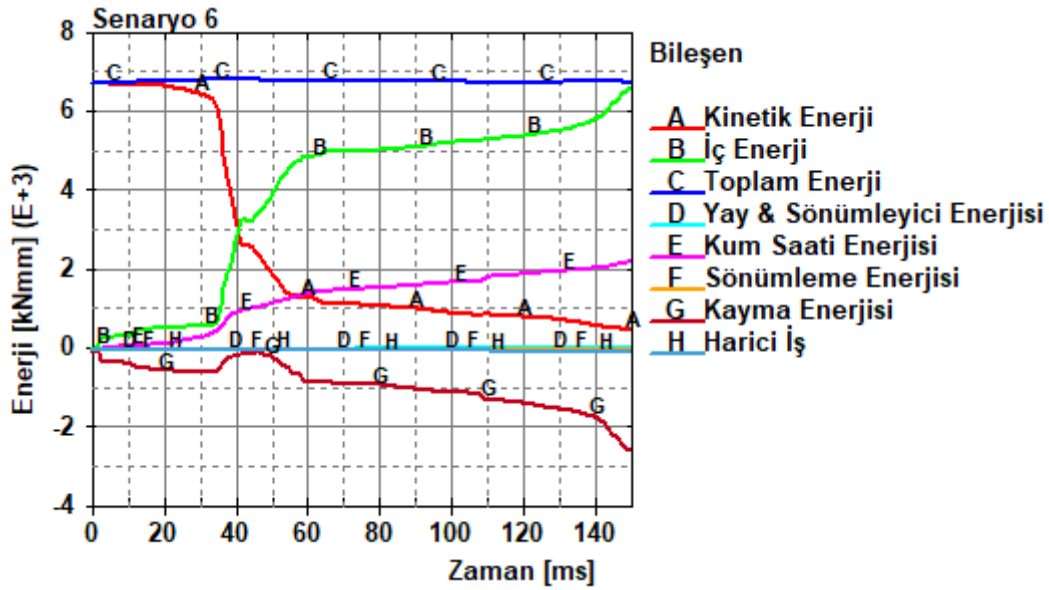
Şekil 20. Durum 4 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 21’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde $t = 0$ ms ile $t = 150$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 21. Durum 5 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 22’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde $t = 0$ ms ile $t = 150$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,35 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Durum 6 için enerji dengesi

Tüm analiz durumlarında aracın ilk hızı 7,1 m/s (7,1 mm/ms) idi. Bununla birlikte araç ana bileşenleri üzerinde araç kütlelerini arttıracak bir değişken kullanılmamıştır. Şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının yalnızca mukavemetleri ile ilgili parametreleri değiştirilmiştir. Emniyet kemeri tanımlanan analizlerde, emniyet kemeri kayda değer bir kütle artışına sebebiyet vermeyecektir.

Emniyet kemersiz modellerin analizlerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde başlangıç kinetik enerjilerinin $6,76425 \times 10^3$ kNmm olduğu görülmektedir.

Emniyet kemerli modellerin analizlerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde ise başlangıç kinetik enerjilerinin $6,76442 \times 10^3$ kNmm olduğu görülmektedir.

Buna göre emniyet kemerinin oluşturduğu başlangıç kinetik enerji değerinin $1,69922 \times 10^{-1}$ kNmm olduğu anlaşılabilmektedir.

Emniyet kemerli ve kemersiz analiz modellerinin başlangıç kinetik enerji değerlerinin birbirine eşit olması analizlerin doğru kurgulandığının bir göstergesidir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu bölümde, 6 farklı durum için yapılan çarpışma analizlerinin sonuçlarının, bir birbirleri ile karşılaştırılmasının yapılması sureti ile çeşitli değerlendirmelerde bulunulacaktır. Sonuçların daha rahat değerlendirilebilmesi amacı ile aşağıda yer alan Tablo 14 oluşturulmuştur.

Tablo 14. Tüm durumlar için parametreler

Sıra	Durum	Analiz Süresi (ms)	HIC	3 ms Aralıkta Maksimum Göğüs İvmesi (g)	Göğüs Sapması (mm)	Sağ/Sol Uyluk Kemikleri Maksimum Kuvveti (kN)
1	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği elastik	75,7487	209,1	21,22	4,94	-5,48/-4,02

2	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği plastik	87,1227	169,9	6,78	2,56	-2,47/-1,56
3	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği mukavim plastik	82,6828	168,7	8,60	2,91	-3,06/-2,55
4	Emniyet kemerli, Yapı çeliği elastik	106,33	220,8	42,11	27,06	3,75/3,28
5	Emniyet kemerli, Yapı çeliği plastik	150	1355	21	10,19	-1,77/1,93
6	Emniyet kemerli, Yapı çeliği mukavim plastik	150	382,6	25,33	15,49	1,6/2,29

Analizi yapılan 6 durum için ilk dikkat çeken husus emniyet kemeridir. Emniyet kemeri olmayan modellerde, kukla modelin ayakları direk olarak destek sacına çarparak çok büyük kuvvet ve momentlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durumda ayaklar çok ciddi hasar almış, ayak bilekleri ters dönmüş ve çözüme devam edilememiştir. Kukla modellerin eylemsizliğini koruduğu emniyet kemersiz modellerde, baş ve göğüs zorlanma parametrelerinin emniyet kemerli modellere nazaran daha küçük kaldığı görülmektedir. Uyluk kemiği kuvvetleri ise emniyet kemerinin olmamasından dolayı aynı malzeme parametresine sahip modeline göre daha büyük çıkmıştır.

Çözümün devam ettiği varsayıldığında emniyet kemersiz modellerde, manken modelin araçtan dışarı fırlayarak ciddi yaralanma riskine maruz kalacağı tahmin edilebilmektedir. Tüm durumlar için inceleme yapıldığında ise 5 numaralı durum için yüksek oranda kafa travması ihtimali bulunduğu görülmektedir. Emniyet kemeri incelemesinin ardından aracın yapı çeliği parçalarının malzeme özelliği ve dayanımı hakkında değerlendirme yapılabilir. Analiz süresinin, tüm durumlar için aynı olmamasından dolayı 75 ms anındaki parametrelerin referans alınması sureti ile değerlendirme yapılması daha uygun olacaktır. Tablo 15'te 75 ms anında tüm durumlar için baş, göğüs ve uyluk kemikleri değerlere yer almaktadır.

Tablo 15. Tüm durumlar için parametreler (75 ms)

Sıra	Durum	Bileşke Baş İvmesi (g)	Bileşke Göğüs İvmesi (g)	Göğüs Sapması (mm)	Sağ/Sol Uyluk Kemikleri Maksimum Kuvveti (kN)
1	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği elastik	37,7	31,9	1,23	-5,48/-3,94
2	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği plastik	15,2	7,1	1,98	-2,47/-1,56
3	Emniyet kemersiz, Yapı çeliği mukavim plastik	13,4	10,3	0,87	-3,06/-2,55
4	Emniyet kemerli, Yapı çeliği elastik	44,3	47,6	-6,07	3,75/3,28
5	Emniyet kemerli,	30,9	28,2	-7,23	-1,77/1,93

	Yapı çeliği plastik				
6	Emniyet kemerli, Yapı çeliği mukavim plastik	31,4	29,5	1,27	1,6/2,29

Sunulan veriler ışığında, ilk dikkat çeken durum emniyet kemersiz modellerde baş ve göğüs yaralanma parametrelerinin, emniyet kemerli modellere nazaran daha düşük çıkmasıdır.

Başlangıçta emniyet kemersiz modellerin daha güvenli olduğu algısı veren bu duruma aslında emniyet kemerinin hayat kurtarıcı özelliği neden olmaktadır. Emniyet kemerli modellerdeki kukla model zorlanmaları, emniyet kemerinin kukla modelin eylemsizliğini yenmesi neticesinde fazla çıkmıştır. Emniyet kemersiz modellerde ise kukla model eylemsizliğini koruyarak aracın ön tarafına doğru hareketini sürdürmüştür. Bu yüzden baş ve göğüs zorlanma parametreleri emniyet kemerli modellerdekine göre düşük çıkmıştır.

Emniyet kemeri durumuna göre uyluk kemiği zorlanmaları incelendiğinde ise emniyet kemersiz modellerdeki uyluk kemiği zorlanmalarının, emniyet kemerli eş modellere göre biraz daha büyük çıktığı görülmektedir. Bu duruma ayak kısmının araç destek sacına çarpması neden olmuştur. Tüm durumlar incelendiğinde yapı çeliği elastiki özelliğe sahip modellerdeki baş, göğüs ve uyluk kemikleri zorlanmaları, plastiki parametrelere sahip modellere göre daha büyük çıkmıştır. Bu duruma elastiki parametrelere sahip çeliğin üzerindeki enerjiyi atamaması sonucu manken modele olumsuz etki oluşturmasının neden olduğu tahmin edilmektedir.

Elastik parametrenin bir olumsuzluğu da emniyet kemerli modeller incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Emniyet kemerli ve araç yapı çeliği malzemelerine elastiki parametreler atanan modelin çözümü, 106,33 ms anında sonlanmıştır. Halbuki plastiki ve mukavim plastiki parametrelere sahip modellerde çözüm sorunsuz olarak tamamlanmıştır. Üzerindeki enerjiyi plastik deformasyon ile üzerinden atamayan şasinin ön koruyucu çubuk kısmı, kukla modelin sol ayak uzvu ile temas ederek çözümü kararsızlaştırmıştır. Aracın, plastik deformasyona sahip olan modelleri kıyaslandığında ise mukavim plastiki parametrelere sahip modellerde, plastiki parametrelere sahip modellere nazaran baş zorlanmaların biraz daha düşük ve yakın değerde olduğu, bileşke göğüs ivmelerinin biraz yüksek olduğu, göğüs sapmalarının ise düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte uyluk kemikleri aksel zorlanmaları incelendiğinde emniyet kemersiz modeller için mukavim plastiki parametrelere sahip modeldeki zorlanma, plastiki parametrelere sahip modeldekine göre fazladır. Emniyet kemerli model incelendiğinde ise sağ ve sol uyluk kemikleri zorlanmaları, plastiki veya mukavim plastiki parametrelere sahip modeller için değişiklik göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Ambati, K.V.N.S. Srikanth, P. Veeraraju, Simulation of Vehicular Frontal Crash-Test, Int. J. Appl. Res. Mech. Eng. (2012) 2231–5950. doi:10.13140/RG.2.2.11183.38560.
- [2] L. Berzi, N. Baldanzini, D. Barbani, M. Delogu, R. Sala, M. Pierini, Simulation of Crash Events for an Electric Four Wheel Vehicle, Procedia Struct. Integr. 12 (2018) 249–264. doi:10.1016/j.prostr.2018.11.090.
- [3] G. Zhao, L. Xie, Y. Guo, J. Li, Analysis and Evaluation on the Rear-End Crash of the Car with a Dummy, in: 2009 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom., IEEE, 2009: pp. 475–478. doi:10.1109/ICMTMA.2009.385.
- [4] AAAM, The Abbreviated Injury Scale (AIS), <https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/> (Erişim tarihi: 19 Mayıs 2019).
- [5] EEVC Working Group 14 Report, Development of Test Procedure for Energy-absorbing Front Underrun Protection Systems for Trucks, 1996.

- [6] B. McHenry, Head Injury Criterion and the ATB, ATB Users' Gr. (2004) 1–8.
- [7] C.W. Gadd, Criteria for Injury Potential, in: Impact Accel. Stress Symp., National Academy of Science, Washington DC, 1962: pp. 141–144.
- [8] J. Versace, A Review of the Severity Index, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1971. doi:10.4271/710881.
- [9] R. Eppinger, E. Sun, F. Bandak, M. Haffner, N. Khaewpong, M. Maltese, S. Kuppa, T. Nguyen, E. Takhounts, R. Tannous, A. Zhang, R. Saul, Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems–II, Natl. Highw. Traffic Saf. Adm. (1999). doi:10.1080/08993408.2013.838066.
- [10] P. Prasad, H.J. Mertz, The Position of the United States Delegation to the ISO Working Group 6 on the Use of HIC in the Automotive Environment, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1985. doi:10.4271/851246.
- [11] V.R. Hodgson, L.M. Thomas, Breaking Strength of the Human Skull Versus Impact Surface Curvature, Wayne State Univ. (1977).
- [12] V.R. Hodgson, L.M. Thomas, J. Brinn, Concussion Levels Determined by HPR Windshield Impacts, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1973. doi:10.4271/730970.
- [13] C. Got, A. Patel, A. Fayon, C. Terrière, G. Walfisch, Results of Experimental Head Impacts on Cadavers: The Various Data Obtained and Their Relations to Some Measured Physical Parameters, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1978. doi:10.4271/780887.
- [14] C. Terriere, G. Walfisch, A. Fayon, C. Got, F. Guillon, A. Patel, J. Bureau, Acceleration, Jerk and Neck Flexion Angle: Their Respective Influences on the Occurrence of Brain Injury, ISO, TC 22, SC 12, GT-6 (USA-13), Doc. No. 118. (1982).
- [15] E. Hertz, A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture, Assoc. Adv. Automot. Med. (1993).
- [16] V.K. Lau, D.C. Viano, Influence of impact velocity and chest compression on experimental pulmonary injury severity in rabbits, J. Trauma - Inj. Infect. Crit. Care. (1981). doi:10.1097/00005373-198112000-00003.
- [17] J.D. Horsch, J.W. Melvin, D.C. Viano, H.J. Mertz, Thoracic Injury Assessment of Belt Restraint Systems Based on Hybrid III Chest Compression, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1991. doi:10.4271/912895.
- [18] J.Y. Foret-Bruno, F. Hartemann, C. Thomas, A. Fayon, C. Terrière, C. Got, A. Patel, Correlation Between Thoracic Lesions and Force Values Measured at the Shoulder of 92 Belted Occupants Involved in Real Accidents, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1978. doi:10.4271/780892.
- [19] N. Yoganandan, D. Skrade, F.A. Pintar, J. Reinartz, A. Sances, Thoracic Deformation Contours in a Frontal Impact, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1991. doi:10.4271/912891.
- [20] H.J. Mertz, A.L. Irwin, J.W. Melvin, R.L. Stanaker, M.S. Beebe, Size, Weight and Biomechanical Impact Response Requirements for Adult Size Small Female and Large Male Dummies, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1989. doi:10.4271/890756.
- [21] S. Solmaz, S. Üzümlü, Gtech-Revolution Yarış Takımı Tübitak Alternatif Enerjili Araç Yarışları Teknik Tasarım Raporu.