

**ÖNCEDEDEN TASARLANMIŞ ELEKTROMOBİL ARACIN
ÇARPIŞMA ANALİZİ**

**CRASH ANALYSIS OF A PRE-ENGINEERED
ELECTROMOBILE VEHICLE**

ERDEM AKTAŞ

PROF. DR. BORA YILDIRIM

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

Destęini hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme...

ÖZET

ÖNCEDEDEN TASARLANMIŞ ELEKTROMOBİL ARACIN ÇARPIŞMA ANALİZİ

Erdem AKTAŞ

Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Ocak 2020, 111 sayfa

Tarihin karanlık devirlerinden bu yana insanoğlu hayatını kolaylaştırma amacı ile sürekli bir gelişim içerisinde. İnsanoğlunun her ilerleyişi ile dünya kaynakları hızla tükenmektedir. Sanayileşmenin dünyanın tüm ülkelerine yayılması bu durumu kaçınılmaz olarak hızlandırmaktadır. 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 yüksek lisans tez çalışmasında, önceden tasarlanmış 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 zaman bağlı dinamik bir analiz olduğundan dolayı açık (eksplisit) 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.

Anahtar Kelimeler: Dinamik arpışma analizi, açık yöntem, sonlu elemanlar yöntemi, kukla model, yaralanma kriteri, ANSYS Workbench LS-DYNA.

ABSTRACT

CRASH ANALYSIS OF A PRE-ENGINEERED ELECTROMOBILE VEHICLE

Erdem AKTAŞ

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

January 2020, 111 pages

Since the dark periods of history, human beings are in a continuous development with the aim of making their lives easier. With every progress of human beings, world resources are rapidly depleted. The spread of industrialization to all countries of world inevitably accelerates this situation. 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 losses to environment due to the 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 this master's thesis, 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.

Keywords: Dynamic crash analysis, explicit method, finite element method, dummy, injury criteria, ANSYS Workbench LS-DYNA.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, sadece bilimsel anlamda değil aynı zamanda insani erdemleri ve alçak gönüllüğü ile bana rehber olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a,

Lisansüstü eğitimin kesintisiz sürdürebilmem için gerekli müsaadeleri veren DHMİ Hava Trafik Kontrol Merkezi Başmüdürlüğü Yöneticilerine,

Tezimin hazırlanması ve sunumu için gerekli desteği ve motivasyonu veren Yüksek Makina Mühendisi Sayın Zekeriya ÖZCAN'a,

Hayatım boyunca her koşulda bana destek veren ve sabır gösteren, önceliklerini her zaman önceliklerime göre değiştiren ve bunun karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, bugünlere gelmemde en büyük katkıları olan, bu hayatta hiçbir şeye asla değişmeyeceğim canım aileme,

Sonsuz Teşekkürler...

Erdem AKTAŞ

Ocak 2020, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
2.1. Numerik Çarpışma Analizleri	2
2.2. Kukla Model Yaralanma Kriterleri	17
2.2.1. Baş Yaralanma Kriteri (HIC)	18
2.2.2. Göğüs Yaralanma Kriteri	22
2.2.3. Uyluk kemiği Yaralanma Kriteri.....	27
2.2.4. Yaralanma Kriterleri Özeti.....	29
3. ANALİZ.....	31
3.1. Analizde Kullanılan Model	33
3.2. Analiz için İzlenen Aşamalar	41
3.2.1. Malzeme Niceliklerinin Tanımlanması.....	41
3.2.2. Model Montaj Dosyasının Workbench Ortamına Aktarılması	44
3.2.3. Tanımlanan Malzemelerin Model Parçalarına Atanması.....	45
3.2.4. Analiz için Gerekli Koordinat Sistemlerinin Oluşturulması	46
3.2.5. Parça Kontaklarının, Mafsalların, Amortisör Verilerinin ve Parçalar Arası Bağlantı Durumlarının Tanımlanması.....	47
3.2.6. Model Ağ Yapısının Oluşturulması	51
3.2.7. Başlangıç Koşullarının Tanımlanması	53
3.2.8. Analiz Ayarlarının Yapılması	54
3.2.9. Yerçekimi İvmesinin Tanımlanması	56
3.2.10. Uzaktan Yer Değiştirme Tanımlanması.....	57
3.2.11. Basınç Değerlerinin Tanımlanması.....	58

3.2.12. Çözüm Dosyasının Oluşturulması	59
3.2.13. Kukla Model Eklenmesi için Birim Dönüşümlerinin Yapılması.....	60
3.2.14. Kukla Modelin Eklenmesi ve Konumlandırılması	63
3.2.15. Kukla Model Kontaklı ve Hızının Tanımlanması.....	64
3.2.16. Emniyet Kemeri ve Kontaklının Tanımlanması	66
3.2.17. Çözüm Yapılması	69
4. SONUÇLAR.....	71
4.1. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Elastiki Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	71
4.2. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	76
4.3. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Mukavim Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	80
4.4. Emniyet Kemerli ve Yapı Çeliği Parçaları Elastiki Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	85
4.5. Emniyet Kemerli ve Yapı Çeliği Parçaları Malzemeleri Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	90
4.6. Emniyet Kemerli ve Yapı Çeliği Parçaları Mukavim Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar	95
5. ANALİZİN DOĞRULANMASI.....	100
5.1. Toplam Enerji Verisi Doğrulaması.....	100
5.1.1. Durum 1 için Toplam Enerji Doğrulaması	100
5.1.2. Durum 2 için Toplam Enerji Doğrulaması	101
5.1.3. Durum 3 için Toplam Enerji Doğrulaması	102
5.1.4. Durum 4 için Toplam Enerji Doğrulaması	102
5.1.5. Durum 5 için Toplam Enerji Doğrulaması	103
5.1.6. Durum 6 için Toplam Enerji Doğrulaması	103
5.2. Kinetik Enerji Verisi Doğrulaması	104
6. DEĞERLENDİRME	105
7. KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kukla model yaralanma kriterleri simülatif ve kritik değerleri [1].....	4
Çizelge 2.2. Test modeli 2 için kullanılan malzemeler [2]	5
Çizelge 2.3. NCAC ve test modelleri karşılaştırması [2]	6
Çizelge 2.4. Simülasyon durumları için araç/otomobil hızları [3].....	11
Çizelge 2.5. AIS şiddet puanları [5]	17
Çizelge 2.6. Değişik kukla model büyüklükleri için önerilen HIC değerleri [9]	20
Çizelge 2.7. Kukla model türleri için ölçeklendirilmiş sapma ve ivme değerleri [9]	23
Çizelge 2.8. Değişik yetişkin kukla model büyüklükleri ile ilişkili ölçek faktörü ve uyluk kemiği IARV verileri [9]	28
Çizelge 2.9. SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri [9].....	29
Çizelge 2.10. AAMA ve NRPM tarafından önerilen baş yaralanma kriterleri [9]	30
Çizelge 2.11. AAMA ve NRPM tarafından önerilen göğüs yaralanma kriterleri [9]	30
Çizelge 3.1. Araç teknik özellikleri [21]	31
Çizelge 3.2. Araç parçaları	33
Çizelge 3.2. Tamamlayıcı parçalar.....	34
Çizelge 3.4. İzotropik elastik malzeme parametreleri.....	42
Çizelge 3.5. Anizotropik elastik malzeme parametreleri	42
Çizelge 3.6. Ortotropik malzeme parametreleri	42
Çizelge 3.7. Birim dönüşüm çizelgesi.....	61
Çizelge 3.8. Örnek birim dönüşüm çizelgesi	61
Çizelge 4.1. Analiz senaryoları	71
Çizelge 6.1. Tüm durumlar için parametreler	105
Çizelge 6.2. Tüm durumlar için parametreler (75 ms).....	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sonlu eleman araç modeli [1].....	2
Şekil 2.2. Sonlu eleman kukla ve koltuk modeli [1].....	2
Şekil 2.3. Analiz sonrası aracın durumu [1]	3
Şekil 2.4. Analiz sonrası kukla modelin durumu [1]	3
Şekil 2.5. Enerji sönümlenme eğrisi [1]	3
Şekil 2.6. Yakıt deposunun deformasyon sonucu yer değiştirmesi [1]	4
Şekil 2.7. Sonlu eleman araç modeli [2].....	5
Şekil 2.8. Test modeli 2 deformasyon durumu [2]	6
Şekil 2.9. Test modeli 1 için enerji dengesi grafiği [2].....	6
Şekil 2.10. Test modeli 2 için enerji dengesi grafiği [2].....	7
Şekil 2.11. Test modeli 1 için ivme-zaman grafiği [2]	7
Şekil 2.12. Test modeli 2 için ivme-zaman grafiği [2]	8
Şekil 2.13. Test modeli 1 için hız-zaman grafiği [2]	8
Şekil 2.14. Test modeli 2 için hız-zaman grafiği [2]	9
Şekil 2.15. ISO13232'ye göre dört tekerlekli scooter için çarpışma senaryoları [3].....	10
Şekil 2.16. Prototip aracın CAD modeli [3]	10
Şekil 2.17. Aracın rijit bariyere çarpması sonucu uğradığı deformasyon [3].....	11
Şekil 2.18. Aracın 0-0.2 s aralığındaki çarpışma durumlarının karşılaştırılması [3].....	12
Şekil 2.19. Aracın rijit bariyere çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]	13
Şekil 2.20. Aracın rijit bariyere çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3].....	13
Şekil 2.21. Araca otomobilin yandan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3].....	14
Şekil 2.22. Araca otomobilin yandan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının yan yüzlerindeki (zy düzlemi) deformasyonlar [3].....	14
Şekil 2.23. Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3].....	15
Şekil 2.24. Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3]	15

Şekil 2.25. Araca, otomobilin arkadan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]	16
Şekil 2.26. Araca otomobilin arkadan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3]	16
Şekil 2.27. 1960 ve 1970 yılları WSTC karşılaştırması [6]	18
Şekil 2.28. HIC için yaralanma riski eğrisi [9]	21
Şekil 2.29. Tüm kukla model büyüklükleri için önerilen göğüs ivmesi ve sapması performans limitleri [9]	23
Şekil 2.30. Kızak test verilerini gerçek çarpışmalar ile ilişkilendiren risk faktörü modeli kullanılarak yaralanma olasılığının azaltılması [9]	24
Şekil 2.31. Hibrid III 50. yüzdeler erkek kukla model AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ maksimum göğüs sapması (D_{max}) için düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]	25
Şekil 2.32. Hibrid III 50. yüzdeler erkek kukla model AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ maksimum 3 milisaniye aralığı omurga bileşke ivmesi değeri (A_{max}) için düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]	26
Şekil 2.33. Tüm kukla modeller AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ durumları için CTI kullanılarak düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]	27
Şekil 2.34. Uyluk kemiği için yaralanma riski eğrisi [9]	28
Şekil 3.1. Fırçasız DC motor özellikleri [21]	32
Şekil 3.2. Aracın görüntüsü [21]	33
Şekil 3.3. Düzenlenen model görüntüsü	35
Şekil 3.4. Çarpışma analizi için kullanılan model görüntüsü	35
Şekil 3.5. Kabuk kasa	36
Şekil 3.6. İskelet şasi	36
Şekil 3.7. Destek sacı	37
Şekil 3.8. Koltuk	37
Şekil 3.9. Amortisör	38
Şekil 3.10. Jant	38
Şekil 3.11. Lastik	39
Şekil 3.12. Duvar	39
Şekil 3.13. Zemin	40
Şekil 3.14. Kukla model (dummy)	40
Şekil 3.15. Mühendislik verisi bileşeni	43

Şekil 3.16. Mühendislik verisi bileşeninde tanımlanan malzemeler	43
Şekil 3.17. Geometri bileşeni.....	44
Şekil 3.18. SpaceClaim montaj dosyası aktarımı	44
Şekil 3.19. Model bileşeni	45
Şekil 3.20. Mechanical ara yüzü geometri alt başlığı	46
Şekil 3.21. Mechanical ara yüzü koordinat sistemleri	47
Şekil 3.22. Mechanical ara yüzü kontaklar	48
Şekil 3.23. Mechanical ara yüzü mafsallar	49
Şekil 3.24. Mechanical ara yüzü yaylar	50
Şekil 3.25. Mechanical ara yüzü cisim etkileşimleri	51
Şekil 3.26. Mechanical ara yüzü ağ yapısı.....	52
Şekil 3.27. Ağ yapısı tanımlanan model	52
Şekil 3.28. Mechanical ara yüzü öteleme hızı tanımlanması.....	53
Şekil 3.29. Mechanical ara yüzü açısız hız tanımlanması	54
Şekil 3.30. Mechanical ara yüzü analiz ayarları	56
Şekil 3.31. Mechanical ara yüzü standart yerçekimi ivmesi.....	57
Şekil 3.32. Mechanical ara yüzü uzaktan yer değiştirme	58
Şekil 3.33. Mechanical ara yüzü basınç.....	59
Şekil 3.34. Çözüm dosyasının oluşturulması.....	60
Şekil 3.35. Keyword manager.....	62
Şekil 3.36. Örnek malzeme parametreleri birim değişikliği.....	63
Şekil 3.37. Kukla model konumlandırma modülü.....	64
Şekil 3.38. Kukla model ve araç parçaları kontağı	65
Şekil 3.39. Kukla model öteleme hızı tanımlanması	66
Şekil 3.40. Emniyet kemeri ayarlama modülü.....	67
Şekil 3.41. Emniyet kemer parçası malzeme parametreleri.....	68
Şekil 3.42. Emniyet kemeri bağlantı parçaları malzeme parametreleri	68
Şekil 3.43. Çözüm öncesi modelin son hali.....	69
Şekil 3.44. Analiz sonu model görüntüsü	70
Şekil 4.1. Analiz sonu model görüntüsü (durum 1).....	72
Şekil 4.2. Yapı çeliği elastik malzeme parametreleri (durum 1)	72
Şekil 4.3. HIC ₃₆ grafiği (durum 1).....	73
Şekil 4.4. CSI grafiği (durum 1)	74

Şekil 4.5. Göğüs sapması grafiği (durum 1).....	74
Şekil 4.6. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 1).....	75
Şekil 4.7. Analiz sonu model görüntüsü (durum 2).....	76
Şekil 4.8. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 2).....	77
Şekil 4.9. HIC ₃₆ grafiği (durum 2).....	77
Şekil 4.10. CSI grafiği (durum 2).....	78
Şekil 4.11. Göğüs sapması grafiği (durum 2).....	79
Şekil 4.12. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 2).....	80
Şekil 4.13. Analiz sonu model görüntüsü (durum 3).....	81
Şekil 4.14. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 3).....	82
Şekil 4.15. HIC ₃₆ grafiği (durum 3).....	82
Şekil 4.16. CSI grafiği (durum 3).....	83
Şekil 4.17. Göğüs sapması grafiği (durum 3).....	84
Şekil 4.18. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 3).....	85
Şekil 4.19. Analiz sonu model görüntüsü (durum 4).....	86
Şekil 4.20. Yapı çeliği elastik malzeme parametreleri (durum 4).....	87
Şekil 4.21. HIC ₃₆ grafiği (durum 4).....	87
Şekil 4.22. CSI grafiği (durum 4).....	88
Şekil 4.23. Göğüs sapması grafiği (durum 4).....	89
Şekil 4.24. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 4).....	90
Şekil 4.25. Analiz sonu model görüntüsü (durum 5).....	91
Şekil 4.26. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 5).....	91
Şekil 4.27. HIC ₃₆ grafiği (durum 5).....	92
Şekil 4.28. CSI grafiği (durum 5).....	93
Şekil 4.29. Göğüs sapması grafiği (durum 5).....	93
Şekil 4.30. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 5).....	94
Şekil 4.31. Analiz sonu model görüntüsü (durum 6).....	95
Şekil 4.32. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 6).....	96
Şekil 4.33. HIC ₃₆ grafiği (durum 6).....	96
Şekil 4.34. CSI grafiği (durum 6).....	97
Şekil 4.35. Göğüs sapması grafiği (durum 6).....	98
Şekil 4.36. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 6).....	99
Şekil 5.1. Durum 1 için enerji dengesi.....	101

Şekil 5.2. Durum 2 için enerji dengesi.....	102
Şekil 5.3. Durum 3 için enerji dengesi.....	102
Şekil 5.4. Durum 4 için enerji dengesi.....	103
Şekil 5.5. Durum 5 için enerji dengesi.....	103
Şekil 5.6. Durum 6 için enerji dengesi.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	İvme
A_c	Göğüs Yaralanması için Göğüs İvmesi Limiti (g)
A_{int}	3 ms Aralığında Omurga İvmenin Maksimum Kabul Edilebilir Kesişme Değeri (g)
A_{max}	3 ms Aralığında Omurgada Gözlemlenen İvmenin Maksimum Değeri (g)
C_{3ms}	3 ms Aralığında Omurga İvmesi (g)
D_c	Göğüs Yaralanması için Göğüs Sapması Limiti (mm)
D_{int}	Göğüs Sapmasının Maksimum Kabul Edilebilir Kesişme Değeri (mm)
D_{max}	Göğüs Kısmının Gözlemlenen Maksimum Sapma Miktarı (mm)
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
g	Yer Çekimi İvmesi
G	Kayma Modülü
$LiFePO_4$	Lityum Demir Fosfat
N ()	Kümülatif Normal Dağılım
N_{ij}	Boyun Yaralanma Kriteri
P ()	Olasılık
rpm	Devir/Dakika
t	Zaman

Kısaltmalar

AAAM	Otomotiv Tıbbi Geliştirme Derneği
AAMA	Amerikan Tıp Asistanları Birliği
AIS	Kısaltılmış Yaralanma Derecesi
BLDC	Fırçasız Doğru Akım
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CFC	Kanal Frekans Sınıfı
CRABI	Çocuk Sınırlaması ve Hava Yastığı Etkileşimi
CSI	Göğüs Şiddet İndeksi
CTI	Kombine Göğüs İndeksi
DC	Doğru Akım
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FMVSS	Federal Motorlu Taşıtlar Güvenliği Standartları
FPC	Uyluk Performans Kriteri
GSI	Gadd Şiddet İndeksi
HIC	Baş Yaralanma Kriteri
HPC	Yüksek Performanslı Hesaplama
HSI	Baş Şiddet İndeksi
IARV	Yaralanma Değerlendirme Referans Değeri
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
ISS	Yaralanma Şiddeti Skoru
MID	Malzeme Kimliği
NAN	Sayı Değil
NCAC	Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi
NCAP	Yeni Otomobil Değerlendirme Programı
NHTSA	Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
NPRM	Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu
SNPRM	Ek Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu
THPC	Göğüs Performans Kriteri
WSTC	Wayne State Tolerans Eğrisi

1. GİRİŞ

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 hibrid 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 tez 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.

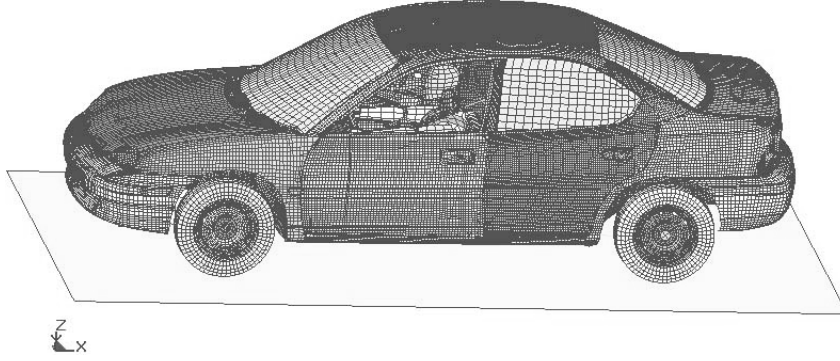
2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde literatürde yer alan çarpışma analizleri üzerinde durulacaktır. Numerik ve test ortamında yapılan çarpışma analizlerinin sonuçları irdelenecektir. Ayrıca tez çalışmasında değerlendirilecek olan kukla model (dummy) yaralanma ölçütleri irdelenecektir.

2.1. Numerik Çarpışma Analizleri

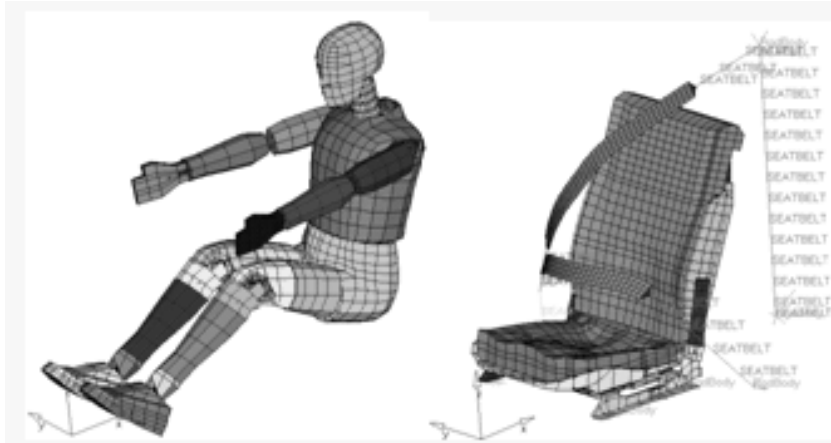
Numerik olarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile yapılan çalışmalara bakıldığında 2009 yılında Guangyou Zhao, Liyang Xie, Yunpeng Guo ve Jinghong Li [1] kukla modele sahip bir aracın, 50 km/h hıza sahip rijit bir duvar tarafından arkadan çarpılma durumunu incelemişlerdir.

Analizde 290000 nokta ve 238000 elementten oluşan sonlu eleman araç modeli kullanılmıştır. Analizde kullanılan araç modeli Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



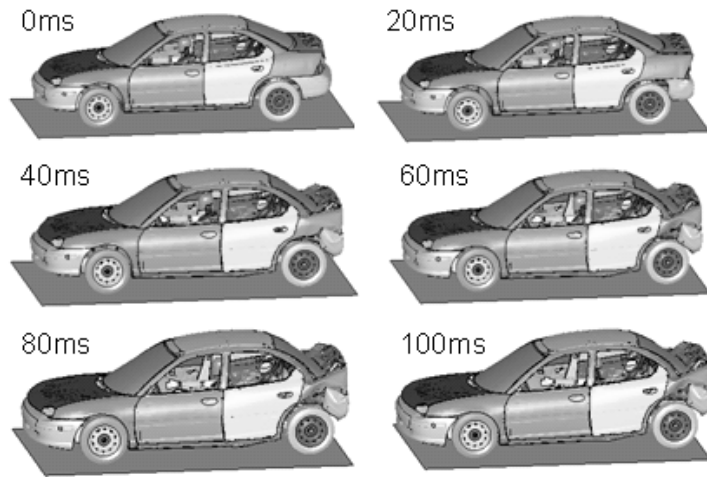
Şekil 2.1. Sonlu eleman araç modeli [1]

Kukla model (dummy) olarak 50. yüzdelik hibrid III kukla modeli kullanılmıştır. Kukla model için ayrıca emniyet kemeri oluşturulmuştur. Kukla model ve emniyet kemerli koltuk modeli Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

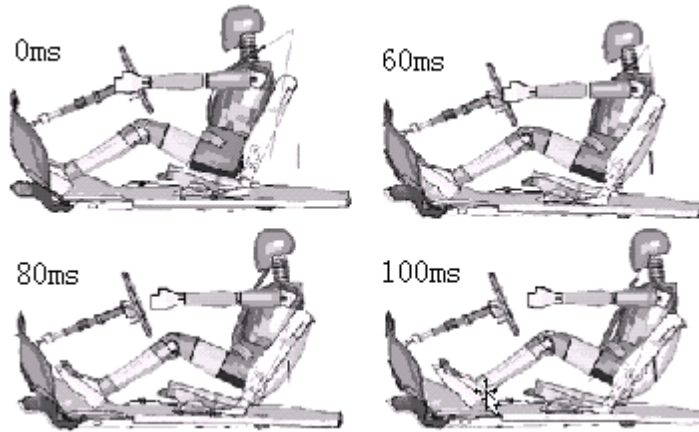


Şekil 2.2. Sonlu eleman kukla ve koltuk modeli [1]

Analiz sonunda aracın ve kukla modelin durumları Şekil 2.3 ve 2.4'te yer almaktadır.

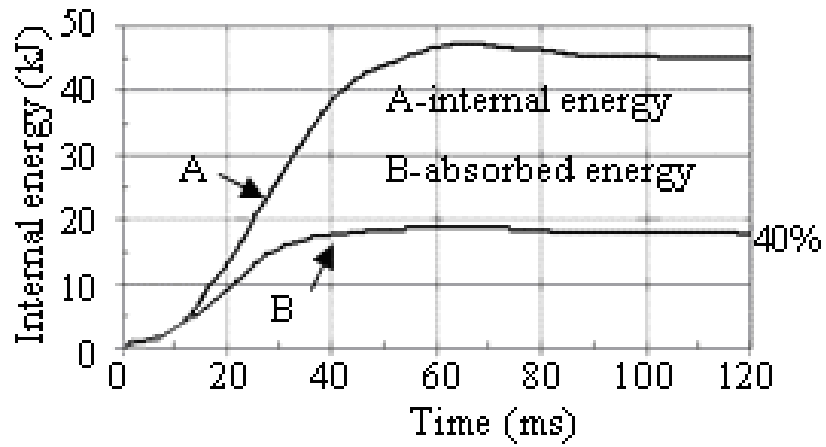


Şekil 2.3. Analiz sonrası aracın durumu [1]



Şekil 2.4. Analiz sonrası kukla modelin durumu [1]

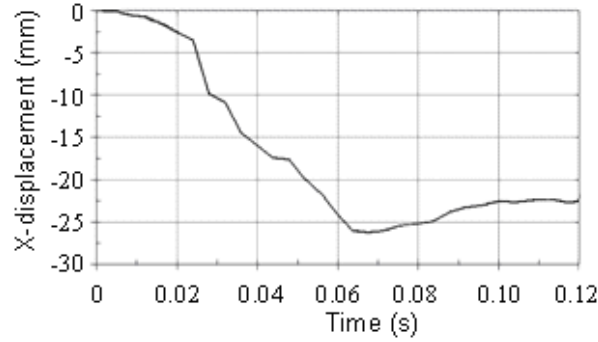
Analizde temel olarak aracın arka kısmının, yakıt tankının hasar durumları ve kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiği yaralanmaları incelenmiştir.



Şekil 2.5. Enerji sönütleme eğrisi [1]

Şekil 2.5'te gösterilen aracın arka yapısal parçalarının, 0-40 ms arasındaki iç ve sönmülenen enerji grafiklerine göre aracın arka tamponu toplam enerjinin % 24.7'sine karşılık gelen 12.5 kJ enerjiyi sönmülemektedir. Aracın arka tarafı ise 7.74 kJ büyüklüğünde enerjiyi sönmüleyebilmiştir. Buradan aracın enerjiyi sönmüleyen 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 2.6'da yakıt tankının deformasyona uğramayan civata ile sabitlenmiş alt noktasına göre tankın arka duvarındaki ciddi deformasyon noktasının yer değıştirme grafiği yer almaktadır.



Şekil 2.6. Yakıt deposunun deformasyon sonucu yer değıştirmesi [1]

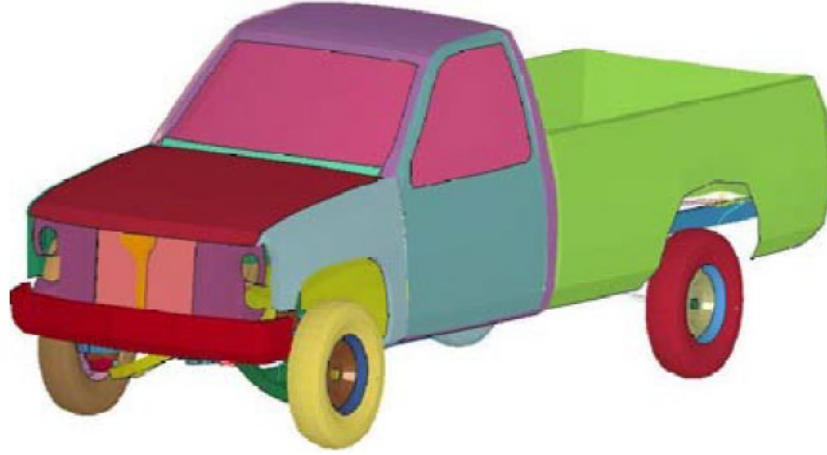
Grafik incelendiğinde GB-20072-2006 standardına göre yakıt deposu emniyeti sağlandığı görülmektedir.

Kukla modelin baş, göğüs ve uyluk ve uyluk kemiği yaralanma parametreleri Çizelge 2.1'de görülebilmektedir. Baş yaralanma kriteri HIC, göğüs yaralanma kriteri THPC, C3ms ve uyluk kemiği yaralanma kriteri FPC değeri limitlerin altında kalmıştır. Ancak sürücü ve yolcu boyun korumasının geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 2.1. Kukla model yaralanma kriterleri simülatif ve kritik değeri [1]

Yaralanma Kriterleri	Simülatif Değer	Kriter
HIC	664	≤ 1000
THPC	30 mm	≤ 50 mm
C3ms	48 g	≤ 60 g
FPC	1.6 kN (sol) 1.13 kN (sağ)	≤ 10 kN

Numerik analiz olarak yapılan bir başka çalışma ise Tejasagar Ambati, K.V.N.S. Srikanth ve P. Veeraraju [2] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Chevrolet C-1500 aracın yaklaşık 56 km/h hızla rijit bir duvara önden çarpması incelenmiştir.



Şekil 2.7. Sonlu eleman araç modeli [2]

Şekil 2.7’de sonlu elemanlar modeli gösterilen araçta, 65 parça, 61 malzeme parametresi, 10693 element ve 11060 nokta bulunmaktadır.

Araç çarpışma analizi iki ayrı durum için yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. 1 numaralı test modeli olarak adlandırılan durum için aracın fabrikasyon malzeme nicelikleri değiştirilmeden kullanılmıştır. 2 numaralı test modelinde ise malzeme olarak hafif metal alaşımları kullanılmıştır. 2 numaralı durumda kullanılan hafif alaşım metalleri Çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Test modeli 2 için kullanılan malzemeler [2]

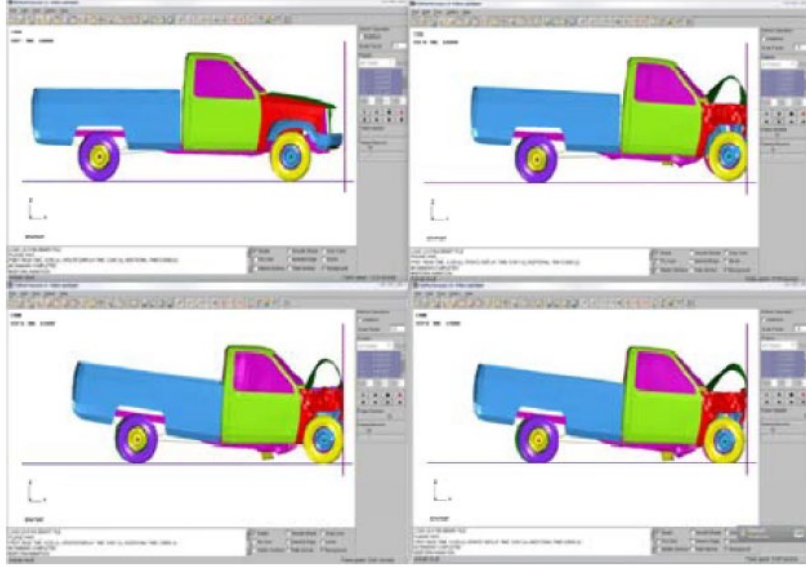
Malzeme		Test modeli 2
Alüminyum	AA 3005	Radyatör
	AA 5182	Kapı, kaporta, tampon, tekerlek yuvası
	AA 5454	Jant
	A 319	Motor
Çelik	ASTM	Ray
	A 514	

Aynı aracın Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) tarafından yapılan çarpışma testindeki model parametreleri ile test modelleri parametreleri Çizelge 2.3’te yer almaktadır.

Çizelge 2.3. NCAC ve test modelleri karşılaştırması [2]

	NCAC modeli	Test modeli 1	Test modeli 2
Kütle (kg)	2013	1884	1654
Parça sayısı	251	65	65
Eleman sayısı	58313	10729	10729

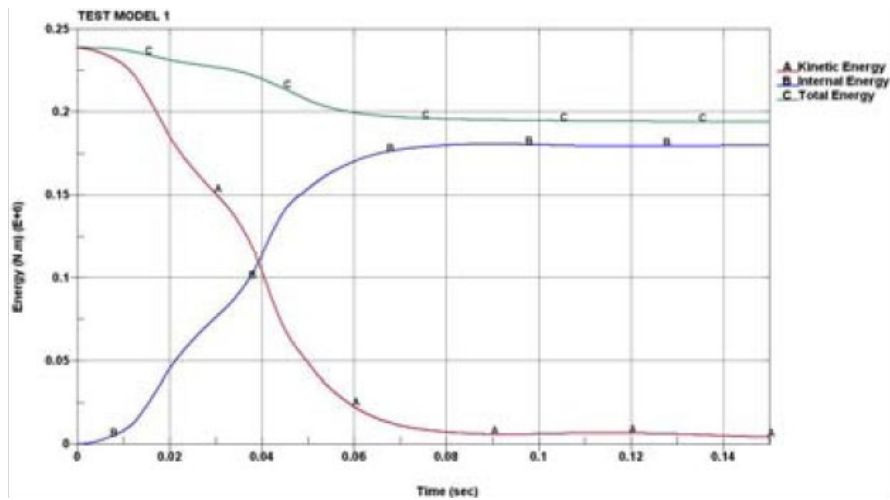
Test modeli 2'nin çözüm sonrası belirli zaman aralıklarında uğradığı deformasyonları Şekil 2.8'de yer almaktadır.



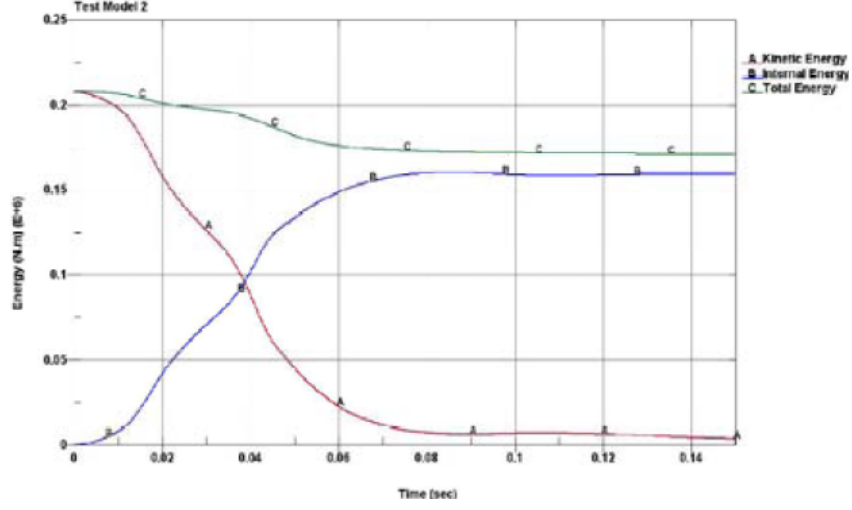
Şekil 2.8. Test modeli 2 deformasyon durumu [2]

Çözüm sonrası her iki model için enerji dengesi, hız ve ivme grafikleri üzerinden değerlendirmelerde bulunulmuştur.

1 ve 2 numaralı test modelleri için çizilmiş olan enerji dengesi grafikleri Şekil 2.9 ve 2.10'da gösterilmektedir.

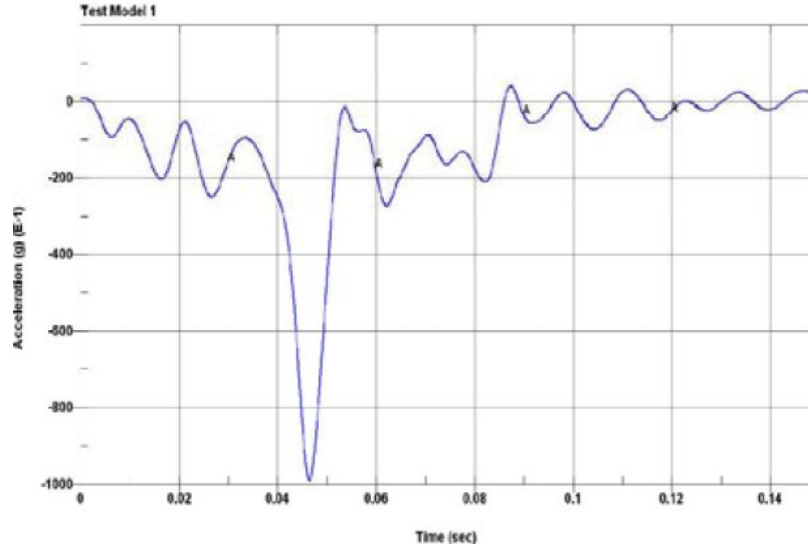


Şekil 2.9. Test modeli 1 için enerji dengesi grafiği [2]

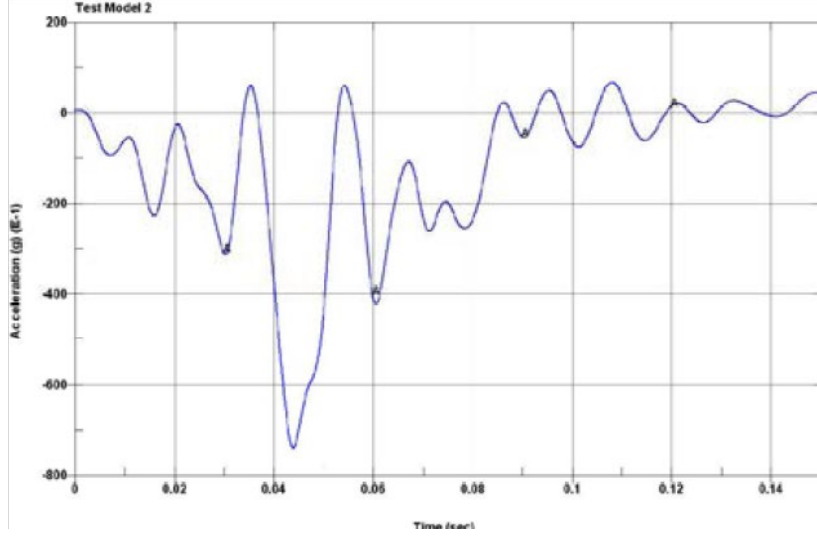


Şekil 2.10. Test modeli 2 için enerji dengesi grafiği [2]

Grafikler incelendiğinde maksimum kinetik enerji değerleri 1 numaralı test modeli için 239.126 kJ, 2 numaralı model için ise 208.301 kJ olduğu görülmektedir. 2 numaralı test modeli daha hafif olduğu için kinetik enerjisinin küçük çıkması normal görünmektedir.



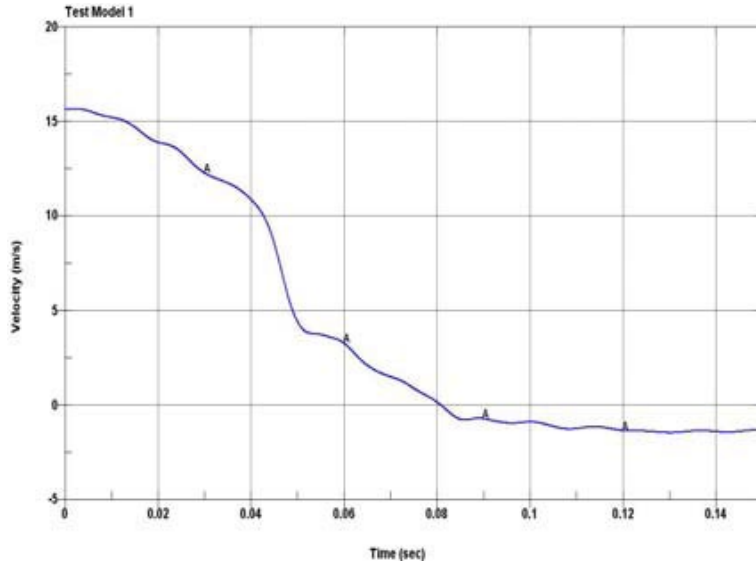
Şekil 2.11. Test modeli 1 için ivme-zaman grafiği [2]



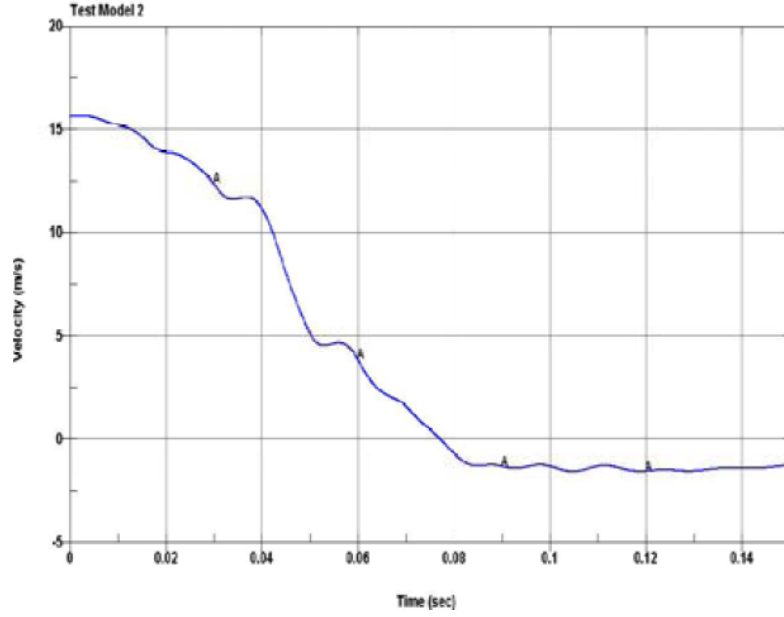
Şekil 2.12. Test modeli 2 için ivme-zaman grafiği [2]

Şekil 2.11 ve 2.12’de gösterilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde maksimum yavaşlama ivmesinin 1 numaralı test modeli için 98.94 g, 2 numaralı model için ise 84.83 g olduğu görülmektedir. Kinetik enerji karşılaştırmasında olduğu gibi 2 numaralı test modelinin hafifliğinden dolayı yavaşlama ivmesinin küçük çıkması normal görülmektedir.

Son olarak her iki modelin hız-zaman grafikleri incelendiğinde hız profillerinin benzer davranış sergiledikleri görülmektedir. Şekil 2.13 ve 2.14’te modellerin hız-zaman grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Test modeli 1 için hız-zaman grafiği [2]



Şekil 2.14. Test modeli 2 için hız-zaman grafiği [2]

Analiz üzerine yapılan değerlendirme neticesinde, sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarının, NCAC araç model testi sonuçları ile örtüştüğü, tekerlerin duvara çarpmasından önce tampon, motor ve ızgara kısımlarının enerjinin büyük bir bölümünü sönmülediği ve bu sönmülemenin çarpışmanın 40 ms anından itibaren gerçekleştiği görülmektedir.

Ayrıca araç kabininin minimum deformasyona uğradığı ve bu yüzden kabin içindeki bileşenlerin ciddi bir yaralanmaya sebebiyet vermeyeceği anlaşılmıştır.

Analiz üzerine yapılan değerlendirme neticesinde, sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarının, NCAC araç model testi sonuçları ile örtüştüğü, tekerlerin duvara çarpmasından önce tampon, motor ve ızgara kısımlarının enerjinin büyük bir bölümünü sönmülediği ve bu sönmülemenin çarpışmanın 40 ms anından itibaren gerçekleştiği görülmektedir.

Ayrıca araç kabininin minimum deformasyona uğradığı ve bu yüzden kabin içindeki bileşenlerin ciddi bir yaralanmaya sebebiyet vermeyeceği anlaşılmıştır.

Tez konusu ile benzerlik gösteren bir diğer çalışma ise Lorenzo Berzi, Nicolò Baldanzini, Daniele Barbani, Massimu Delogu, Ramses Sala ve Marco Pierini [3] tarafından yapılmış olan çalışmadır.

Çalışmada dört tekerlekli prototip elektrikli aracın dört ayrı çarpışma senaryosu üzerinde durulmuştur. Analizde, araç için kritik bileşen olarak belirlenen sağ ve sol bataryaların hasar durumu hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Bu senaryolar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

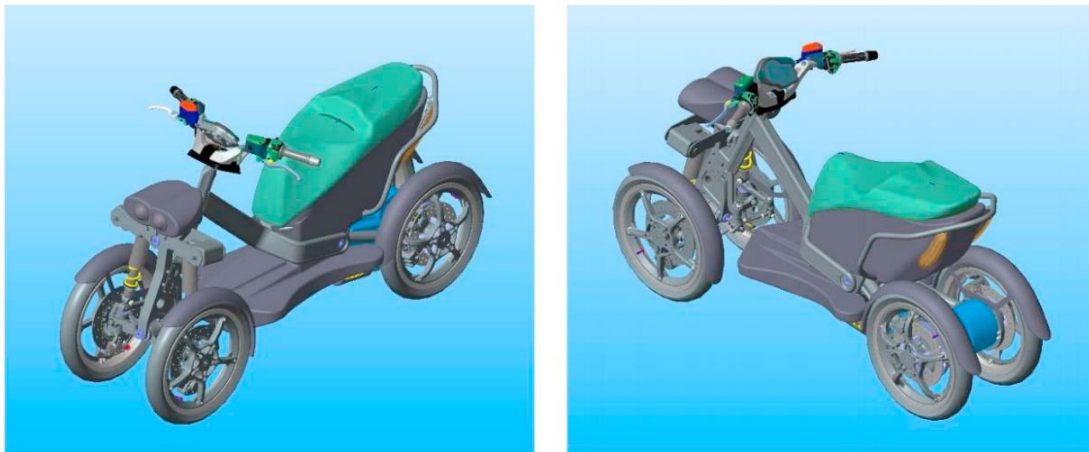
- Rijit bariyere önden çarpışma testi
- Araca otomobilin arkadan çarpması: ISO13232, tip 131
- Araca otomobilin yandan çarpması: ISO13232, tip 143
- Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması: ISO13232, tip 413

Yukarıdaki son üç maddede bahsi geçen ISO13232 standardına göre çarpışma senaryoları Şekil 2.15’te gösterilmektedir.



Şekil 2.15. ISO13232’ye göre dört tekerlekli scooter için çarpışma senaryoları [3]

Prototip aracın CAD modeli Şekil 2.16’da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Prototip aracın CAD modeli [3]

Aracın duvara çarpması durumunda araç hızı 10 m/s; duran araca, otomobilin yandan çarpması durumunda otomobil hızı 10 m/s; duran araca, otomobilin arkadan çarpması

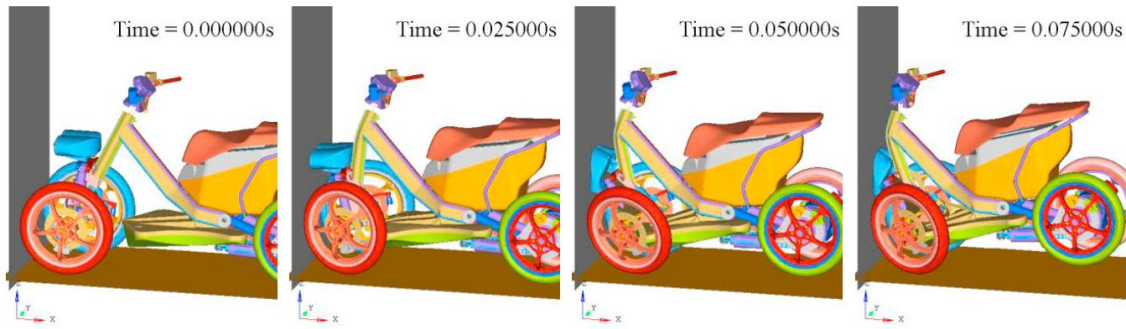
durumunda otomobil hızı 10 m/s; aracın, 6.7 m/s hızı ile giden otomobile yandan çarpması durumunda aracın hızı 10 m/s alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Bahsi geçen senaryolar için araç ve otomobil hızları Çizelge 2.4'te yer almaktadır.

Çizelge 2.4. Simülasyon durumları için araç/otomobil hızları [3]

Senaryo 1- rijit duvar	Senaryo 2- tip 143	Senaryo 3- tip 131	Senaryo 4- tip 413
L2e hızı: 10 m/s	L2e hızı: 0 m/s	L2e hızı: 0 m/s	L2e hızı: 10 m/s
	Araç hızı: 10 m/s	Araç hızı: 10 m/s	Araç hızı: 6.7 m/s

L2e prototip aracın rijit bariyere çarpması sonucu tekerleklerin bariyere değmesi ile birlikte aracın şasisinde plastik deformasyonlar oluşmaya başlamıştır. Diğer deformasyonlar ise ön süspansiyon parçalarında oluşmaktadır. Enerji emilimi sonucunda ise bazı parçalar kırılmaktadır.

Aracın rijit bariyere çarpması sonucu uğradığı deformasyonlar Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



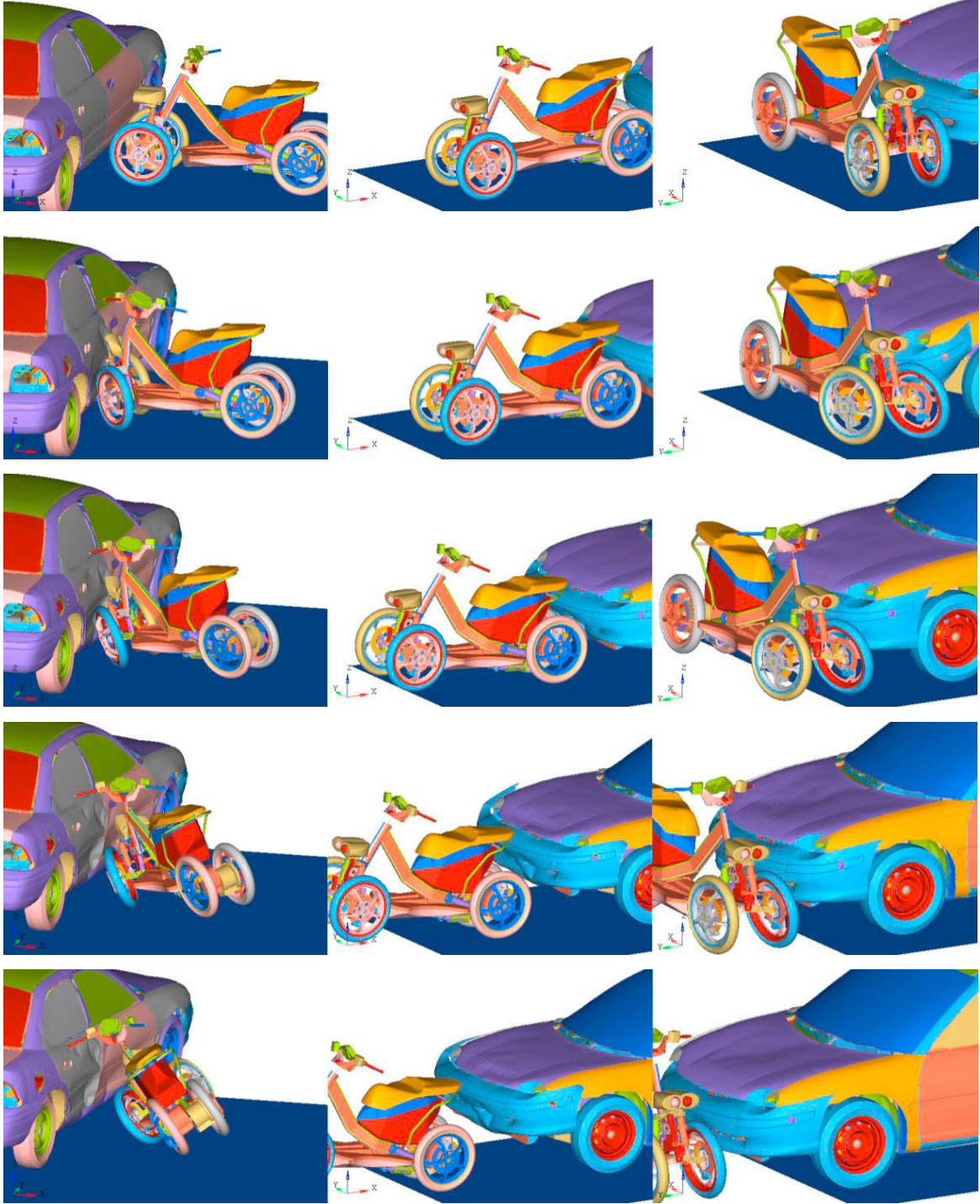
Şekil 2.17. Aracın rijit bariyere çarpması sonucu uğradığı deformasyon [3]

Benzer şekilde ISO13232'ya göre yapılan diğer simülasyonların görselleri Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Bahse konu çizelge 0-0.2 s zaman aralığı için hazırlanmıştır. Daha iyi sunum yapılabilmesi adına sürücünün gizlendiği belirtilmiştir.

Senaryo 413

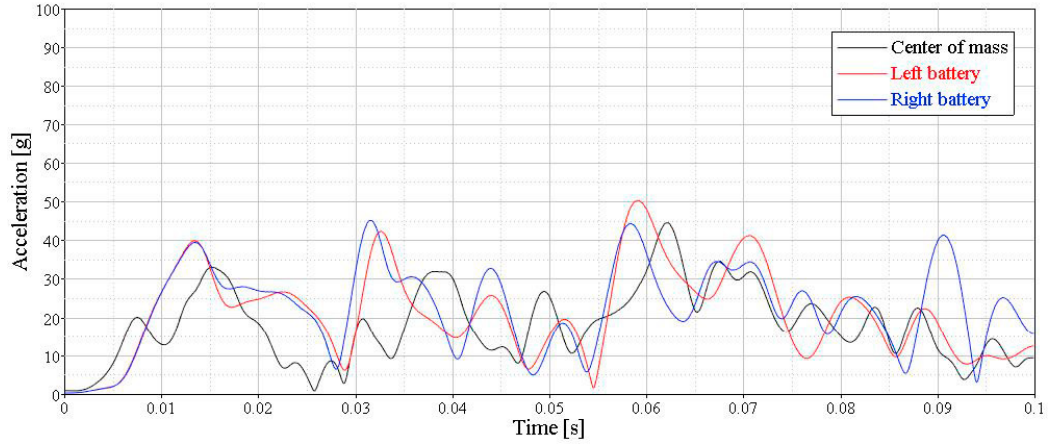
Senaryo 131

Senaryo 143



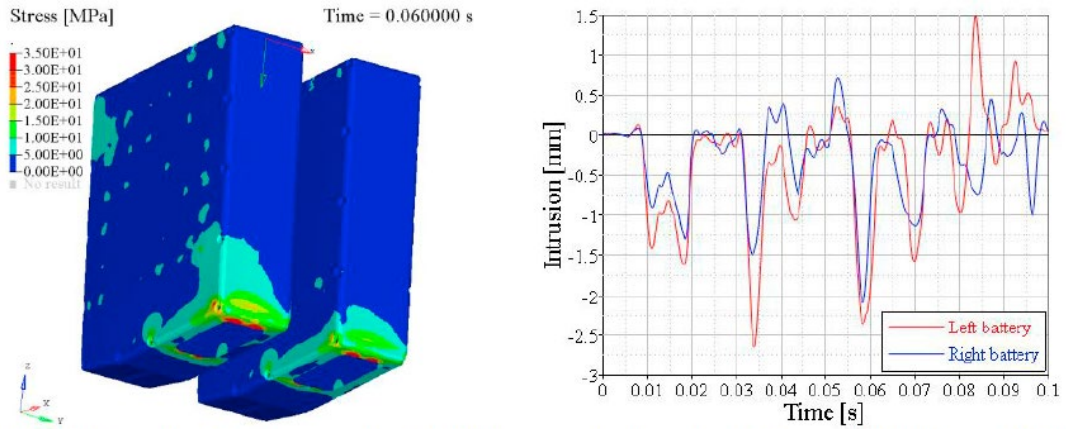
Şekil 2.18. Aracın 0-0.2 s aralığındaki çarpışma durumlarının karşılaştırılması [3]
Analiz sonunda dört durum için elde edilen sonuçlara göre sağ ve sol bataryaların kritik yüzeyleri belirlenmiş ve bu yüzeyler için ivme-zaman, deformasyon miktarı-zaman grafikleri elde edilerek çıkarımlarda bulunulmuştur.

Aracın rijit bariyere çarpması sonucunda elde edilen ivme-zaman grafiği Şekil 2.19'da yer almaktadır. Bu grafiğe göre bataryalar ve araç ağırlık merkezleri dahil olmak üzere maksimum ivmenin 50 g değerini geçmediği görülmektedir.



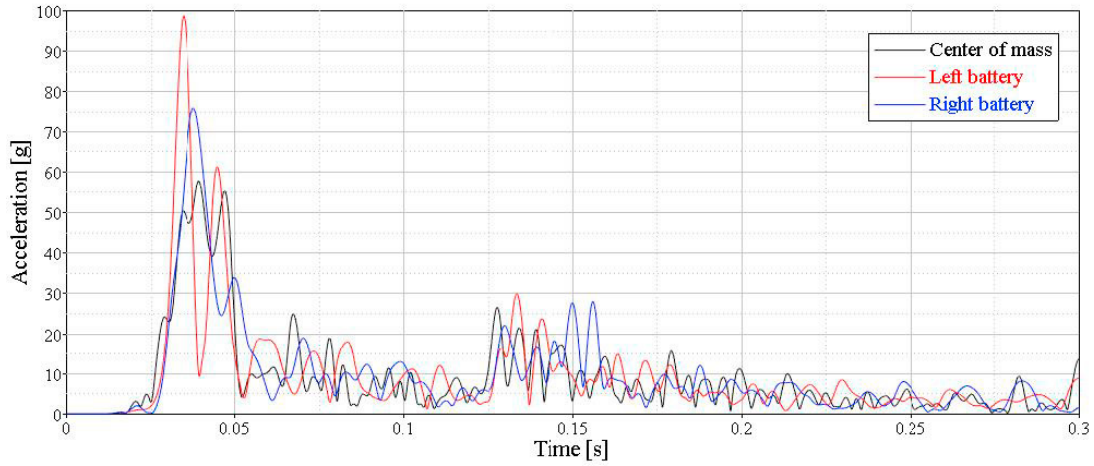
Şekil 2.19. Aracın rijit bariyere çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]

Şekil 2.20'de ise gerilmelerin batarya kasalarının alt kısımlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni ise batarya konektörünün etkisinden kaynaklanmaktadır. Batarya kasalarının arka yüzlerinde genellikle atalet etkisiyle deformasyonların oluştuğu görülmektedir. Maksimum deformasyon ise sol batarya kasasında oluşan yaklaşık 2.6 mm'lik deformasyondur.



Şekil 2.20. Aracın rijit bariyere çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3]

Araca otomobilin yandan çarpması sonucunda elde edilen ivme-zaman grafiği Şekil 2.21'de yer almaktadır. Bu grafiğe göre bataryalar ve araç ağırlık merkezleri dahil olmak üzere maksimum ivmenin 100 g değerini geçmediği görülmektedir.

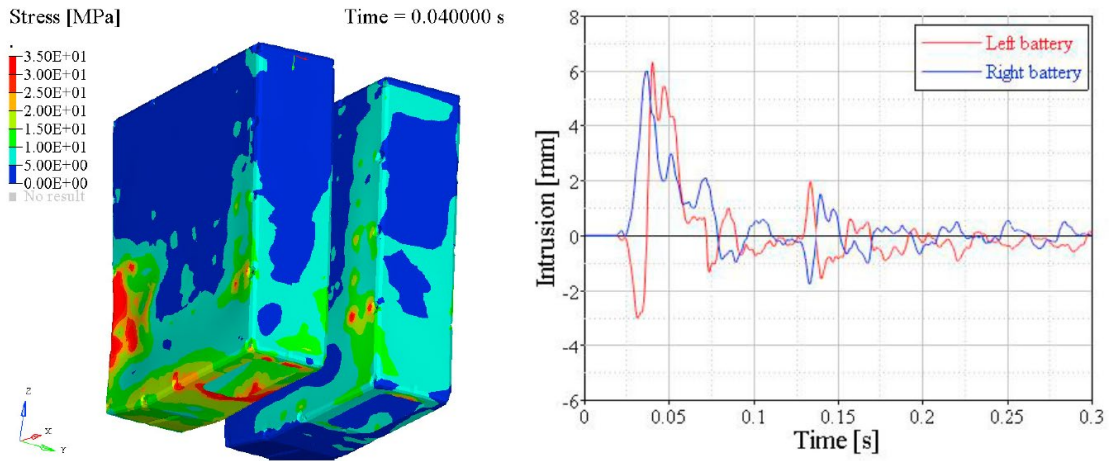


Şekil 2.21. Araca otomobilin yandan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]

Şekil 2.22’de gösterilen gerilme dağılımına göre gerilmelerin önceki duruma benzer olarak batarya kasasının alt kısımlarında etki bırakmaktadır. Ancak gerilmelerin etkilediği alan genişlemiştir.

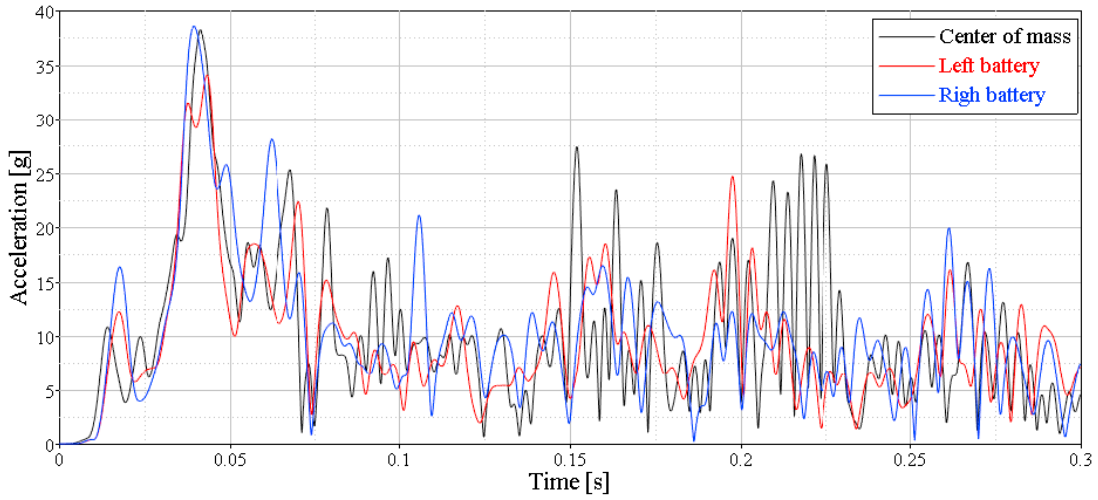
Bu duruma batarya konektörü ve aracın karoseri ile birlikte yandan çarpan otomobilin tamponunun teması neden olmuştur.

Gerilme dağılımına göre belirlenen batarya kasasının yan yüzeyindeki deformasyon grafiği incelendiğinde maksimum deformasyon miktarının 6 mm civarında olduğu görülmektedir.



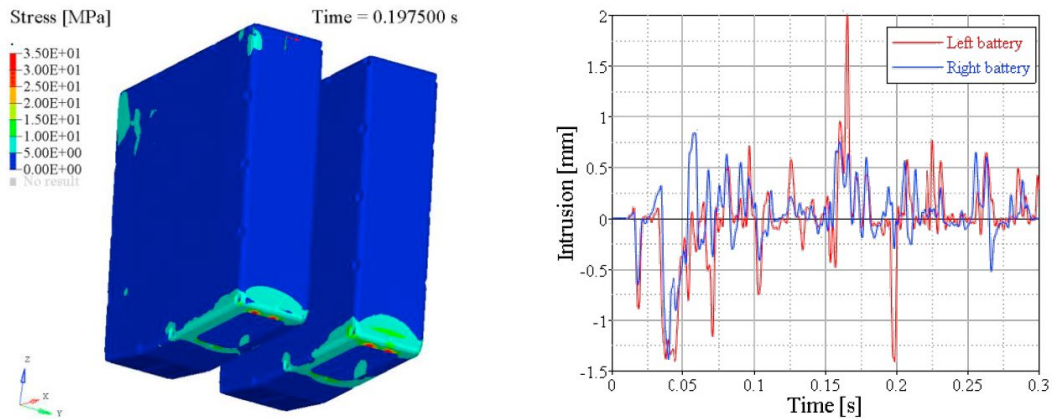
Şekil 2.22. Araca otomobilin yandan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilmeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının yan yüzlerindeki (zy düzlemi) deformasyonlar [3]

Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması sonucunda elde edilen ivme-zaman grafiği Şekil 2.23'te yer almaktadır. Bu grafiğe göre bataryalar ve araç ağırlık merkezleri dahil olmak üzere maksimum ivmenin yaklaşık 39 g değerini geçmediği görülmektedir.



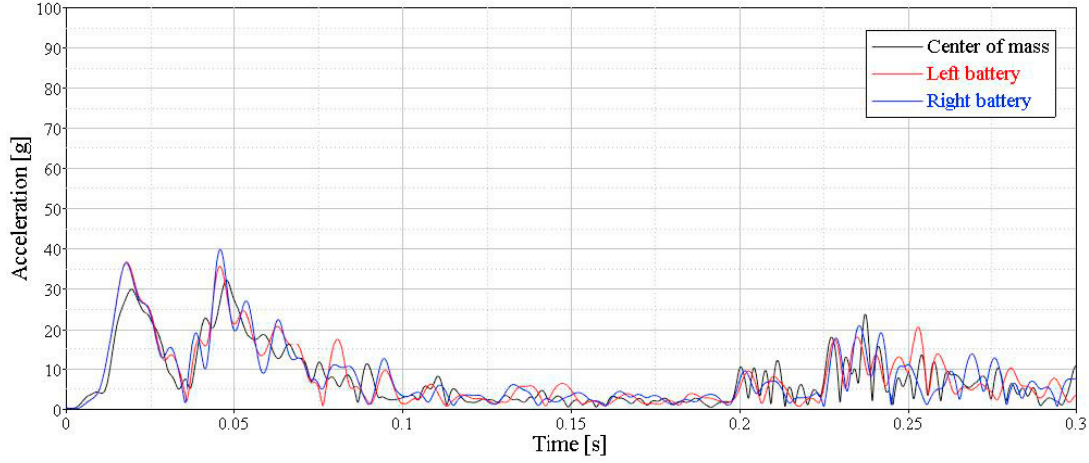
Şekil 2.23. Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]

Aracın rijit bariyere çarpması sonucu elde edilen gerilme dağılımına benzer olarak gerilmelerin batarya kasalarının alt kısımlarında yoğunlaştığı Şekil 2.24'ten görülmektedir. Bunun nedeni ise aynı şekilde batarya konektörü etkisinden dolayıdır. Maksimum deformasyon ise sol batarya kasasında oluşan yaklaşık 2 mm'lik deformasyondur.



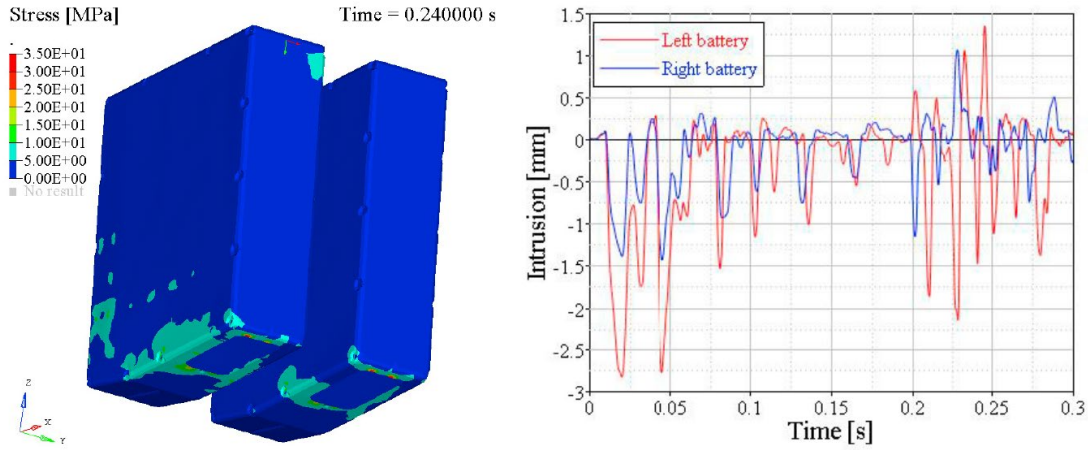
Şekil 2.24. Aracın ön tarafının otomobile yandan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3]

Şekil 2.25'te araca, otomobilin arkadan çarpması durumu için elde edilen ivme-zaman grafiğine göre maksimum ivmenin 40 g civarında olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.25. Araca, otomobilin arkadan çarpması durumu ivme-zaman grafiği [3]

Araca otomobilin yandan çarpması durumuna göre gerilme dağılımının dar bölgeyi etkisi altına aldığı Şekil 2.26'dan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte batarya kasalarının arka yüzlerinde oluşan maksimum deformasyon 2.75 mm sınırına dayanmaktadır.



Şekil 2.26. Araca otomobilin arkadan çarpması. Soldaki görsel: Batarya kasaları üzerinde oluşan gerilemeler. Sağdaki görsel: Batarya kasalarının arka yüzlerindeki (xy düzlemi) deformasyonlar [3]

Bütün durumların incelenmesinin ardından batarya kasaları için hem Von Mises gerilmelerinin kapsadığı alan büyüklüğü hem de 6 mm'lik deformasyonu göz önüne alındığında araca otomobilin yandan çarpması durumu kritik senaryodur.

Bataryalara herhangi bir parçanın hasar verip vermediği, keskin kenarla karakterize edilmemiş araç karoseri ile batarya kasasının temas durumu ile ilgilidir. Tüm analizler için batarya kasaları gerilme dağılımı görsellerine bakıldığında batarya kasalarına herhangi bir parçanın zarar vermediği görülecektir.

2.2. Kukla Model Yaralanma Kriterleri

Bu bölümde, tez kapsamında kullanılan kukla modelin (dummy) baş, göğüs ve uyluk kemikleri yaralanma parametreleri üzerinde durulacaktır.

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].

Çizelge 2.5'te AIS şiddet puanları yer almaktadır.

Çizelge 2.5. AIS şiddet puanları [5]

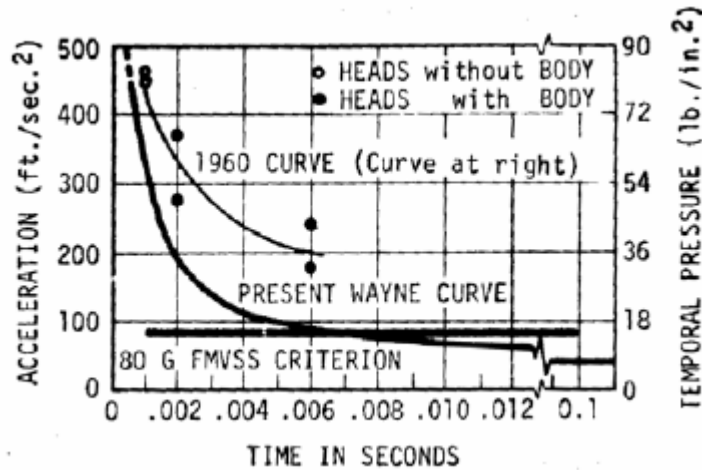
AIS	Şiddet kodu
0	Yaralanma yok
1	Hafif
2	Orta
3	Ciddi
4	Ağır
5	Kritik
6	Maksimum (Ölümün kaçınılmaz olduğu)
9	Bilinmeyen

2.2.1. Baş Yaralanma Kriteri (HIC)

Kafa travması ile ilgili olarak ivme büyüklüğü ve itme süresi arasındaki ilişki ilk olarak zamanla büyüklüğü azalan altı adet ivme noktası serisi ile sunulmuştur. Araştırmacıların eğilimi ile Wayne State Tolerans Eğrisi (WSTC) olarak adlandırılan bu ilişki baş yaralanma kriterinin temelini oluşturmuştur. İlk veriler 1-6 ms zaman aralığında mumyalanmış kadavra kafatasının hasar görecer kırılması ile elde edildi. Eğri, daha sonra karşılaştırmalı hayvan, kadavra çarpışma verileri ve gönüllü insanların kullanıldığı test verileri ile birlikte 6 ms üzerindeki süreler uzatılmıştır [6].

WSTC, geliştirilmesinden itibaren sınırlı veri noktası, sorgulanmaya açık teknikleri, uzun sürelerde kullanılmasını sağlayan hayvan verilerinin ölçeklendirilmesine ilişkin dokümantasyon eksikliği ve ivmelenme tanımının eksikliği gerekçeleri ile eleştirilmiştir [6].

Zaman içinde WSTC geliştirilerek yeni eğriler elde edilmiştir. Buna örnek olarak 1960 ve 1970 yılları için WSTC karşılaştırması grafiği Şekil 2.27’de yer almaktadır.



The original curve indicated the relationship between acceleration and time required to produce fracture in cadaver heads falling freely and heads falling with the body. Values 1-5 represent peak acceleration values, while 6 (180 G) is given as an average value (peak acceleration for this point was apparently 557 G), although not plotted. No date points have been published in the later version shown, but the new Wayne Curve is intended to show impact tolerance for the human brain in forehead impacts against plane, unyielding surfaces. Superimposed on this curve is the present FMVSS 80 G 3 ms performance criterion (224)

Fig. 10 - A comparison of the 1960 Wayne Curve (225, p. 8, Fin. 3) and the present Wayne Curve (223, p. 170, Fig. 1).

Şekil 2.27. 1960 ve 1970 yılları WSTC karşılaştırması [6]

WSTC verileri, Gadd [7] tarafından logaritmik ölçeklendirme ile çizilmiş ve Gadd Şiddet İndeksi (GSI) olarak bilinen ağırlıklı itme kriteri için yaklaşık düz bir çizgiye sahip olan fonksiyon geliştirilmiştir [6].

Aşağıda ivme fonksiyonunun zamana göre integrali olarak tanımlanan GSI parametresinin eşitliği yer almaktadır.

$$HSI = \int [a(t)]^{2.5} dt$$

1971 yılında Versace [8] tarafından Wayne State Tolerans Eğrisi (WSTC) ile Gadd Şiddet İndeksi arasındaki ilişkinin analiz çalışmasına cevaben Ulusal Karayolu Trafığı Güvenliği İdaresi (NHTSA) tarafından 1971 yılında baş yaralanma kriteri (HIC) adına bir parametre tanımlanmıştır [6].

Günümüzde HIC otomobil çarpışma testi kukla modellerinde (dummy) oluşabilecek kafa travmasını değerlendirmek için halen kullanılmaktadır. HIC, WSTC için kullanılan ön eksenel ivmeden ziyade bileşke ivmeye dayanmaktadır [6].

Baş yaralanma kriterinin (HIC) matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibidir.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Eşitlikte yer alan;

a, bileşke baş ivmesini,

$t_2 - t_1$, zaman aralığını,

t_2 , t_1 , çarpışma boyunca HIC değerinin maksimum olduğu anları ifade etmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu (NPRM) ile 50. yüzdellik erkek kukla model için HIC performans limiti maksimum zaman aralığının ($t_2 - t_1$) 36 milisaniye olarak korunması önerilmiştir. Diğer kukla modeller (dummy) için ise ölçeklendirilen değerlerin kullanılması belirtilmiştir. Amerikan Tıp Asistanları Birliği (AAMA) tarafından ise 50. yüzdellik erkek kukla model için HIC değerlendirme aralığının maksimum 15 milisaniye ile sınırlanması tavsiye edilmiştir [9].

17 Ekim 1986 yılında yayınlanan Federal Kayıt Bildirimi'nde NHTSA, maksimum HIC zaman aralığını 36 milisaniye olarak sınırlamayı planladığını belirtmiştir. İdare, gönüllülük esasına göre yapılan testlerde, uzun süreli testlerde yaralanma olasılığının düşük olduğunun gösterildiğini ancak idarenin temkinli bir yaklaşım izlemesi ve sınırsız HIC zaman aralığının sağladığı başarı/başarısızlık oranlarının önemli ölçüde değişmemesi gerektiğini kabul etmiştir. O zamanki mevcut NCAP ve FMVSS 208 testleri başta olmak üzere çeşitli testlere için önerilen 17 milisaniye limitinin, başarısızlık oranını % 46'dan % 35'e düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu gerçek, idarenin maksimum HIC zaman aralığı değerinde orantılı bir azalma olmaksızın maksimum HIC zaman aralığını 15 veya 17 milisaniyeye düşürme teklifini reddetme kararına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, uzun süreli analizlerde HIC değerinin görünürlüğünü karşılamak için maksimum zaman aralığını 36 milisaniye ile sınırlanması idare tarafından teklif edilmiştir. Bu hüküm, ortalama maksimum süredeki ivmenin 60 g sınırına yükselmesine olanak sağlamıştır [9].

Tez çalışması kapsamında HIC kriterleri için yaralanma tespitinde referans olarak kullanılan ve NHTSA tarafından değişik kukla model boyutları için önerilen HIC değerleri Çizelge 2.6'da yer almaktadır.

Çizelge 2.6. Değişik kukla model büyüklükleri için önerilen HIC değerleri [9]

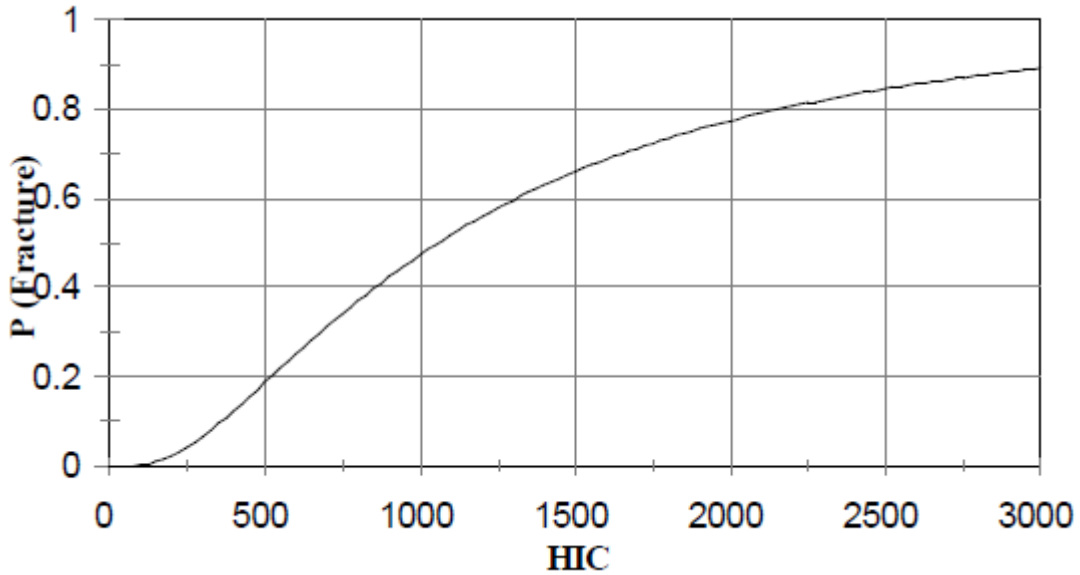
Kukla Model tipi	Büyük Erkek	Orta Büyüklükte Erkek	Küçük Kadın	Çocuk (6 yaş)	Çocuk (3 yaş)	Bebek (1 yaş)
Önerilen HIC ₁₅ limiti	700	700	700	700	570	390

2.2.1.1. Baş Yaralanma Kriteri (HIC) Risk Analizi

1985 yılında Prasad ve Mertz [10], HIC ile kafatası ve beyin yaralanmaları arasındaki ilişkiyi belirlemek için insan kadavralarından elde edilen mevcut test verilerini analiz etmiştir. Beyin hasarı verilerini analiz etmek için kullanılan metodolojilerin birtakım sınırlılıkları vardı ve bu durum kafatası kırığı riski ile beyin yaralanması riskinin nerdeyse aynı risk eğrisi ile gösterilmesinin nedeniydi. Kafatası kırığı verileri hem sert hem de yastıklı yassı yüzeylere düşme testi (Hodgson [11], 1977), ön camlara karşı yapılan kızak testi (Hodgson [12], 1973) ve kasklı düşme testinden (Got [13] 1978, Tarriere [14] 1982) elde edilmekteydi. Bu testlerden elde edilen 54 adet baş darbesi, 175 ile 3400 arasında değişen HIC değerlerine sahipti. HIC süreleri ise 0.9 ile 10.1 milisaniye arasında

değişiyordu. Kafatası kırığı ile ilişkili en düşük HIC değeri 450 idi ve kırık olmaması ile ilişkili en yüksek HIC değeri ise 2351 idi [9].

Elden edilen veriler, 1993 yılında Hertz [15] tarafından her fonksiyona en uygun uyumlamanın elde edilmesi için maksimum olabilirlik tahmini yöntemi kullanılarak normal, log normal ve iki parametrelili Weibull kümülatif dağılımı ile verilerin uyumu analiz edilmiştir. Verilerin en iyi uyumlaması, Şekil 2.28’de gösterilen log normal eğrisi ile elde edilmiştir. Veriler, tipik olarak 12 milisaniyeden kısa süren darbelerden oluştuğundan hem HIC₁₅ hem de HIC₃₆ için kullanılabilir. HIC₁₅ limit değeri 700 olan orta büyüklükteki erkek için kafatası kemiği kırılması olasılığı % 31’dir. Ölçeklendirme prosedürlerine dayanarak her bir kukla model için önerilen HIC₁₅ performans limiti ile ilişkili olan yaralanma riski seviyeleri, orta büyüklükte yetişkin erkek kukla modelin, 700 HIC₁₅ değeri riskine eşdeğer olduğu varsayılmaktadır [9].



Şekil 2.28. HIC için yaralanma riski eğrisi [9]

Kafatası kırığı olasılığı ($AIS \geq 2$) aşağıda yer almaktadır.

$$p(kırık) = N\left(\frac{\ln(HIC) - \mu}{\sigma}\right)$$

Eşitlikte yer alan;

$N()$, kümülatif normal dağılımı ifade etmektedir. Ayrıca $\mu=6.96352$ ve $\sigma=0.84664$ değerindedir.

2.2.2. Göğüs Yaralanma Kriteri

Göğüs yaralanması için Ulusal Karayolu Trafığı Güvenliği İdaresi (NHTSA) Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu (NPRM) için iki adet alternatif önermiştir. İlk alternatifte, tüm kukla model büyüklükleri için tüm test prosedürlerinde kullanılmak üzere Kombine Göğüs İndeksi (CTI) adında yeni bir parametre idare tarafından önerilmiştir. CTI eşitliği, yaygın olarak Federal Motorlu Taşıtlı Güvenliği Standartları (FMVSS) No. 208’de bağımsız olarak kullanılan göğüs ivmesi ve göğüs sapması parametrelerinin lineer kombinasyonudur. Aşağıda eşitliği verilen CTI, önden çarpışma koşullarında tek başına göğüs ivmesi ve sapması değerlendirmesinden daha iyi yaralanma tahmini vermektedir [9].

$$CTI = \left(\frac{A_{max}}{A_{int}} \right) + \left(\frac{D_{max}}{D_{int}} \right)$$

Eşitlikte yer alan;

A_{max} , 3 ms aralığında omurgada gözlemlenen ivmenin maksimum değerini,

D_{max} , göğüs kısmının gözlemlenen maksimum sapma miktarını,

A_{int} , 3 ms aralığında omurga ivmenin maksimum kabul edilebilir kesişme değerini,

D_{int} , göğüs sapmasının maksimum kabul edilebilir kesişme değerini ifade etmektedir.

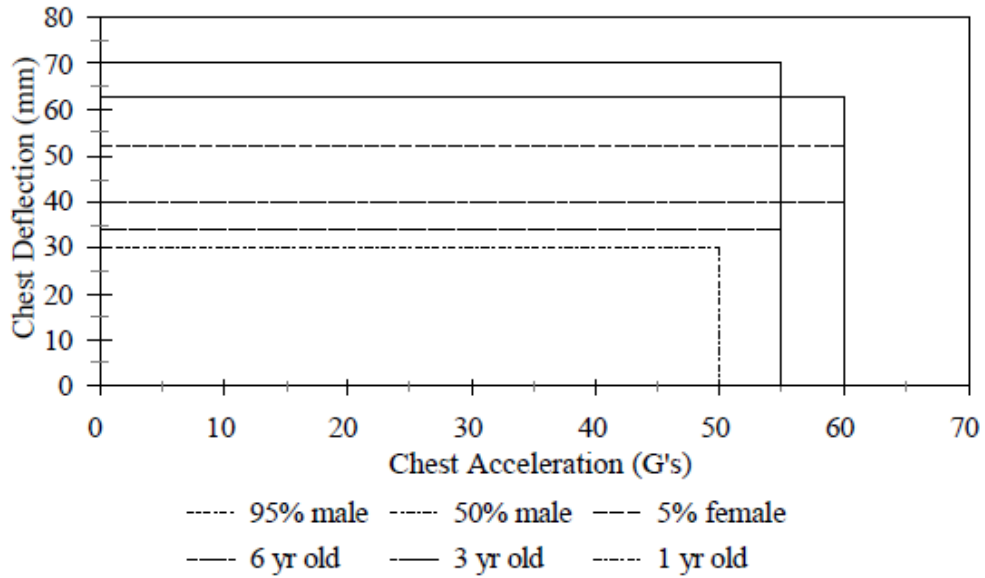
% 50 yetişkin erkek kukla modeli için geçerli olan CTI eşitliğinin, diğer kukla model türlerinde de kullanılabilmesi için ölçeklendirilmesi gerekmektedir.

Ölçeklendirmesi yapılan tüm kukla model türleri için test veri grafiklerinden elde edilen A_{int} ve D_{int} değerleri ile göğüs ivme ve sapma limitleri Çizelge 2.7’de yer almaktadır.

Çizelge 2.7. Kukla model türleri için ölçeklendirilmiş sapma ve ivme değerleri [9]

Değer	95. Yüzdilik Erkek	50. Yüzdilik Erkek	5. Yüzdilik Kadın	Çocuk (6 yaş)	Çocuk (3 yaş)	Bebek (1 yaş)
D_{int}	114 mm	103 mm	84 mm	64 mm	57 mm	50 mm
A_{int}	83	90	90	90	74	57
Göğüs sapması limiti (D_c)	70 mm	63 mm	52 mm	40 mm	34 mm	30 mm
Göğüs ivmesi limiti (A_c)	55	60	60	60	55	50

Benzer şekilde Çizelge 2.7'de yer alan değerlerin grafiğe dökülmüş hali Şekil 2.29'da gösterilmektedir.



Şekil 2.29. Tüm kukla model büyüklükleri için önerilen göğüs ivmesi ve sapması performans limitleri [9]

Göğüs yaralanması tahmini için idarenin önerdiği ikinci alternatifte ise basit olarak tüm kukla model büyüklükleri için göğüs ivmesi ve sapması için ayrı limitler konularak yaralanmanın değerlendirilmesidir [9].

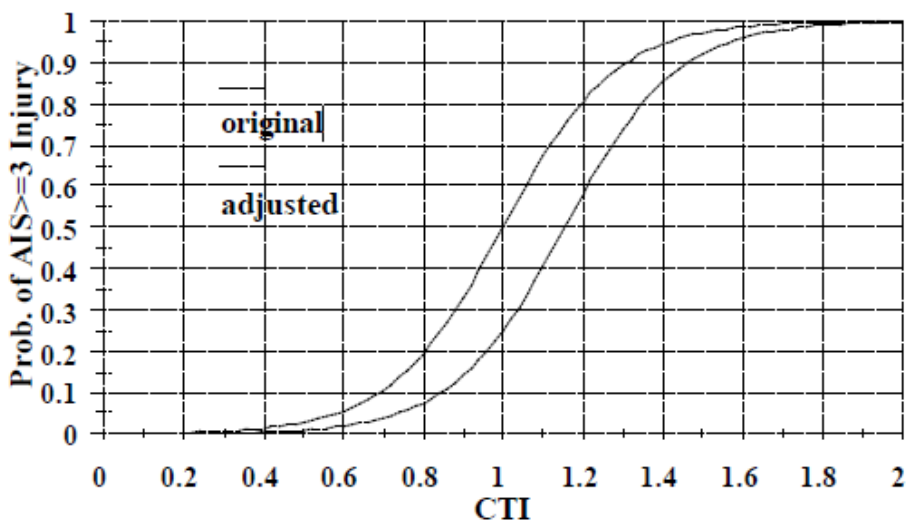
2.2.2.1. Göğüs Yaralanma Olasılığı Risk Eğrileri

Viano ve arkadaşları [16], 1977 yılında istatistiksel olarak canlı ve ölü hayvanların biyomedikal tepki ve yaralanmalarında önemli farklılıklar gözlemlemiştir. Aynı göğüs

sapması değeri için canlı hayvanlarda ölü hayvanlara göre ortalama % 26 daha az kaburga kırığı olduğu gösterilmiştir. Horsch ve arkadaşları [17], 1991 yılında benzer hasar maruziyetinde, insan deneklerinin araç kukla modellerine göre daha kolay yaralandığını belirtmiştir. Araç kukla modelleri ve insan denekleri arasında görülen bu fark ayrıca 1978 yılında Foret Bruno ve arkadaşları [18] tarafından da belirtilmiştir. Yoganandan ve arkadaşları [19], 1991 yılında denek insanlı kızak testlerinde oluşan kaburga kırıklarının detaylı otopsi sonucunda sadece radyografi sonucuna göre daha fazla tespit edildiği bildirilmiştir. Aynı çarpışma şiddeti için denek insanlı kızak testlerinde sahadaki verilere göre daha şiddetli yaralanma bildirilmiştir. Bu farklılıklar, kaburga kırığı tanımlama yöntemine ve canlı insan ile denek arasındaki dinamik tepkiye bağlanmıştır [9].

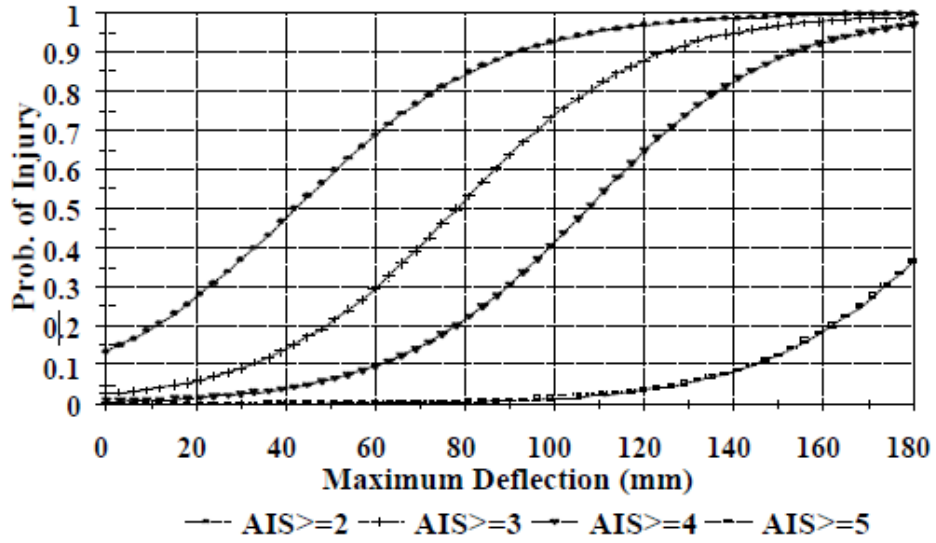
Amerika Birleşik Devletleri'nde ortalama sürücü popülasyonuna göre ortalama sürücü yaşı 30 civarındadır. Denek insanlı kızak testlerinde kullanılan deneklerin ortalama yaşı ise 58'dir. Ortalama sürücü yaşı ile denek yaşı arasında yaklaşık 30 yıl yaş farkı bulunmaktadır. Bu 30 yıl yaş farkı, kadavraların kırılabilirliğinin artması ve deneysel testlerde yaralanma raporunun fazla olması, ortalama insan sürüş popülasyonu için AIS = 3 göğüs yaralanması olasılığını temsil eden yaralanma olasılığında düzeltme yapılmasını gerektirmiştir [9].

CTI cinsinden ayarlanmış yaralanma olasılığı ve düzeltme yapılan ve yapılmayan orijinal eğriler Şekil 2.30'da gösterilmektedir.



Şekil 2.30. Kızak test verilerini gerçek çarpışmalar ile ilişkilendiren risk faktörü modeli kullanılarak yaralanma olasılığının azaltılması [9]

Benzer olarak AIS 2,3,4 ve 5 için düzeltme yapılan maksimum sapma (D_{max}) yaralanma risk eğrileri Şekil 2.31’de yer almaktadır.



Şekil 2.31. Hibrid III 50. yüzdelik erkek kukla model AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ maksimum göğüs sapması (D_{max}) için düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]

Her bir AIS eğrisi için yaralanma olasılığı eşitlikleri ise aşağıda yer almaktadır.

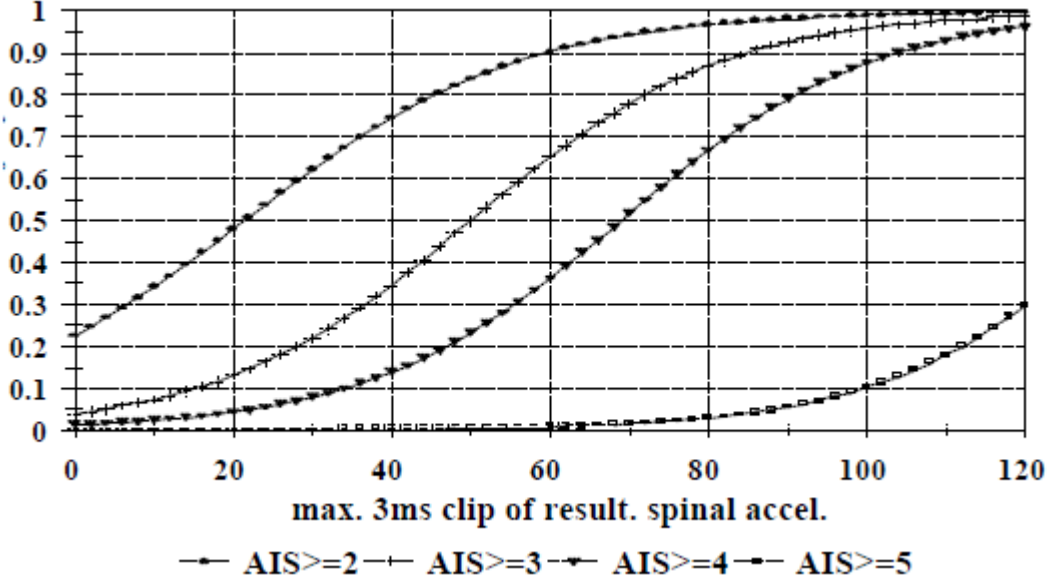
$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439D_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{(3.7124 - 0.0475D_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{(5.0952 - 0.0475D_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{(8.8274 - 0.0459D_{max})}}$$

AIS 2,3,4 ve 5 için düzeltme yapılan maksimum 3 milisaniye aralığı maksimum bileşke omurga ivme değeri (A_{max}) yaralanma risk eğrileri ise Şekil 2.32’de yer almaktadır.



Şekil 2.32. Hibrid III 50. yüzdelik erkek kukla model AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ maksimum 3 milisaniye aralığı omurga bileşke ivmesi değeri (A_{max}) için düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]

Her bir AIS eğrisi için yaralanma olasılığı eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

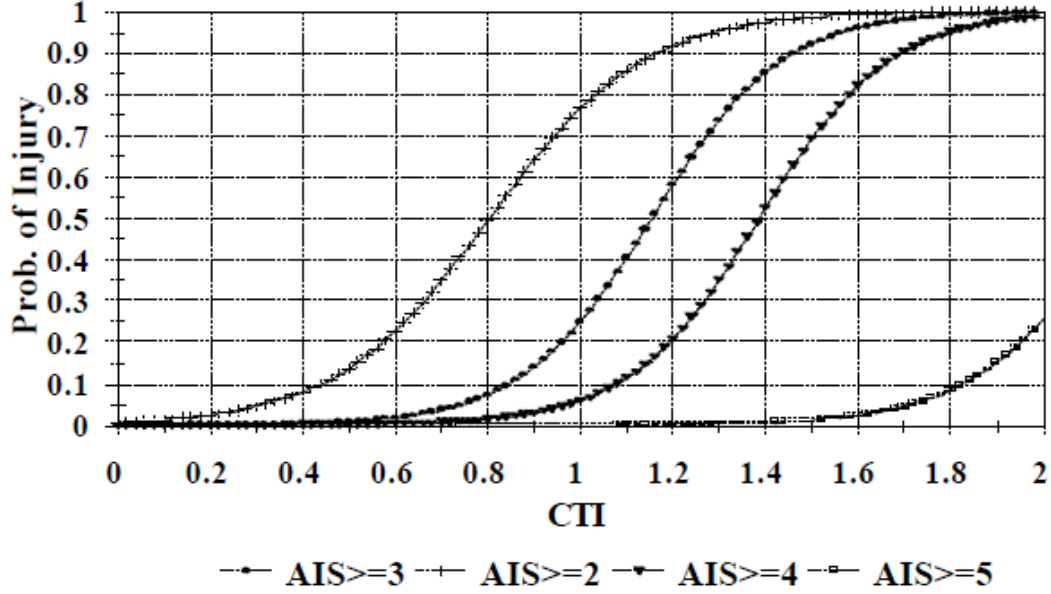
$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(1.2324 - 0.0576A_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{(3.1493 - 0.0630A_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{(4.3425 - 0.0630A_{max})}}$$

$$p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{(8.7652 - 0.0659A_{max})}}$$

Tüm kukla modeller AIS 2,3,4 ve 5 durumları için CTI kullanılarak düzeltme yapılan yaralanma eğrileri Şekil 2.33'te gösterilmektedir.



Şekil 2.33. Tüm kukla modeller AIS 2+, 3+, 4+ ve 5+ durumları için CTI kullanılarak düzeltme yapılan yaralanma risk eğrileri [9]

CTI kullanılarak her bir AIS eğrisi için yaralanma olasılığı eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(4.847 - 6.036CTI)}}$$

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{(8.224 - 7.125CTI)}}$$

$$p(AIS \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{(9.872 - 7.125CTI)}}$$

$$p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{(14.242 - 6.589CTI)}}$$

2.2.3. Uyluk kemiği Yaralanma Kriteri

Günümüzde ayak ve ayak bileği yaralanmalarının kompleks mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için çok sayıda çalışma yürütülmektedir. Yeni kukla model bacakları ve ilgili yaralanma kriterleri geliştirilme aşamasındadır. Ancak yapılan geliştirmeler standartlarda kullanıma halihazırda uygun değildir. Mevcut öneriler, çocuk kukla modelleri haricinde yetişkin kukla modeller için uyluk kemiği yükünün kullanılması üzerinedir. Uyluk kemiği yükü için FMVSS 208'de kullanılan mevcut Yaralanma Değerlendirme Referans Değeri (IARV) 50. yüzdeler erkek kukla model için 10 kN büyüklüğündedir. 5. yüzdeler kadın ve 95. yüzdeler erkek kukla modelleri için uyluk kemiği tolerans yükleri, 50. yüzdeler erkek kukla model IARV büyüklüğünün, uyluk kemiği kesit alanı faktörü ile ölçeklendirilerek Mertz [20] (1989) tarafından hesaplanmıştır. Değişik yetişkin kukla model büyüklükleri ile ilişkili ölçek faktörü ve

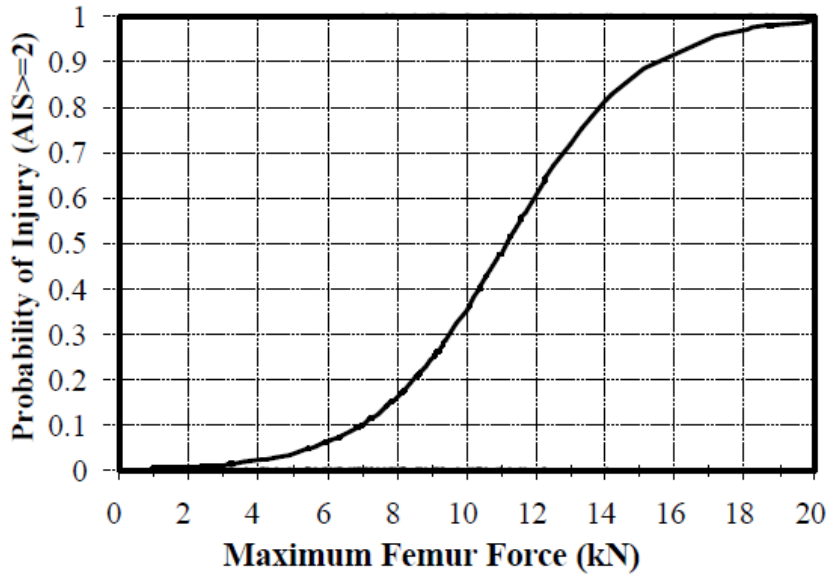
Uyluk kemiği IARV verileri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir. Her üç kukla model büyüklüğü için kopma gerilmesi ve elastisite modülü ölçek faktörü değeri “1” olarak varsayılmıştır [9].

Çizelge 2.8. Değişik yetişkin kukla model büyüklükleri ile ilişkili ölçek faktörü ve uyluk kemiği IARV verileri [9]

	Hibrid III 5. Yüzdellik kadın	Hibrid III 50. Yüzdellik erkek	Hibrid III 95. Yüzdellik erkek
Uyluk kemiği kesit alanı ölçek faktörü	0.682	1.0	1.272
Uyluk kemiği IARV aksenal kuvveti (kN)	6.8	10	12.7

2.2.3.1. Uyluk Kemiği Yaralanma Kriteri Risk Analizi

Uyluk kemiği yükleri ile ilişkili uyluk kemiği yaralanma risk eğrisi Şekil 2.34’te gösterilmektedir. Orta büyüklükte yetişkin erkek kukla model için 10 kN büyüklüğündeki yük, AIS 2 yaralanmasına göre % 35’lik yaralanma riski oluşturmaktadır. Küçük büyüklükte kadın kukla modeli için yaralanma riski değerlerinin, ölçek faktörü uygulamasının ardından erkek kukla model ile eşit olduğu varsayılmaktadır [9].



Şekil 2.34. Uyluk kemiği için yaralanma riski eğrisi [9]

Uyluk kemiği için yaralanma riskinin matematiksel ifadesi ise aşağıda yer almaktadır.

$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{(5.795 - 0.5196F)}}$$

Eşitlikte yer alan;

F, uyluk kemiği kuvveti (kN) değerini ifade etmektedir.

2.2.4. Yaralanma Kriterleri Özeti

Ek Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu (SNPRM) tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri Çizelge 2.9'da gösterilmektedir. Çizelgede her bir vücut bölümü için tavsiye edilen yaralanma kriteri ve kritik değerleri yer almaktadır. Baş koruması için tavsiye edilen HIC_{15} , bütün kukla model büyüklükleri için uygun bir şekilde ölçeklendirilmiştir. SNPRM Nij 1.0 boyun kriteri, kritik değerli ile birlikte bütün kukla modeller için tavsiye edilmektedir. Göğüs yaralanması olasılık oranlarının tahmininde kullanılan CTI için tavsiye edilen göğüs sapması ve omurga ivmesi limit değerleri tavsiye edilmiştir. Uyluk kemiği yükü ise sadece yetişkin kukla modeller için tavsiye edilmiştir [9].

Çizelge 2.9. SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri [9]

Tavsiye edilen kriter	Büyük erkek	Orta büyüklükte erkek	Küçük 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 denekler, 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 Çizelge 2.10'da yer almaktadır.

Çizelge 2.10. AAMA ve NRPM tarafından önerilen baş yaralanma kriterleri [9]

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

Göğüs yaralanma kriteri ile ilgili olarak AAMA ve NRPM tarafından önerilen değerler ise Çizelge 2.11'de yer almaktadır.

Çizelge 2.11. 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 kadın	53	62	8.2	-	73	60
HIII orta büyüklükte erkek	64	76	8.2	-	60	60

3. ANALİZ

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 Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. 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 Şekil 4.1’de yer almaktadır.

Parametre	Değer	Motor Parçaları
Anma Çıkış Gücü	1000 Watt	
Anma Gerilim	48 Volt	
Kutup Sayısı	46	
Stator Oluk Sayısı	51	
Stator İç Çapı	148 mm	
Stator Paket Uzunluğu	25,8 mm	
Stator Sacı	M330-50A	
Oluk Başına Sarım Sayısı	12	
Hava Aralığı	1 mm	
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 Yükleme	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 rüzgâr kayıpları hariç)	
Anma Hızı	452 d/d	
Anma Momenti	21.102 Nm	
Sargı Düzenlemesi	3 Faz, 51 oluk tam kalıp sarım	

Şekil 3.1. Fırçasız DC motor özellikleri [21]

Aracın imalatı tamamlanmış görüntüsü Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 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

Bu bölümde, 2015 yılı TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları için imal edilen elektromobil aracın CAD ortamındaki tasarım modelinin parça görselleri üzerinde durulacaktır.

Analizi yapılan araç, Çizelge 3.2’de adedi ve biçimi verilen parçalardan oluşmaktadır.

Çizelge 3.2. 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 modeli hazır olarak temin edilmiş ancak LS-DYNA çözücüsünde herhangi bir problem ile karşılaşmamak için model üzerinde çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Yapılan değişiklikler aşağıda sıralanmıştır:

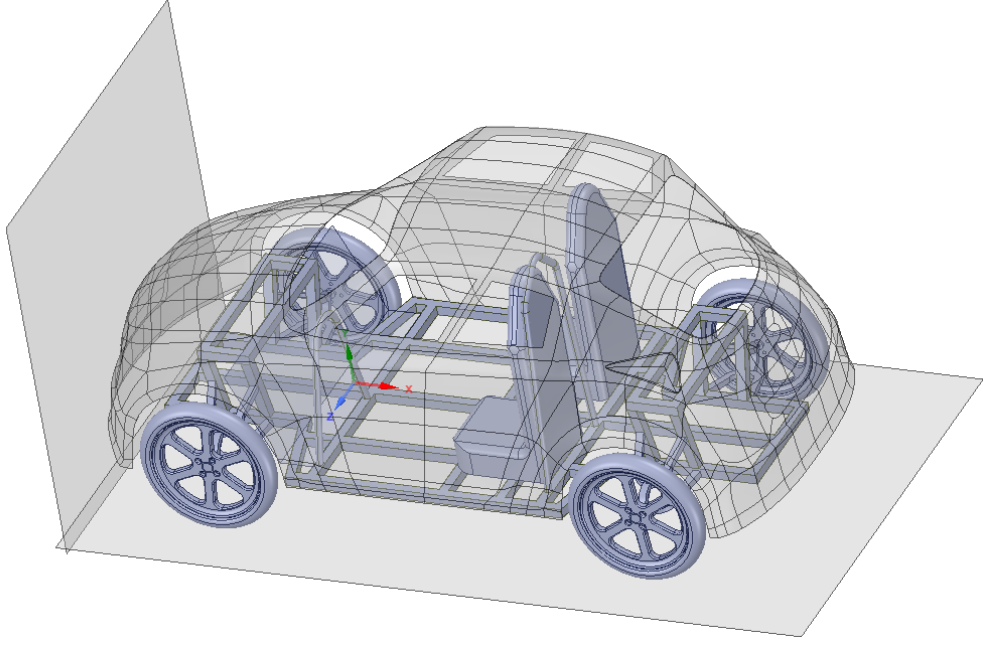
- Katı model olarak temin edilen kabuk kasa, tek katmanlı kompozit malzeme olarak tanımlanabilmesi için yüzey haline getirilmiştir.
- İçi dolu katı model olarak temin edilen iskelet şasi, imal edilen araçta olduğu gibi 40x40x1 mm ölçülerinde katı profil haline getirilmiştir.
- Amortisörün, jant içine oturan muylu kısmının çapı ile jant iç delik çapı eşitlenmiştir.
- Amortisörün jant iç yüzeyine oturan muylu kısmı ile jant iç çapı arasında düzgün bir dönel mafsalsal (revolute joint) tanımlanabilmesi için amortisörler 2 ayrı alt parçaya bölünmüştür.
- Çarpışma analizinde kukla modelin (dummy) üzerine konumlandırılabilmesi için katı koltuk modeli oluşturulmuştur.
- Kukla modelin (dummy) ayak uzuvlarının, araç şasisi ve amortisörüne direk olarak çarpması nedeni ile analizin erken sonuçlanmasını önlemek için destek sacı yüzeyi oluşturulmuştur.
- Çarpışma analizinin doğru sonuç vermesi için model parçalarının CAD ortamında montaj ilişkileri ve parçaların iç içe geçmeleri (penetration) kontrol edilmiştir.
- Analiz için duvar ve zemin yüzeyleri oluşturulmuştur.

Araç parçaları olmayıp analizin elemanı olan tamamlayıcı parçalar Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

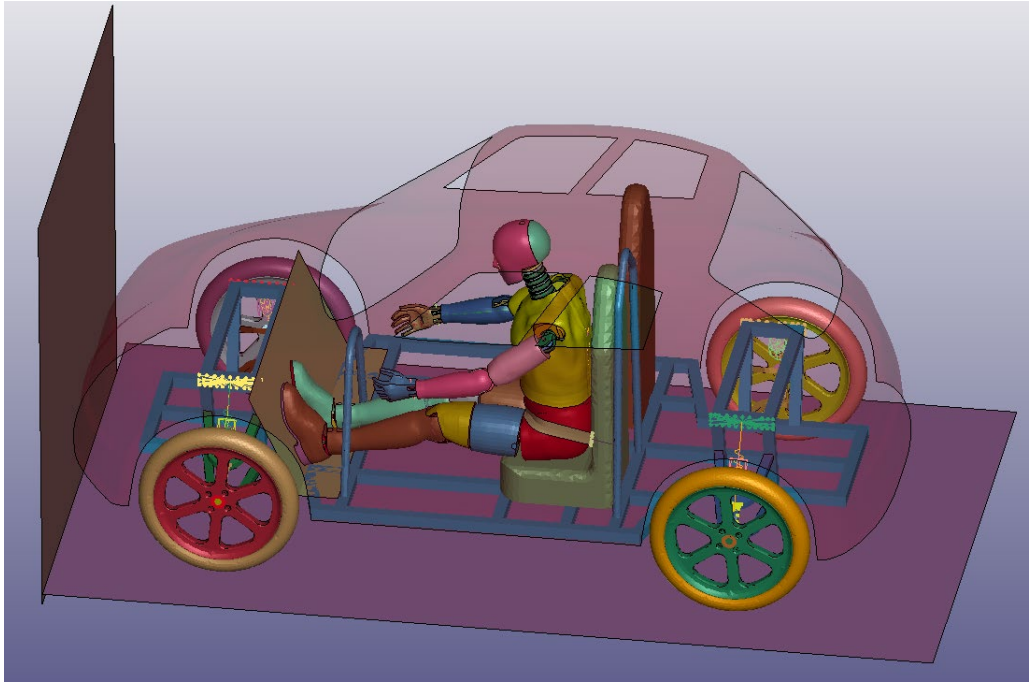
Çizelge 3.2. Tamamlayıcı parçalar

No	Parça Adı	Parça Biçimi	Adet
1	Duvar	Yüzey (Surface)	1
2	Zemin	Yüzey (Surface)	1
3	Kukla Model	Katı ve Yüzey (Solid and Surface)	1

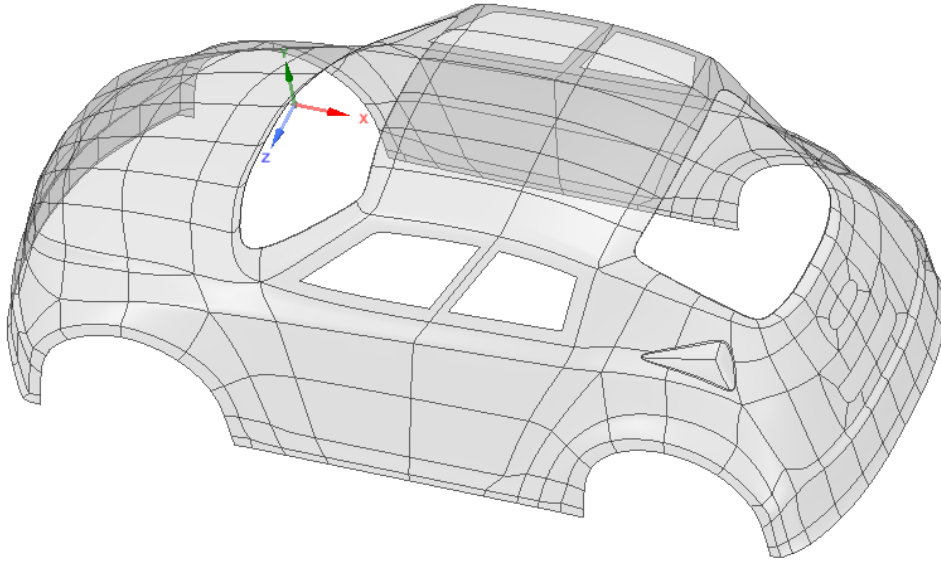
Şekil 3.3 ve 3.14 arasında gösterilen araç model parçalarının görselleri, ANSYS Workbench LS-DYNA SpaceClaim modülünden, kukla model (dummy) içeren görseller ise LS-PrePost aracılığı ile alınmıştır.



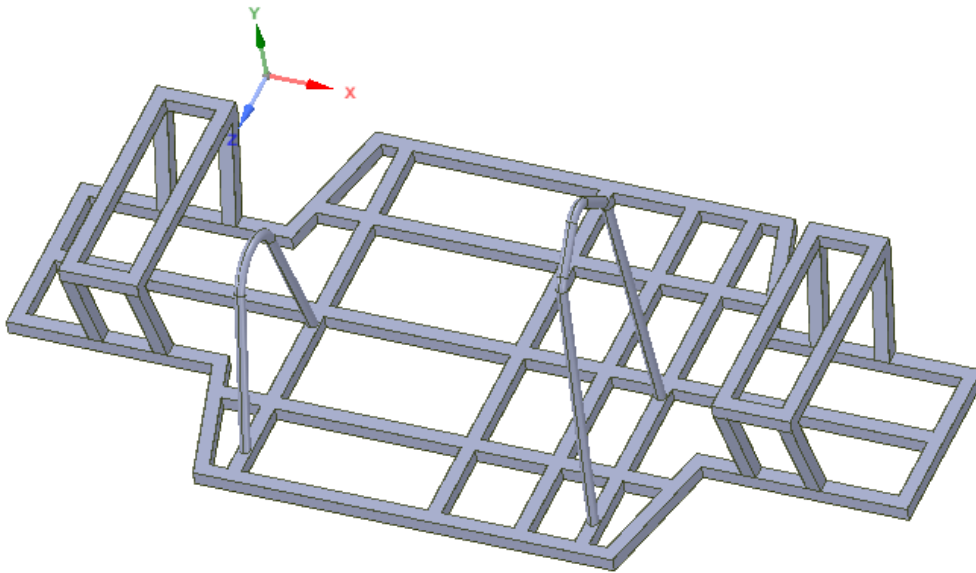
Şekil 3.3. Düzenlenen model görüntüsü



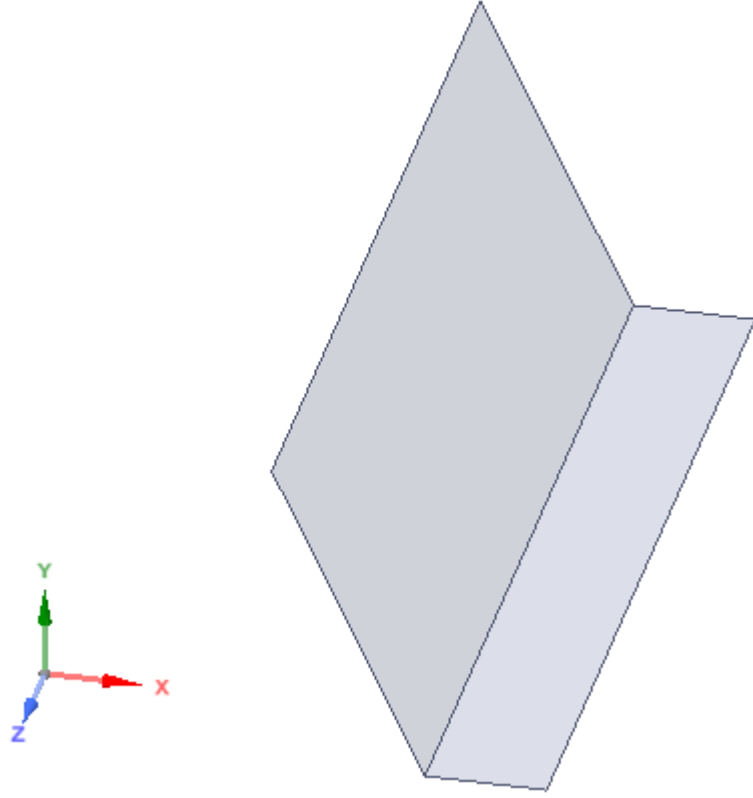
Şekil 3.4. Çarpışma analizi için kullanılan model görüntüsü



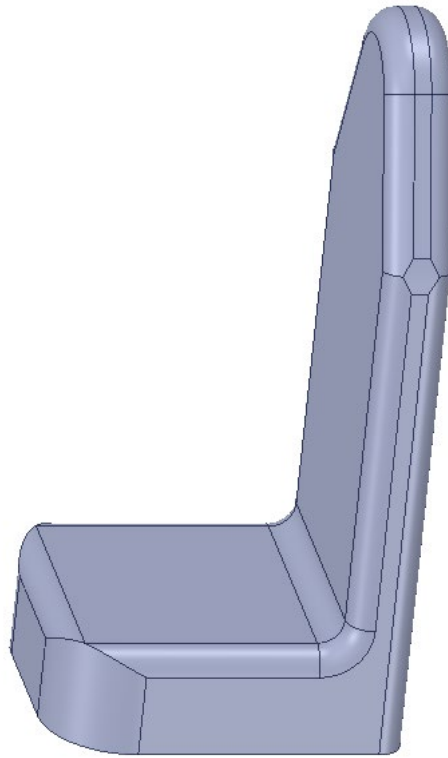
Şekil 3.5. Kabuk kasa



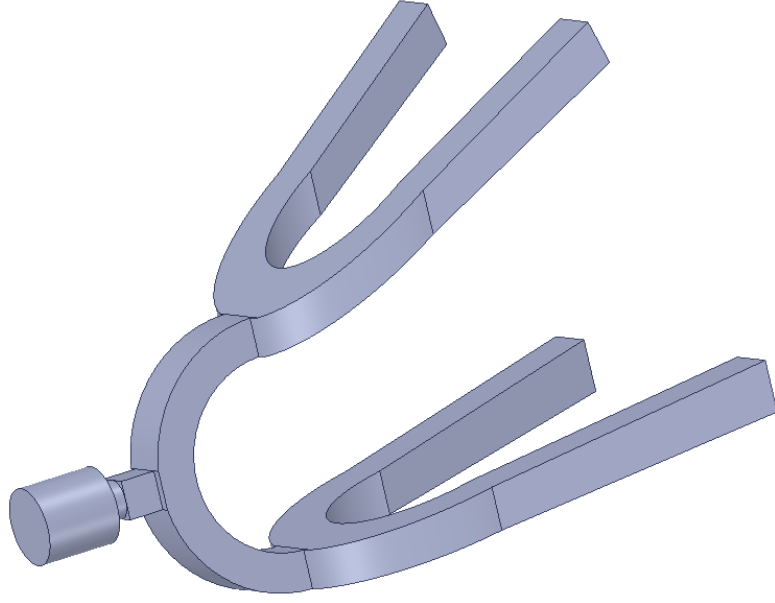
Şekil 3.6. İskelet şasi



Şekil 3.7. Destek sacı



Şekil 3.8. Koltuk



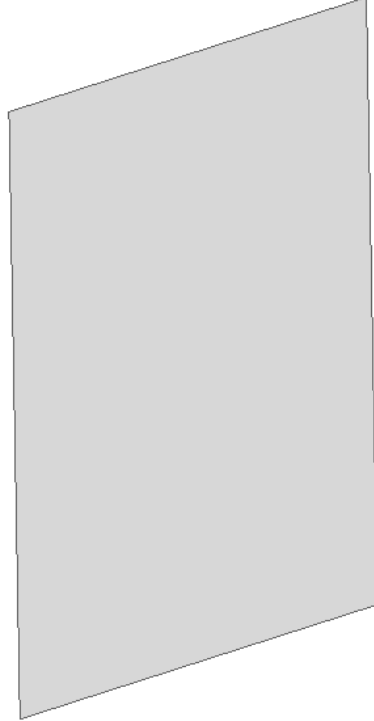
Şekil 3.9. Amortisör



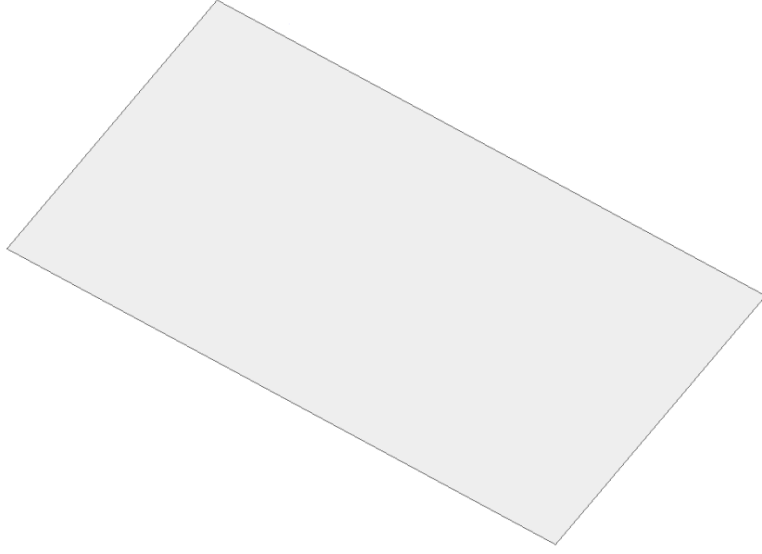
Şekil 3.10. Jant



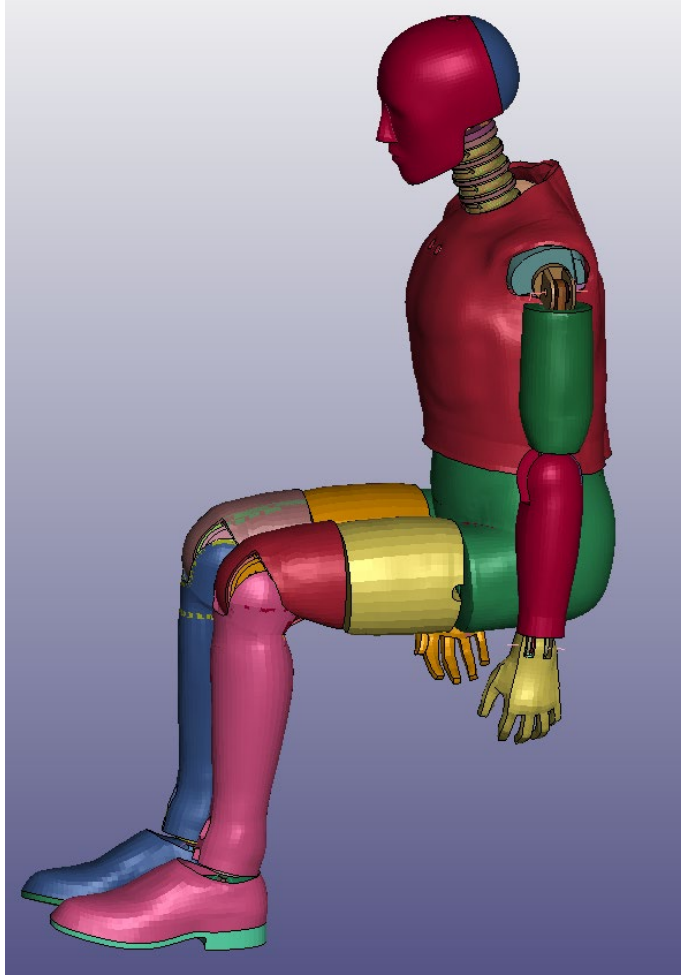
Şekil 3.11. Lastik



Şekil 3.12. Duvar



Şekil 3.13. Zemin



Şekil 3.14. Kukla model (dummy)

3.2. Analiz için İzlenen Aşamalar

Bu bölümde, çarpışma analizinde izlenen aşamalar açıklanacaktır.

ANSYS Workbench LS-DYNA ve LS-PrePost kullanılarak yapılan analizin çözüm yolu basamakları aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılabilir.

- Analizde kullanılacak tasarım parçalarının malzeme niceliklerinin tanımlanması
- Model montaj dosyasının aktarılması
- Tanımlanan malzemelerin model parçalarına atanması
- Analiz için gerekli koordinat sistemlerinin oluşturulması
- Parça kontakları, mafsallar, amortisör için yay ve sönümlenme sabitleri ve parçalar arası bağlantı durumlarının tanımlanması
- Model ağ yapısının (mesh) oluşturulması
- Başlangıç koşullarının (initial conditions), yer çekimi ivmesinin, lastik içi hava basıncının, uzaktan yer değiştirmenin (remote displacement) değerlerinin girilmesi ve analiz ayarlarının yapılması
- Çözüm dosyasının oluşturulması (k file)
- Oluşturulan çözüm dosyasının kukla model (dummy) eklenmesi için LS-PrePost ortamında gerekli birim dönüşümlerinin yapılması
- LS-PrePost ile dummy konumlandırmasının yapılması, kontaklarının, hızının ve emniyet kemerinin tanımlanması
- LS-PrePost ile nihai k dosyasının oluşturulması
- ANSYS Mechanical APDL Product Launcher ile k dosyasının çözülmesi
- İşlem sonrası (post processing) sonuç dosyalarının ve grafiklerin elde edilmesi

3.2.1. Malzeme Niceliklerinin Tanımlanması

Bu bölümde analizi yapılacak olan parçaların malzeme niceliklerinin belirlenerek ANSYS Workbench LS-DYNA ortamına aktarılması ile ilgili hususlar üzerinde durulacaktır.

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 tanımlanacaktır.

Analizi tamamlayıcı parçalardan duvar ve zemin yapı çeliği olarak tanımlanacaktır. Analize sonradan eklenecek olan kukla model (dummy) malzeme parametreleri değiştirilmeden kullanılacaktır.

Analizde kullanılan izotropik elastik, anizotropik elastik, ortotropik malzemeler ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4-3.6 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. 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

Çizelge 3.5. Anizotropik elastik malzeme parametreleri

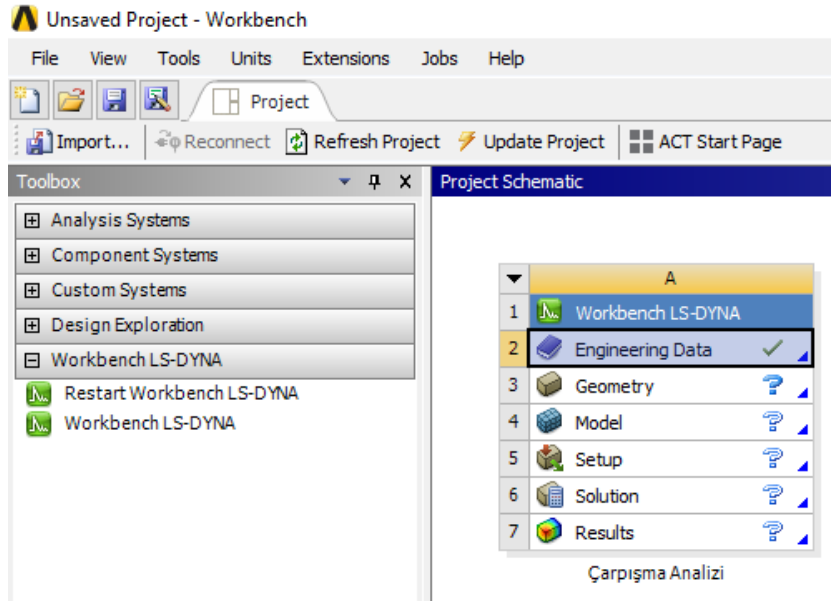
Malzeme Özellikleri	Silikon					
Yoğunluk [kg/m ³]	2330					
Anizotropik elastisite	166E3					
	64E3	166E3				
	64E3	64E3	166E3			
Young modülleri [MPa]	0	0	0	80E3		
	0	0	0	0	80E3	
	0	0	0	0	0	80E3

Çizelge 3.6. 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

Belirlenen malzemelerin mekanik özellikleri Şekil 3.15'te gösterilen ANSYS Workbench LS-DYNA mühendislik verisi (engineering data) bileşeni yardımıyla tanıtılır.



Şekil 3.15. Mühendislik verisi bileşeni

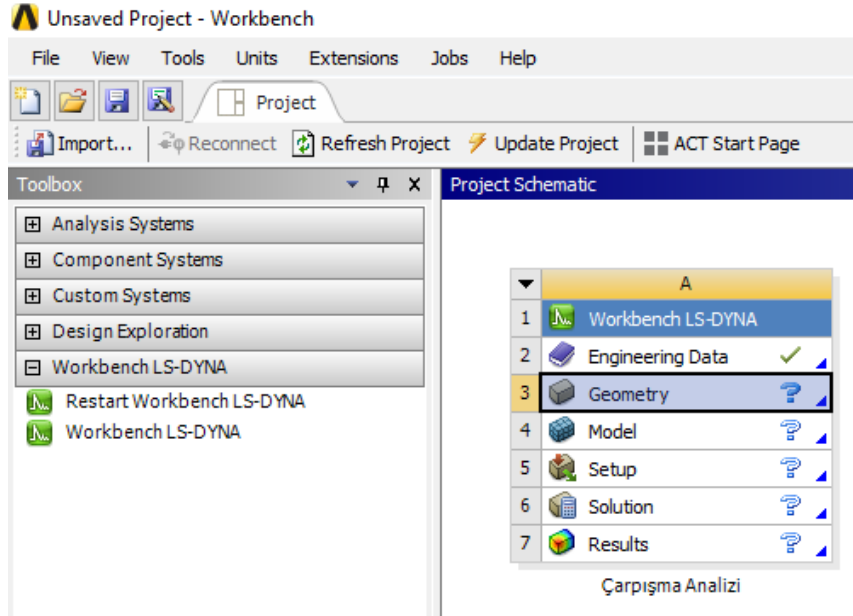
Şekil 3.16'da malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra mühendislik verisi bileşeni görülmektedir.

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Aluminum Alloy			General_Materials.xml	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet			Composite_Materials.xml	
5	Rubber			D:\Tez Dokümanları\ANSYS Workbench Files\crash_files\jdp0\SY	
6	Silicon Anisotropic			General_Materials.xml	
7	Structural Steel			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Şekil 3.16. Mühendislik verisi bileşeninde tanımlanan malzemeler

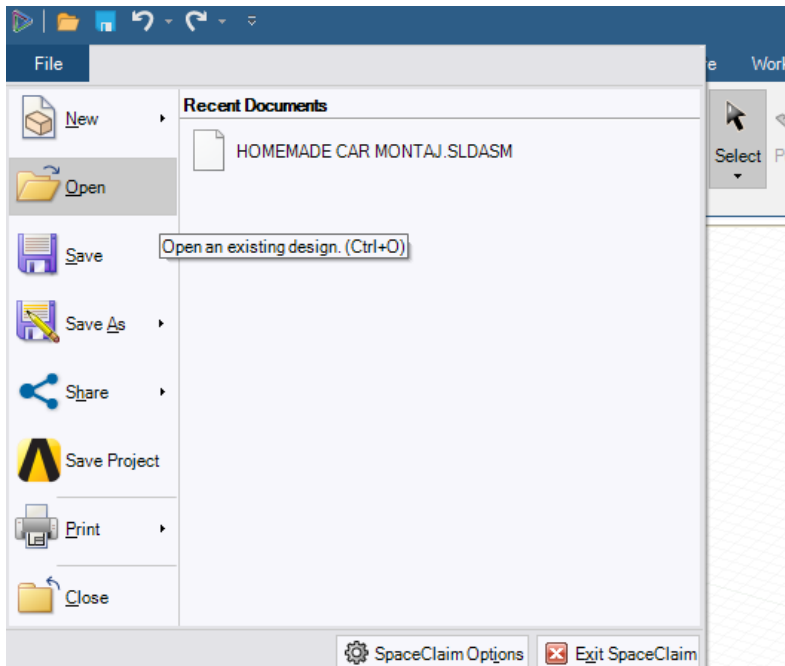
3.2.2. Model Montaj Dosyasının Workbench Ortamına Aktarılması

ANSYS Workbench LS-DYNA mühendislik verisi bileşeninde model üzerinde kullanılacak malzemeler ve mekanik özellikleri tanımlandıktan sonra CAD ortamında son hali verilen model montaj dosyasının ANSYS Workbench LS-DYNA geometri bileşeni üzerinden tanıtılması gerekmektedir.



Şekil 3.17. Geometri bileşeni

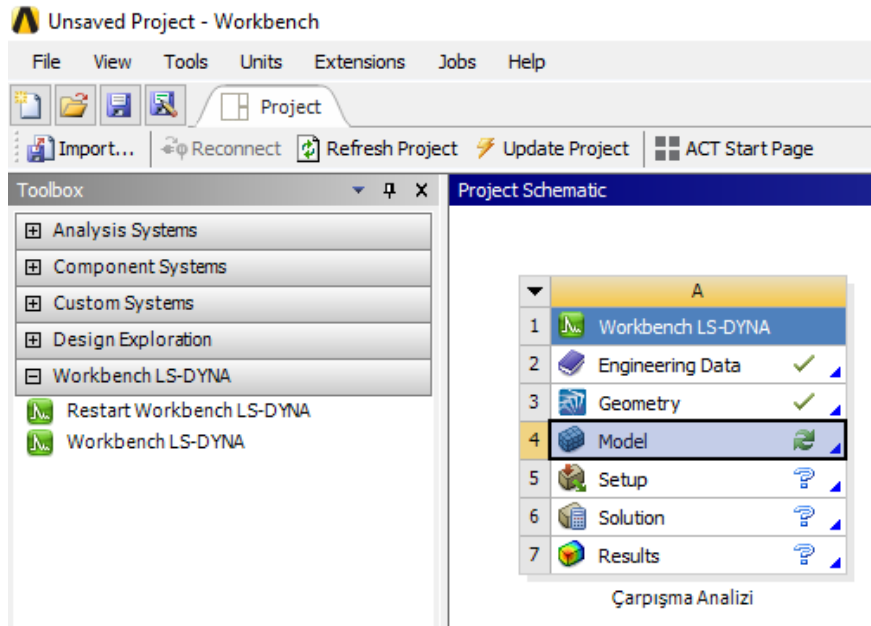
Geometri bileşenine girildiğinde ANSYS CAD ara yüzü olan SpaceClaim açılmaktadır. SpaceClaim üzerinden hazırlanan montaj dosyası sisteme tanıtılır.



Şekil 3.18. SpaceClaim montaj dosyası aktarımı

3.2.3. Tanımlanan Malzemelerin Model Parçalarına Atanması

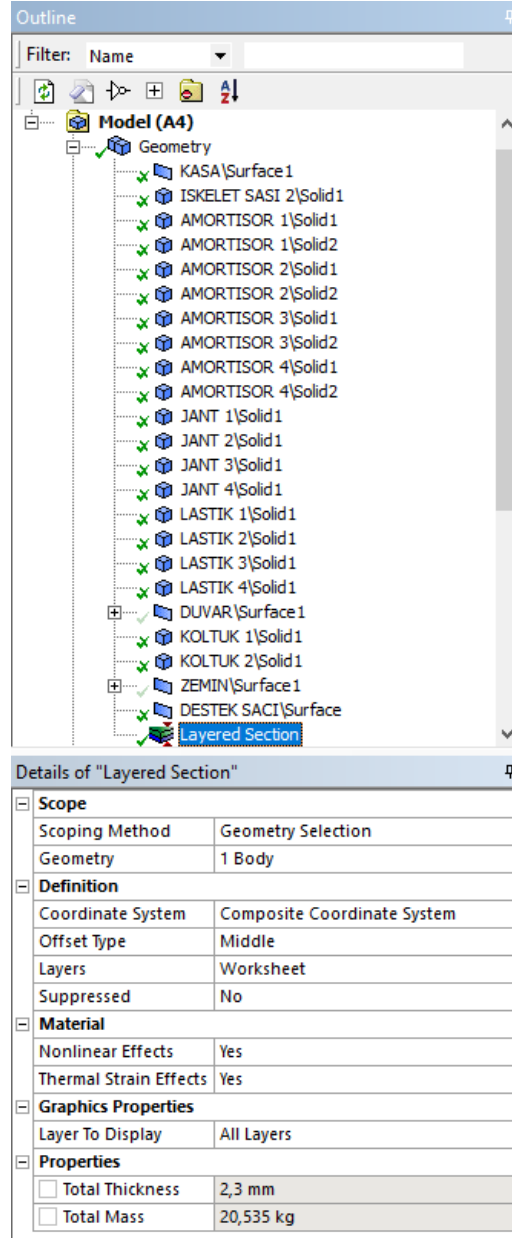
Analiz için tanımlanan malzemelerin model parçalarına atanması ve parçaların üzerindeki ayarlamalar ANSYS Workbench LS-DYNA Model Bileşeni üzerinden yapılır.



Şekil 3.19. Model bileşeni

Model bileşenine girildiğinde Mechanical ara yüzü açılmaktadır. Mechanical ara yüzünde, geometri alt başlığında her bir parça için belirlenen malzemeler seçilir. Yüzey olarak tasarlanan zemin, duvar, destek sacı ve kabuk kasa için kalınlık değerleri sırasıyla; 0.02, 0.02, 1 ve 2.3 mm olarak girilir. Ayrıca analizde herhangi bir deformasyona uğramayacak olan duvar ve zemin parçaları rijit olarak tanımlanır. Analizde deformasyonu izlenecek diğer parçalar ise esnek olarak tanımlanır.

Ayrıca geometri alt başlığı ile dokuma karbon epoksi kompozit kabuk kasa parçasına katman ekleme işlemi yapılır. Normal şartlarda kabuk kasa yüzey parçasının, birçok ayrı alt bölüme bölünmesi ve her bir alt bölüme yüzey normali +z eksenine olacak şekilde koordinat sistemi tanımlanması gerekmektedir. Ancak yüzey parçasının kompleks yapıya sahip olması ve bu yüzden alt bölümlere bölünememesi nedeni ile kabuk kasanın tavan kısmına yüzey normali +z eksenine olacak şekilde koordinat sistemi tanımlanmıştır. Tanıtılan koordinat sistemi ile kabuk kasaya +z yönünde 1 adet katman tanımlanmıştır.

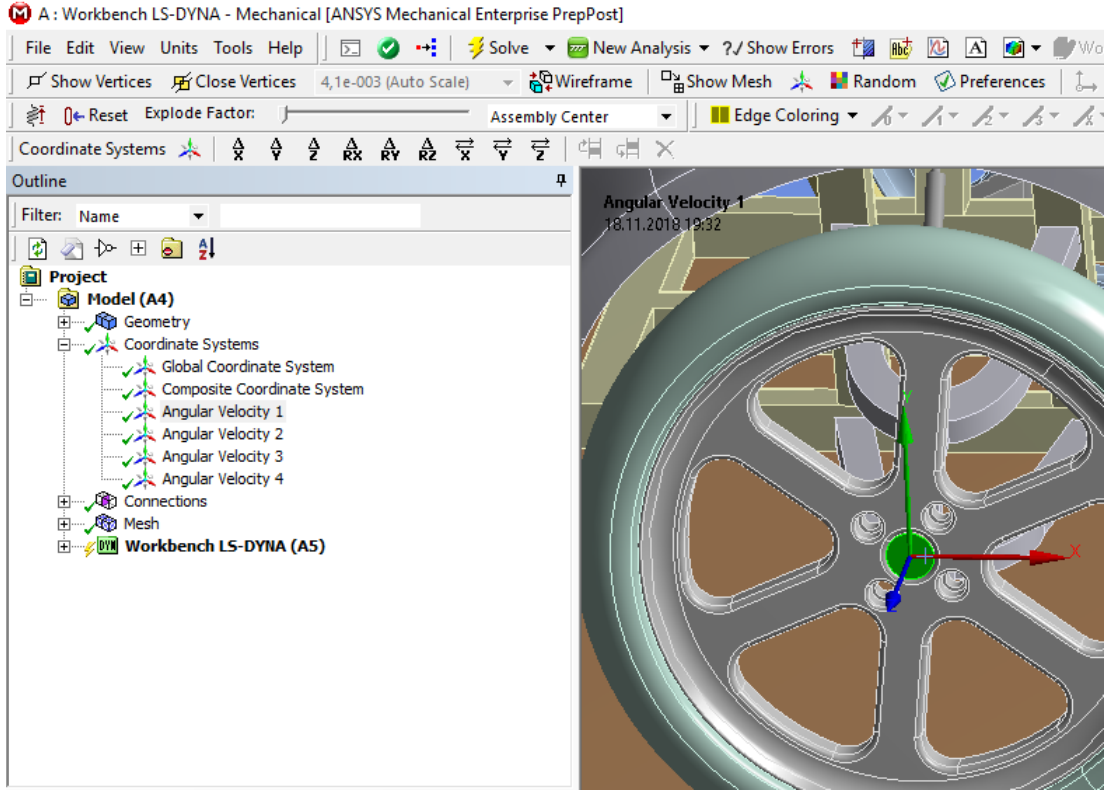


Şekil 3.20. Mechanical ara yüzü geometri alt başlığı

3.2.4. Analiz için Gerekli Koordinat Sistemlerinin Oluşturulması

Analizde dönerek öteleme hareketi yapması gereken jant ve lastiklere, açılmal hız başlangıç koşulunun verilebilmesi için geometrik merkezlerinin bulunduğu noktaya koordinat sistemi oluşturulması gereklidir.

Ayrıca bir önceki bölümde bahsi geçen kabuk kasa yüzeyine katman atanabilmesi için tavan kısmına koordinat sistemi tanımlanması gerekmektedir.

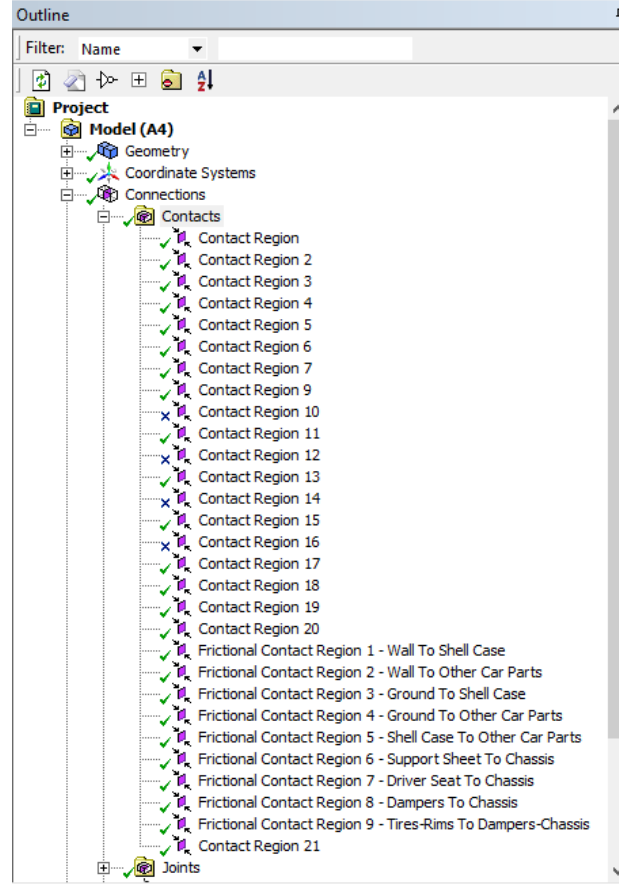


Şekil 3.21. Mechanical ara yüzü koordinat sistemleri

3.2.5. Parça Kontaklarının, Mafsalların, Amortisör Verilerinin ve Parçalar Arası Bağlantı Durumlarının Tanımlanması

Analizin doğru bir şekilde yapılabilmesi için tasarım modelinde yer alan parçaların birbirleri ile etkileşimlerinin iyi tanımlanmış olması önem arz etmektedir.

Bunun için bağlantılar (connections) alt başlığının içinde yer alan kontaklar (contacts) başlığı kullanılmalıdır. Model tasarım aşamasında CAD ortamında belirlenen montaj ilişkileri kontaklar başlığı altında görülebilir. Analizde oluşabilecek uygunsuzlukların önüne geçmek için kontaklar başlığı altında görünen bütün kontakların silinip otomatik bağlantılar oluşturma sureti ile kontakların yeniden oluşturulması önemli bir uygulamadır.



Şekil 3.22. Mechanical ara yüzü kontaklar

CAD ortamında görünen kontakların tamamının silinip otomatik kontak oluşturulduktan sonra kontakların teker teker incelenmeleri gerekmektedir. Fiziksel olarak birbirine bağlı parçalar arasında bağlı (bonded) kontak, birbirlerine fiziksel olarak bağlı olmayan ve herhangi bir nedenle birbirlerine temas etme durumu olabilen parçalar için ise sürtünmeli (frictional) kontak seçenekleri kullanılır.

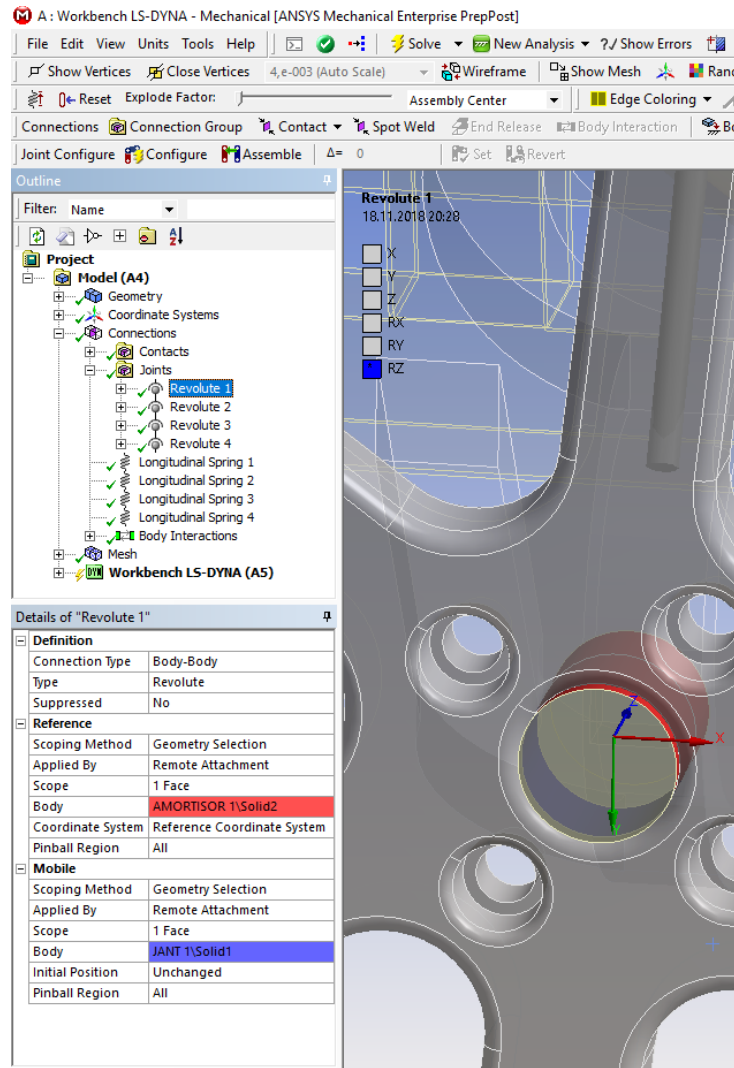
Otomatik oluşturulan kontaklar incelendiğinde; jant iç boşluğu ile amortisör muylu parça yüzeyi ve lastik ile zemin arasında bağlı (bonded) kontakların olduğu görülmektedir. Bahse konu parçalar arası kontakların, fiziksel olarak uygun olmamalarından dolayı kaldırılmaları veya silinmeleri gerekmektedir. Şekil 3.22’de yanında “x” işareti bulunan kontaklar kaldırılmış (suppress) kontaklardır.

Mechanical ara yüzünde kaldırılmış (suppress) öğeler, çözüm aşamasında hesaba katılmazlar. Ancak devreye verdiklerine (unsuppress) çözüme dahil edilirler. Fiziksel olarak uygun olmayan kontakların kaldırılmasının ardından kontakların birbirlerinden ayrılmaları amacı ile kontaklara tutunma payı verilmesi gerekmektedir.

Bunun için kabuk kasa ile şasi arasındaki bağlı (bonded) kontağa 15 mm ve diğer bağlı kontaklara ise 2 mm maksimum ofset değeri verilmiştir. Sürtünmeli kontak için ise parçalar arası herhangi bir bağ oluşmadığından dolayı maksimum ofset değeri tanımlanamamaktadır.

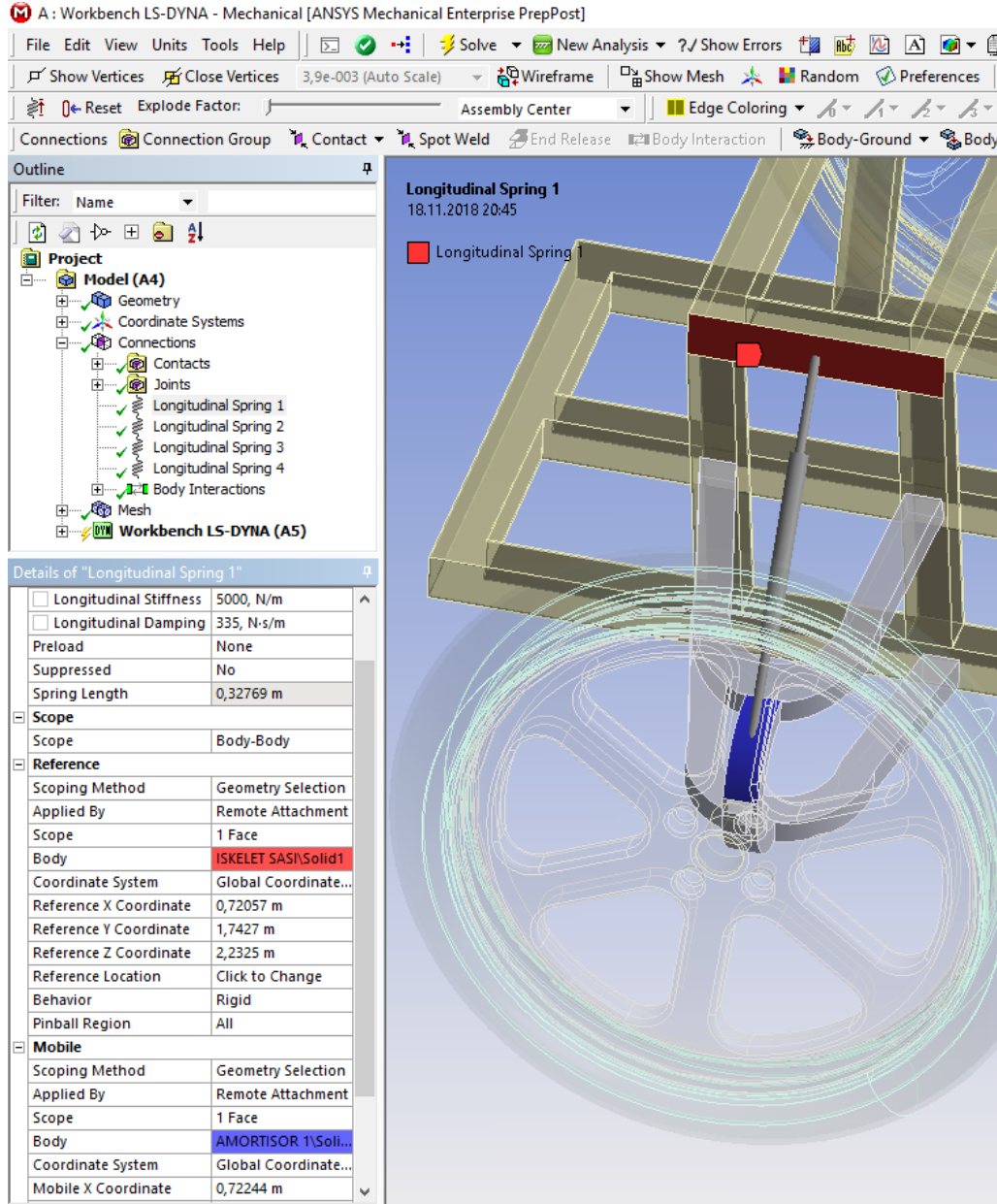
Sürtünmeli kontaklar için statik sürtünme katsayısı 0.2, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.1 alınmıştır.

Kontak tanımlamasının yapılmasının ardından birbirleri ile hareket ilişkisi bulunan jant iç yüzeyi ve amortisör muylu dış yüzeyi arasında dönel mafsall oluşturulması gerekmektedir. Bunun için “mafsallar” başlığı içinde 4 adet dönel mafsall oluşturulur. Şekil 3.23’te görüleceği üzere sabit (reference) yüzey olarak amortisör muylusu dış yüzeyi, hareketli (mobile) yüzey olarak da jant iç delik yüzeyi seçilir.



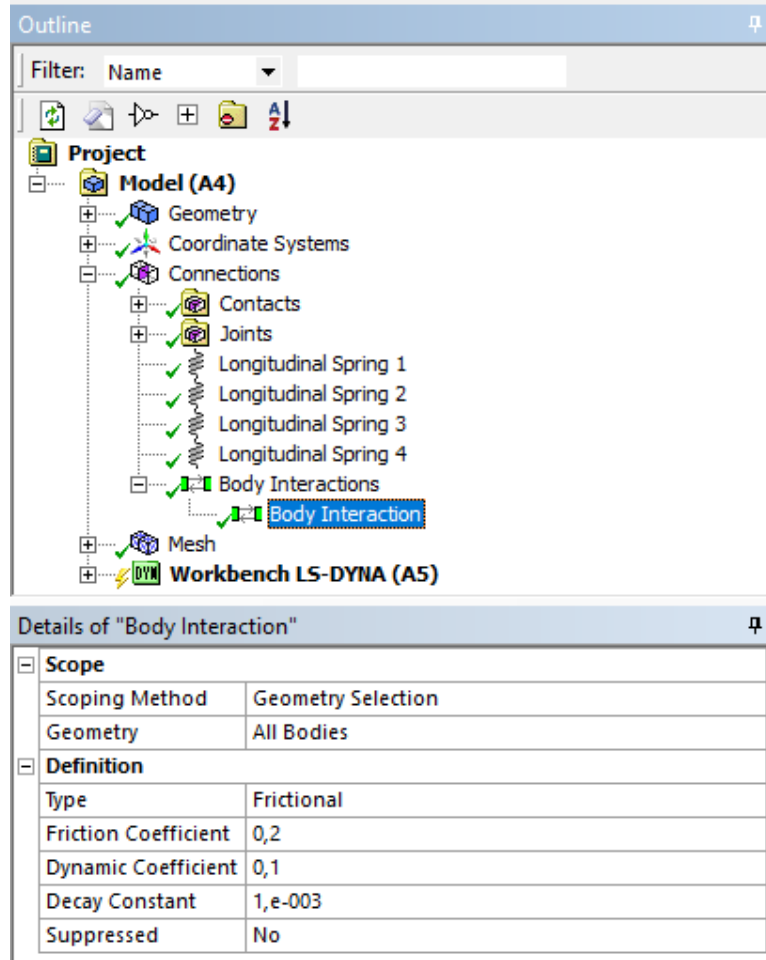
Şekil 3.23. Mechanical ara yüzü mafsallar

Amortisör parçasının yay sabiti değeri 5000 N/m, sönümleme katsayısı ise 335 Ns/m olarak tanımlanır. Şekil 3.24'te görüldüğü üzere yay konumunu belirlemek için sabit (reference) yüzey olarak iskelet şasinin üst yanak yüzeyi, mobil (hareketli) yüzey olarak ise de amortisör parçasının alt kavisli dış yüzeyi seçilir.



Şekil 3.24. Mechanical ara yüzü yaylar

Bağlantılar alt başlığında yer alan cisim etkileşimleri başlığı ile etkileşim halinde olan bütün parçaların bağlantı tanımları yapılır. Bu başlık altında bağlantı tipi sürtünmeli, statik sürtünme katsayısı 0.2, dinamik sürtünme katsayısı 0.1 olarak girilmiştir. Şekil 3.25'te değerleri girilmiş olan cisim etkileşimleri penceresi görülmektedir.

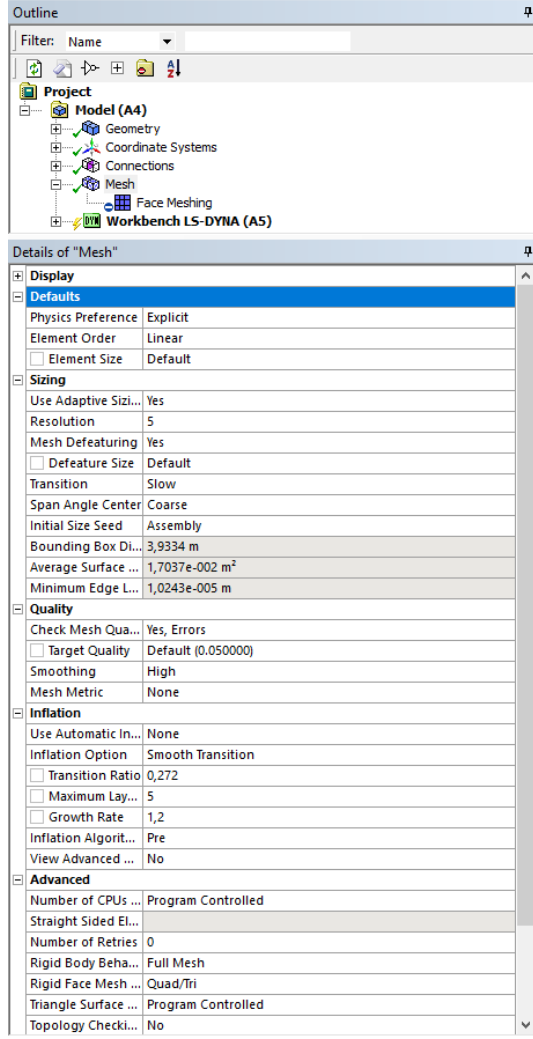


Şekil 3.25. Mechanical ara yüzü cisim etkileşimleri

3.2.6. Model Ağ Yapısının Oluşturulması

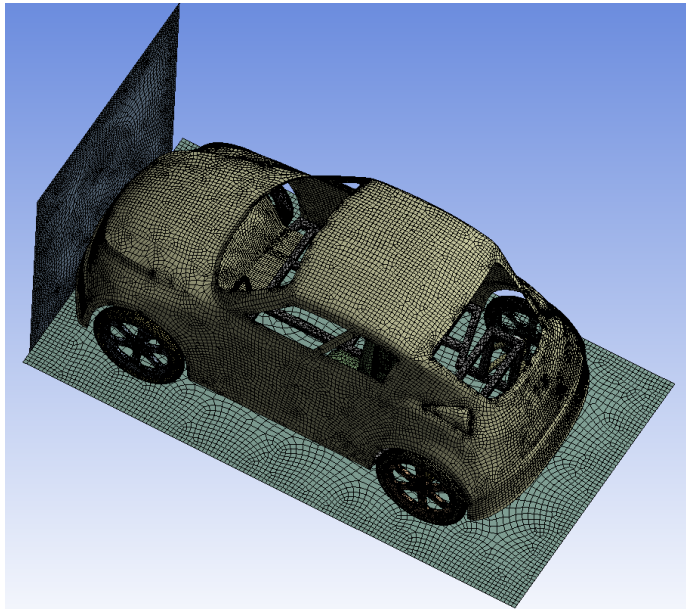
Modelin, sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilebilmesi için uygun bir ağ yapısı (mesh) oluşturulması gerekmektedir. Ağ yapısı oluşturmadan önce tanımlanan değerler Şekil 3.26'da gösterilmektedir.

Modelin ağ yapısının oluşturulması sırasında iskelet şasinin geometrisinden dolayı hata oluşmuştur. Bu yüzden iskelet şasinin üzerine yüzey ağ yapılandırması (face meshing) unsuru ile ağ yapısının oluşturulması sağlanmıştır.



Şekil 3.26. Mechanical ara yüzü ağ yapısı

Şekil 3.27’de ağ yapısı tanımlanan model gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Ağ yapısı tanımlanan model

3.2.7. Başlangıç Koşullarının Tanımlanması

Başlangıç koşulları ilgili yapılacak düzenlemeler, Workbench LS-DYNA kurulum bileşeni içinde başlangıç koşulları (initial conditions) alt başlığı ile yapılır.

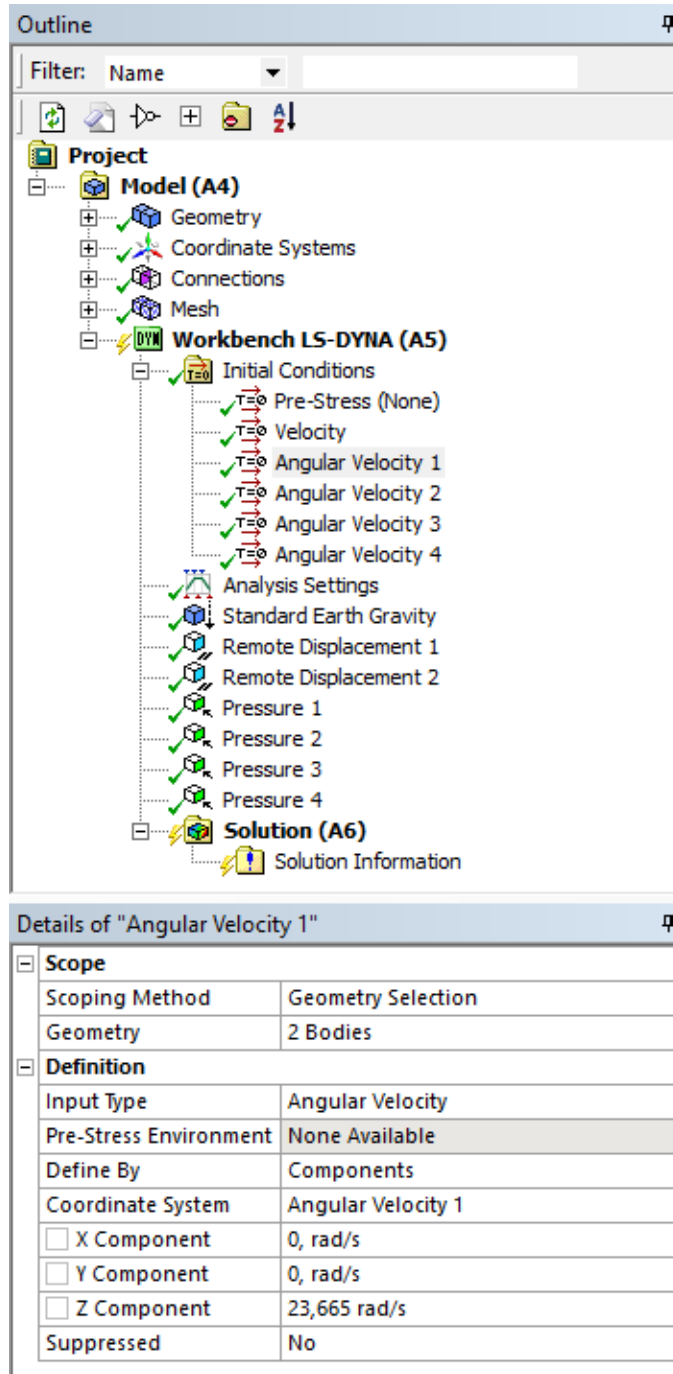
Fiziksel olarak hareket etmesi gereken araç ve parçalarına başlangıç koşulları alt başlığı ile öteleme ve/veya dönme hızı verilmesi gerekmektedir. Aracın bütün parçaları için sabit 7.1 m/s (25.56 km/h) hız değeri, lastik ve jant parçalarına ise ilaveten 23.665 rad/s (225.98 rpm) dönme hız değeri tanımlanır.

Açısal hız tanımlanmasında her bir jant-lastik grubu için önceden oluşturulan koordinat sistemleri kullanılır. Şekil 3.28 ve 3.29'da hız tanımlamalarına ilişkin değerler gösterilmektedir.

The image shows the LS-DYNA Workbench Outline and the Details of Velocity panel. The Outline panel shows the project structure, including Model (A4), Workbench LS-DYNA (A5), and Solution (A6). The Details of Velocity panel shows the following information:

Details of "Velocity"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	21 Bodies
Definition	
Input Type	Velocity
Pre-Stress Environment	None Available
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	-7,1 m/s
<input type="checkbox"/> Y Component	0, m/s
<input type="checkbox"/> Z Component	0, m/s
Suppressed	No

Şekil 3.28. Mechanical ara yüzü öteleme hızı tanımlanması



Şekil 3.29. Mechanical ara yüzü açısal hız tanımlanması

3.2.8. Analiz Ayarlarının Yapılması

Analiz için gereken başlangıç koşullarının tanımlanmasından ardından analiz ayarlarının yapılması gerekmektedir. Bunun için ilk önce analiz ayarları (analysis settings) alt başlığının içinde analiz süresi 0.15 s olarak ayarlanmıştır.

Bitiş zamanı (end time), analizin ne zaman sonlandırılacağını belirleyen bir parametredir. Yapılan çarpışma analizinde incelenecek bölge çarpışmanın gerçekleştiği

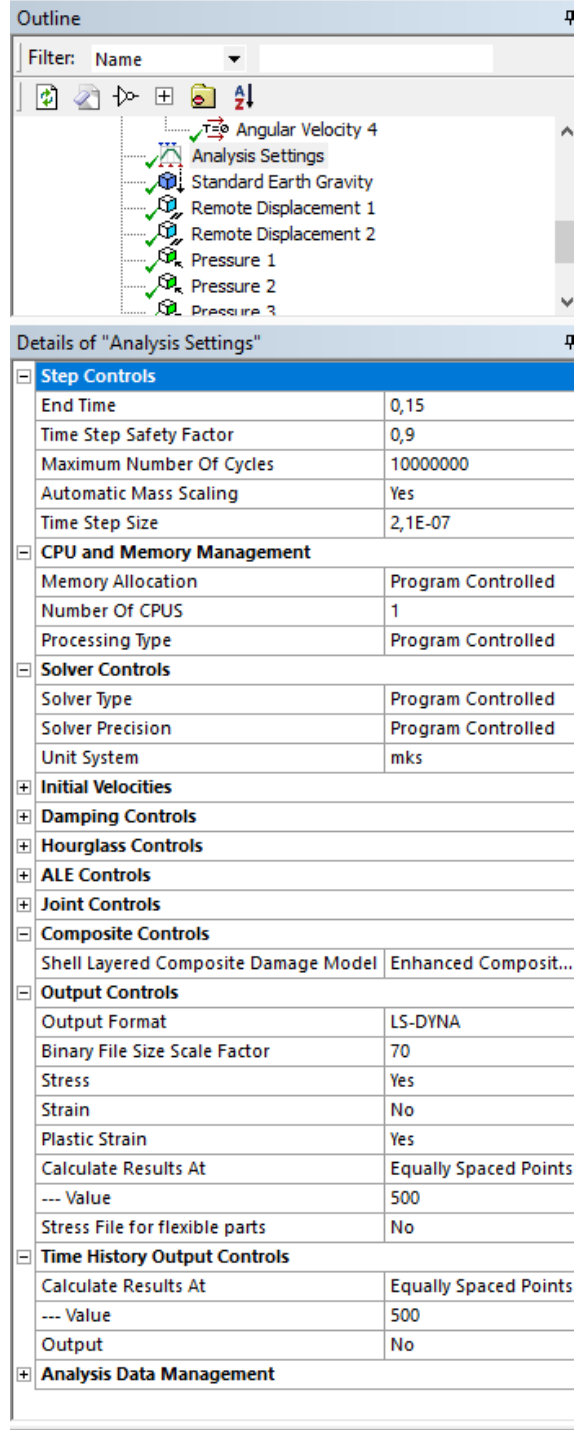
bölgedir. Bu yüzden analizin çarpışmadan önce bitmemesi gerekmektedir. Bitiş zamanı çok küçük seçildiğinde bu istenmeyen durum gerçekleşecektir. Bitiş zamanının çok büyük seçilmesi durumunda ise gereksiz yere iterasyonlar yapılacağından zaman kaybı yaşanacaktır.

Analizi yapılacak olan model için zaman adımı (time step) tanımlanarak çözüm süresini kısaltmak amacı ile kütle ölçeklendirme (mass scaling) aktif hale getirilebilir. Kütle ölçeklendirmesinde, modele fiziksel olmayan bir kütle eklenerek çözüm süresi kısaltılır [22].

Yapılan analizde çözüm süresini kısaltmak amacı ile otomatik kütle ölçeklendirme (automatic mass scaling) aktif edilerek zaman adımı $2.1E-7$ s olarak tanımlanmıştır. Çözüm birim sistemi MKS, çözümün ANSYS Mechanical APDL Product Launcher vasıtası ile yapılabilmesi için format LS-DYNA olarak tanımlanmıştır.

Workbench Mechanical ara yüzünde sonuçların detaylı incelenememesi ve çözüm sonrası uygulamasının yetersiz kalmasından dolayı analiz çözümünün ANSYS Mechanical APDL Product Launcher uygulaması yardımı ile çözülmesi uygun olacaktır. Çözüm ardından elde edilen sonuç dosyaları LS-PrePost ile detaylı incelenebilecektir. Bu yüzden çıktı formatı LS-DYNA olarak tanımlanmıştır.

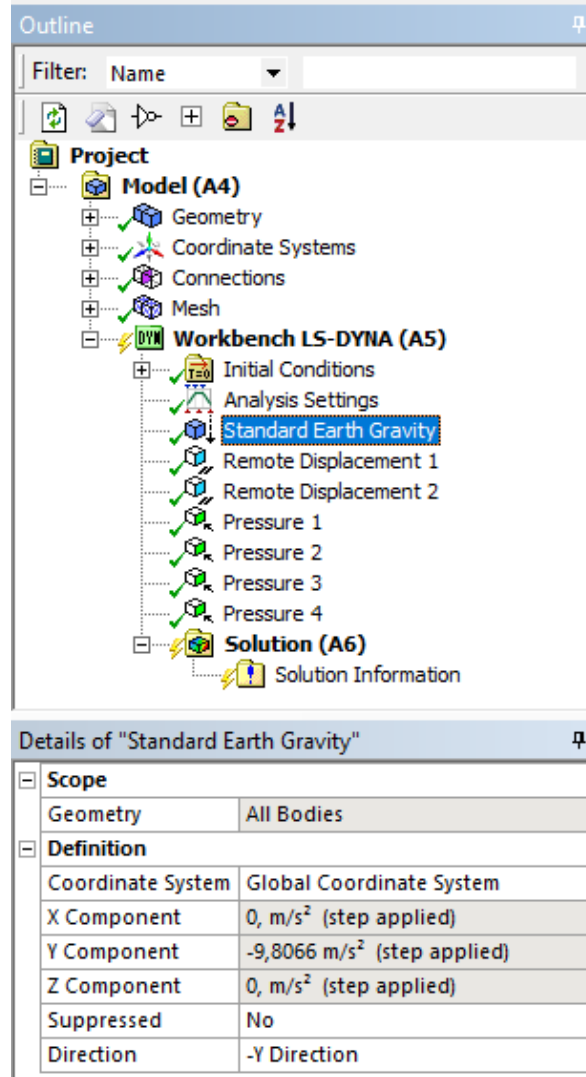
Çözüm sırasında hem bilgisayar depolama alanından optimum fayda sağlamak ve hem de detaylı inceleme imkânı için çözümün 500 eşit aralıklı olarak yapılması sağlanmıştır. Analiz ayarları ilgili yapılan tanımlamalar Şekil 3.30'da gösterilmektedir.



Şekil 3.30. Mechanical ara yüzü analiz ayarları

4.2.9. Yerçekimi İvmesinin Tanımlanması

Analiz için modele yer çekimi ivmesi atanması için gerekmektedir. Yerçekimi ivmesi, global koordinat sistemine göre -y yönünde tanımlanmıştır. Tanımlanan yer çekimi ivmesine ait görsel Şekil 3.31'de yer almaktadır.

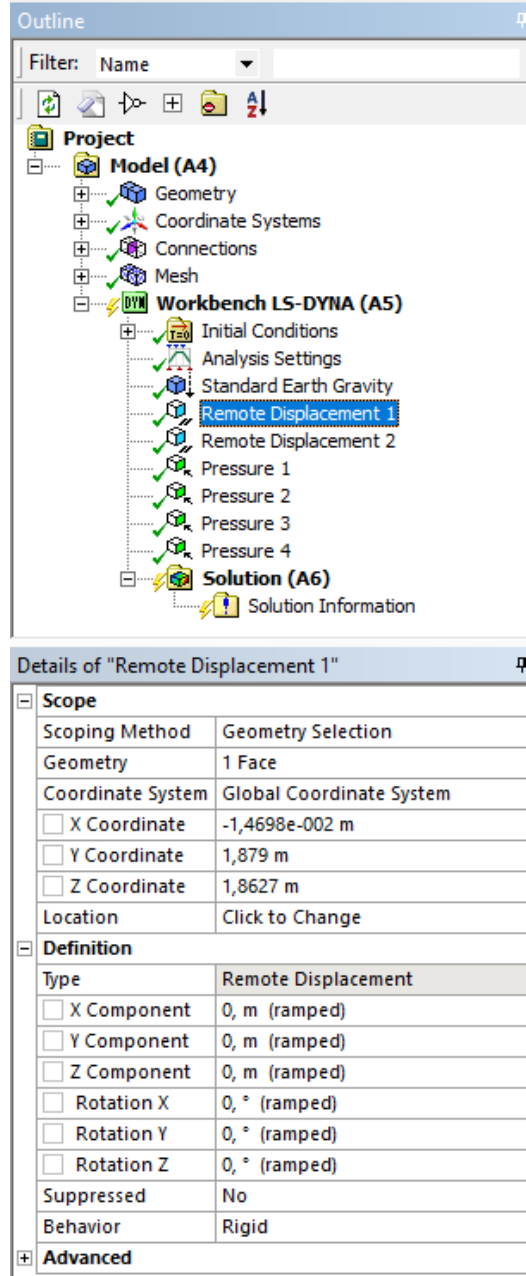


Şekil 3.31. Mechanical ara yüzü standart yerçekimi ivmesi

3.2.10. Uzaktan Yer Değiştirme Tanımlanması

Analizde kullanılan ve rijit malzeme olarak tanımlanan duvar ve zemin parçalarının sabitlenmesi uzaktan yer değiştirme (remote displacement) alt başlığı ile yapılmıştır.

Uzaktan yer değiştirme ile ilgili girilen parametreler Şekil 3.32’de gösterilmektedir.

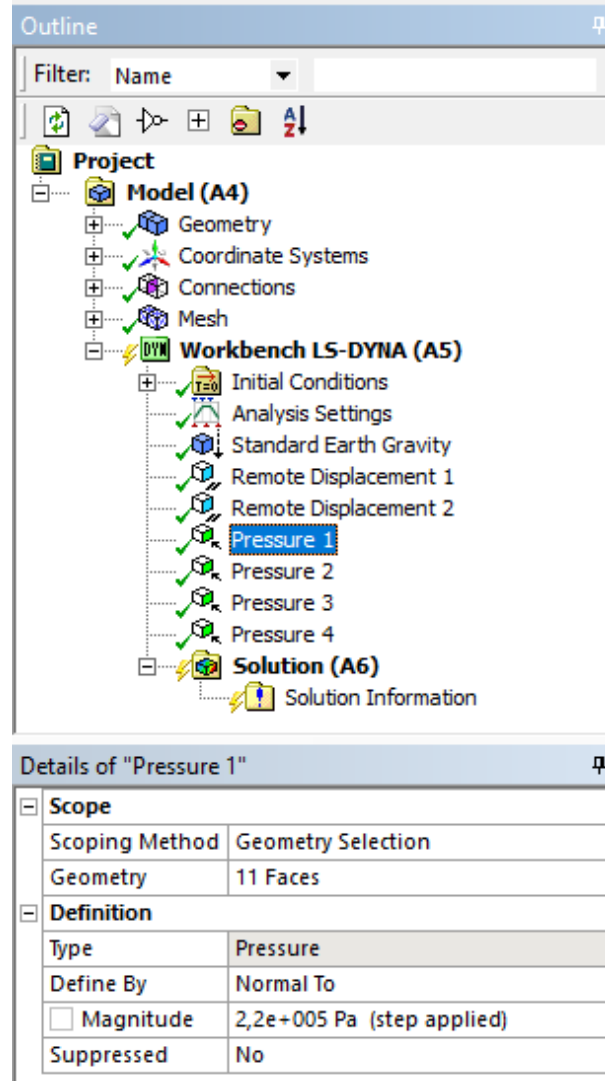


Şekil 3.32. Mechanical ara yüzü uzaktan yer değiştirme

3.2.11. Basınç Değerlerinin Tanımlanması

Araç modeli lastik içi basınç değerinin tanımlanması için basınç (pressure) alt başlığı kullanılmalıdır. Lastiklerin hava ile temas eden iç yüzeyleri seçilerek 0,22 MPa basınç değeri atanmıştır.

Basınç ile ilgili yapılan tanımlamalar Şekil 3.33'te gösterilmektedir.

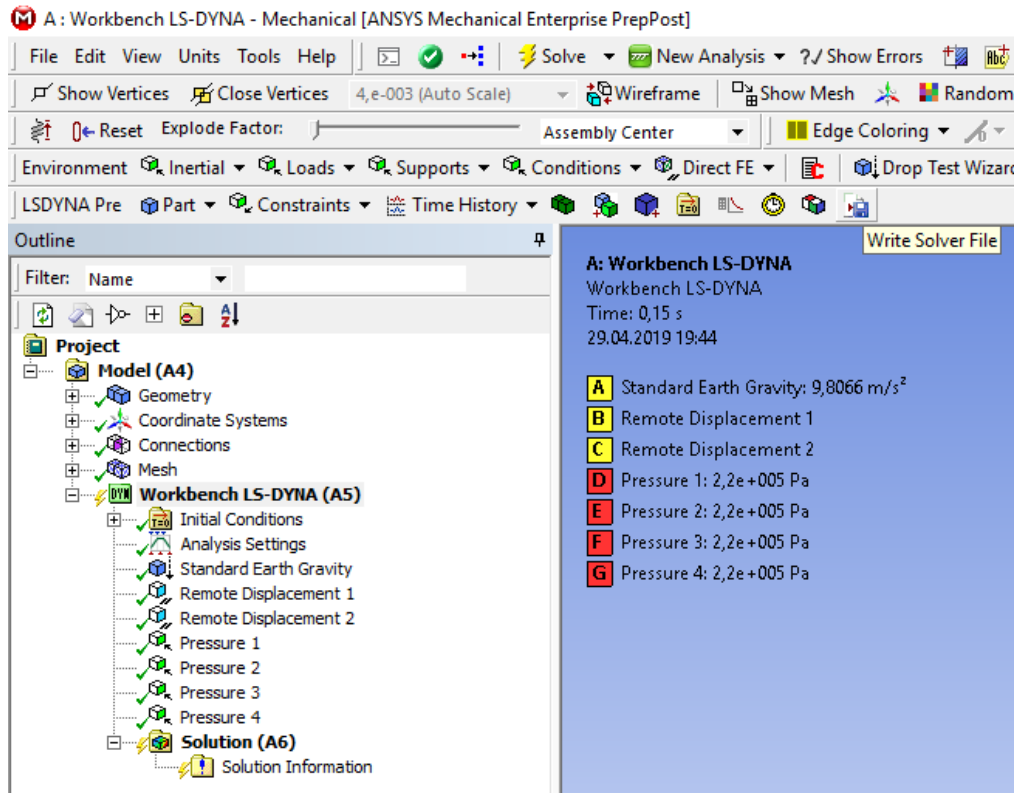


Şekil 3.33. Mechanical ara yüzü basınç

3.2.12. Çözüm Dosyasının Oluşturulması

Analiz için gerekli çalışmaların yapılmasının ardından çözüm için iterasyon yapılması gerekmektedir. Çözüm sonrası uygulamasının ve çoklu bilgisayar işlemcisi ile çözme seçeneğinin yetersiz kalması, sonuçların detaylı incelenememesi nedenleri ile iterasyonun ANSYS Workbench LS-DYNA ortamında çözülmesi uygun görülmemiştir.

Çözüm için ilk önce çözüm dosyasının (k file) oluşturulması gerekmektedir. Çözüm dosyasının oluşturulması Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Çözüm dosyasının oluşturulması

3.2.13. Kukla Model Eklenmesi için Birim Dönüşümlerinin Yapılması

Analizde insan modeli olarak Livermore Yazılım Teknoloji Şirketi (LSTC) tarafından önden çarpışma analizlerinde kullanılmak üzere tasarlanan LSTC_NCAC Hybrid III 50th Dummy modeli kullanılmıştır. Kullanılan kukla model versiyonu “LSTC_NCAC_H3_50TH_130528_BETA”dır.

Kukla model ile ilgili yapılan işlemlerde LSTC_NCAC Hybrid III 50th Dummy Positioning & Post-Processing dokümanı [23] referans alınmıştır.

Kullanılan kukla modelin mm-ms-kg-kN birim sistemi ile oluşturulmasından dolayı MKS birim sisteminde hazırlanan analiz birimlerinin dönüştürülmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kukla model analize katıldığından boyut ve diğer niceliklerin uyuşmadığı görülecektir. Bu yüzden ANSYS Workbench LS-DYNA Mechanical ara yüzünden birim sistemi NMM olarak değiştirilerek çözüm dosyasının güncellenmesi sağlanmalıdır. Daha sonra Çizelge 3.7’de verilen LS-DYNA uygun birimler tablosu kullanılarak NMM birim sisteminden kg-m-s-N birim sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.7. Birim dönüşüm çizelgesi

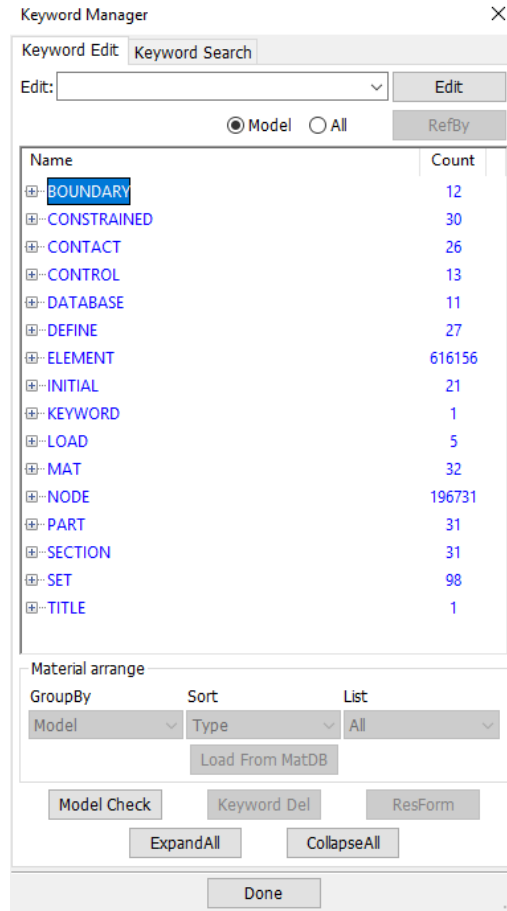
	Kütle	Uzunluk	Zaman	Kuvvet	Gerilme	Enerji
MKS	kg	m	s	N	Pa	J
NMM	ton	mm	s	N	MPa	Nmm
Dummy	kg	mm	ms	kN	GPa	kNmm

Çizelge 3.8’de LS-PrePost ortamında yapılan birim dönüşüm örnekleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. Örnek birim dönüşüm çizelgesi

	MKS	NMM	Dummy
Uzunluk	0.785	785	785
Zaman	0.15	0.15	150
Gerilme	2E11	2E5	2E2
Hız	7.1	7.1E3	7.1
Açısal hız	23.665	23.665	23.665E-3
İvme	9.81	9.81E3	9.81E-3
Yay sabiti	5000	5	5E-3
Sönümlenme sabiti	335	0.335	0.335

Birim dönüşümleri LS-PrePost ortamında “MAT, LOAD, INITIAL, DATABASE, CONTROL” anahtar kelimeleri (keyword) içindeki verilerin değiştirilmesi sureti ile yapılır. Anahtar kelimelerin yer aldığı anahtar kelime yöneticisi (keyword manager) Şekil 3.35’te gösterilmektedir.



Şekil 3.35. Keyword manager

Kabuk kasa parçasına atanacak olan ve “MAT” anahtar kelimesi içinde yer alan “054/055-ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE” malzeme parametresi için yapılmış örnek birim dönüşümü görseli Şekil 3.36’da yer almaktadır.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 24

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input.k) Setting

*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_(TITLE) (054/055) (1)

TITLE

1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
	24	1.451e-06	59.160000	59.160000	7.5000000	0.0400000	0.0380325	0.0380325
2	GAB	GBC	GCA	(KF)	AOPT	2WAY		
	17.500000	2.7000000	2.7000000	0.0	0.0	0.0		
3	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	MANGLE	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAILM	DFAILS
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAILT	DFAILC	EF5
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA	
	0.4370000	0.5130000	0.4370000	0.5130000	0.1200000	54.0	0.0	
7	PEL	EPSF	EPSR	TSMD	SOFT2			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	SLIMT1	SLIMC1	SLIMT2	SLIMC2	SLIMS	NCYRED	SOFTG	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	LCXC	LCXT	LCYC	LCYT	LCSC	DT		
	0	0	0	0	0	0.0		

COMMENT:

\$	ID	ro	Ea	Eb	Ec	Prba	Prca	Prcb

Total Card: 1 Smallest ID: 24 Largest ID: 24 Total deleted card: 0

Şekil 3.36. Örnek malzeme parametreleri birim değişikliği

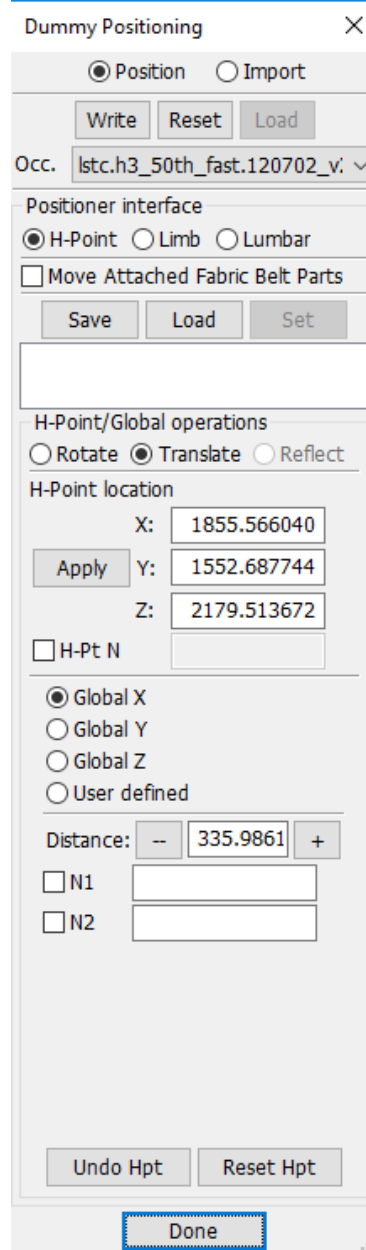
Buna benzer yöntemle yer çekimi ivmesi (y doğrultusu) ve lastik içi basınç değerleri için “LOAD”, hız değerleri için “INITIAL”, çözüm zaman aralıkları için “DATABASE”, kütle ölçeklendirme zaman adımı (mass scaling time step) ve çözüm süresi için “CONTROL” anahtar kelimeleri kontrol edilerek birim dönüşümlerinin tamamlanması gerekmektedir.

3.2.14. Kukla Modelin Eklenmesi ve Konumlandırılması

Kukla model eklenmesi için gerekli birim dönüşümleri yapıldıktan sonra analiz modeline kukla modelin eklenmesi ardından sürücü koluğuna uygun bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir.

Kukla model analize aktarıldıktan sonra LS-PrePost kukla model konumlandırma (dummy positioning) modülü vasıtasıyla genel ve uzuv (limb) konumlandırması yapılabilmektedir. Şekil 3.37’de kukla model konumlandırma modülü penceresi gösterilmektedir.

Kukla model aktarıldıktan sonra “CONTROL” anahtar kelimesi içinde kütle ölçeklendirme zaman adımı, bitiş zamanı değerleri, “DATABASE” anahtar kelimesi içinde ise çözüm aralıkları ayarları değerleri değişecektir. Bu yüzden bahse konu değerlerin birim dönüşümü de göz önüne alınarak güncellenmeleri gerekmektedir.



Şekil 3.37. Kukla model konumlandırma modülü

3.2.15. Kukla Model Kontakı ve Hızının Tanımlanması

ANSYS Workbench LS-DYNA Mechanical ara yüzünde araç parçaları arasında tanımlanan sürtünmeli kontaklara ilave olarak LS-PrePost ortamında kukla model ile araç parçaları arasında sürtünmeli kontak tanımlanması gerekmektedir.

Bahse konu işlem “CONTACT” anahtar kelimesi (keyword) içinde yer alan “AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE” başlığı ile yapılmaktadır.

Önce yapılan sürtünmeli kontak tanımlamalarında olduğu gibi statik sürtünme katsayısı 0.2, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.1 alınmıştır.

Kukla model ile tüm araç parçaları arasında yapılan kontak tanımına ilişkin görsel Şekil 3.38’de yer almaktadır.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_04.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE(ID/TITLE/MPP)(THERMAL) (17)

1 CID TITLE
56

MPP1 MPP2

2 IGNORE BCKET LCBCKT NS2TRK INITIIR PARMAX UNUSED CPARM8
0 200 3 2 1.0005 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSE GRPABLE
0 1.0 0

4 SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
53400100 85 2 2 0 0 2 0

5 ES ED DC VC VDC PENCHK BI DI
0.2000000 0.1000000 0.0 0.0 0.0 0 0.0 1.000e+20

6 SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSE
1.0000000 1.0000000 0.0 0.0 1.0000000 1.0000000 1.0000000 1.0000000

Thermal T_Friction A AB ABC ABCD ABCDE ABCDEF

7 CE ERAD HTC LMIN LMAX FTOSLV BC_FLG ALGO
0.5

8 LCFST LCFDT FORMULA a b c d LCH

9 SOFT SOFSCL LCIDAB MAXPAR SBOPT DEPTH BSORT FRCFRQ
2 0.1000000 0 1.0250000 2.0 2 0 1

10 PENMAX THKOPT SHLTHK SNLOG ISYM I2D3D SLDTHK SLDSTF
0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0

11 IGAP IGNORE DPRFAC DTSTIE UNUSED UNUSED FLANGL CID_RCF

Total Card: 17 Smallest ID: 16 Largest ID: 57 Total deleted card: 0

16 (2276)
17 (2279)
18 (2282)
19 (2285)
20 (2288)
21 (2291)
22 (2294)
23 (2297)
24 (2300)
49 (0)
50 (0)
51 (0)
52 (0)
54 (0)
55 (0)
56 (56)
57 (57)

Şekil 3.38. Kukla model ve araç parçaları kontağı

Kontak tanımlandıktan sonra kukla modelin araç ile birlikte hareket etmesi için öteleme hızının tanımlanması gereklidir.

Hız tanımlaması, LS-PrePost “INITIAL” anahtar kelimesi “VELOCITY_GENERATION” başlığı ile yapılmalıdır. Tanımlama yapılırken kukla modelin düzgün şekilde hareket edebilmesi için “IRIGID” parametresi “1” olarak ayarlanmalıdır. Hız tanımlaması ile ilgili görsel Şekil 3.39’da yer almaktadır.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_04.k) Setting

*INITIAL_VELOCITY_GENERATION (22)

1	NSID/PID	STYP	OMEGA	VX	VY	VZ	IVATN	ICID
	53400100	1	0.0	-7.0999999	0.0	0.0	0	74
2	XC	YC	ZC	NX	NY	NZ	PHASE	IRIGID
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1

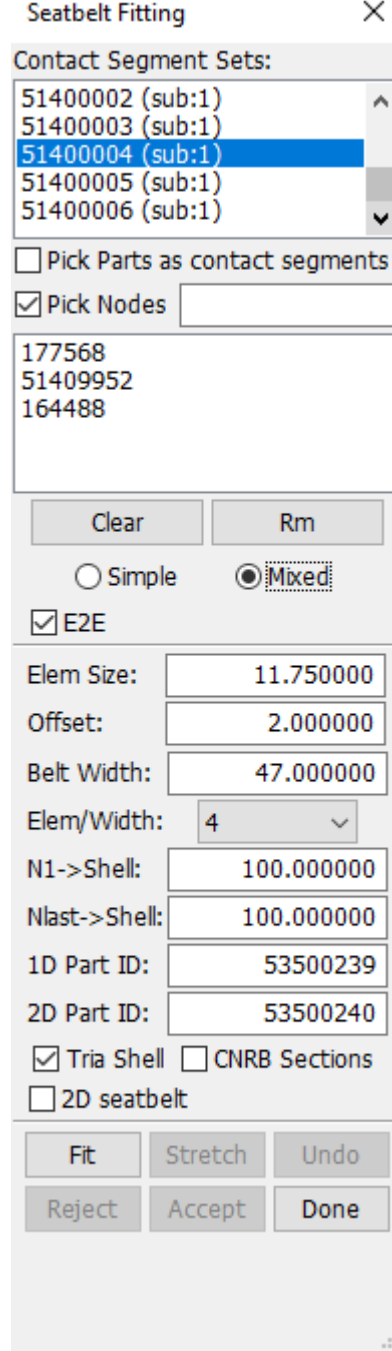
COMMENT:

Total Card: 22 Smallest ID: 1 Largest ID: 22 Total deleted card: 0

Şekil 3.39. Kukla model öteleme hızı tanımlanması

3.2.16. Emniyet Kemerinin Tanımlanması

Kukla model için emniyet kemeri tanımlama işlemi LS-PrePost emniyet kemeri ayarlama (seatbelt fitting) modülü vasıtasıyla yapılır. Şekil 3.40'da emniyet kemeri ayarlama modülü gösterilmektedir.



Şekil 3.40. Emniyet kemeri ayarlama modülü

Bahse konu modül ile fiziksel olarak tanımlanan emniyet kemeri ve sabitleme parçalarının ayrıca malzeme parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir.

Analiz için kullanılan emniyet kemeri için LS-PrePost “Tutorial 5-1:Introduction to dummy positioning” eğitim dokümanı içinde yer alan belted_mod.k dosyasındaki parametreler referans alınmıştır.

Kemer parçası için “MAT” anahtar kelimesi içinde “024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY”, kemer bağlantı parçası için ise “B01-SEATBELT” başlıkları kullanılmıştır.

Şekil 3.41 ve 3.42’de tanımlanan malzeme parametreleri gösterilmiştir.

Keyword Input Form

NewID: 105000

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_04.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE

MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
105000	7.800e-06	200.00000	0.3000000	0.1500000	2.0000000	1.000e+21	0.0

C	P	LCSS	LCSR	VP
0.0	0.0	0	0	0.0

EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 105000 Largest ID: 105000 Total deleted card: 0

Şekil 3.41. Emniyet kemer parçası malzeme parametreleri

Keyword Input Form

NewID: 100000

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_04.k) Setting

*MAT_SEATBELT_(TITLE) (B01) (1)

TITLE

MID	MPUL	LLCID	ULCID	LMIN	CSE	DAMP	E
100000	5.970e-04	100000	101000	5.970e-04	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 100000 Largest ID: 100000 Total deleted card: 0

Şekil 3.42. Emniyet kemeri bağlantı parçaları malzeme parametreleri

Kemer bağlantı parçasının hareket durumu için ayrıca “B01-SEATBELT” başlığı içinde yük eğrilerinin (LLCID ve ULCID) tanımlanması unutulmamalıdır.

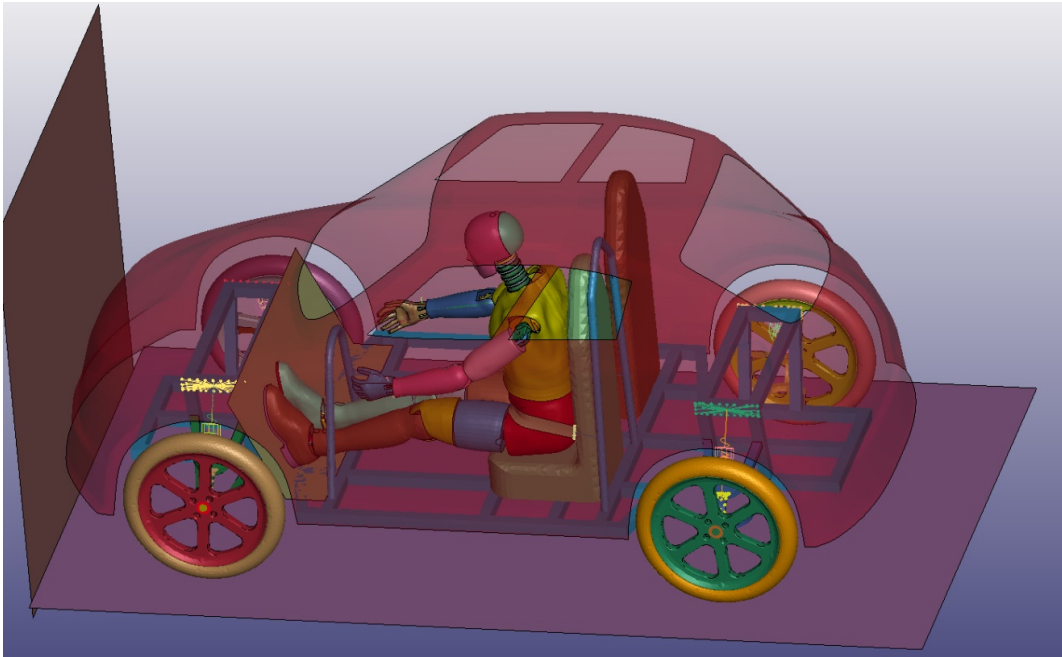
Bununla birlikte “SECTION” anahtar kelimesi içinde kemer parçası için kalınlık verisini de barındıran “SHELL” başlığı tanımlanmalıdır. Benzer şekilde kemer bağlantı parçaları için “SEATBELT” başlığı tanımlanmalıdır.

“PART” anahtar kelimesi içinde kemer ve kemer bağlantı parçalarına yukarıda bahsi geçen malzeme parametreleri ve kesit bilgileri atanarak emniyet kemeri eksiksiz bir şekilde tanımlanmış olacaktır.

Emniyet kemerinin tanımlanmasının ardından kukla model ve tüm araç parçaları kontak tanımlamasında olduğu gibi kukla model ile kemer parçası arasında “AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE” sürtünmeli kontağı tanımlanmıştır.

3.2.17. Çözüm Yapılması

Analiz için çözüm öncesi (pre-processing) çalışmaları yapıldıktan sonra çözüm için iterasyonların yapılması gerekmektedir. Çözümü yapılacak olan modelin son hali Şekil 3.43’te gösterilmektedir.

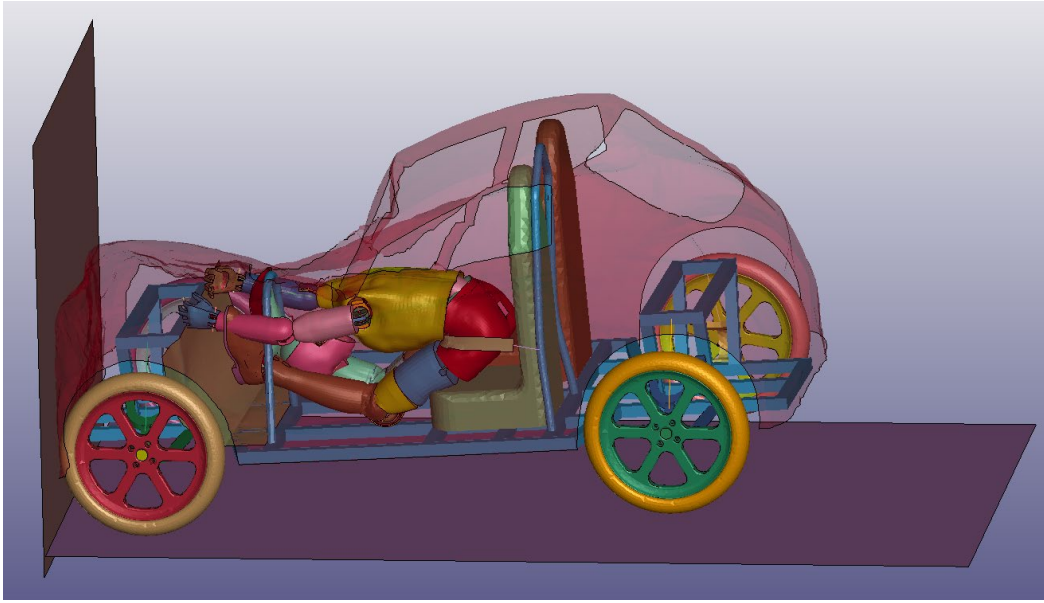


Şekil 3.43. Çözüm öncesi modelin son hali

Önceki bölümlerde bahsedilen avantajlarından dolayı çözüm ANSYS Workbench LS-DYNA ara yüzü yerine ANSYS Mechanical APDL Product Launcher uygulaması yardımı ile yapılmıştır.

Çözüm süresinin kısaltılması amacı ile uygulamanın yüksek performanslı hesaplama (HPC) özelliği kullanılmıştır. Bu özellik, bilgisayar işlemcisinin birden fazla çekirdeğini kullanarak çözüm süresinin kısaltılmasını sağlar.

Çözüm yapıldıktan sonra modelin görseli Şekil 3.44'te yer almaktadır.



Şekil 3.44. Analiz sonu model görüntüsü

4. SONUÇLAR

Analizde, 6 farklı durum için kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde çarpışma etkisiyle oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerleri incelenecektir. Çizelge 4.1’de analizi yapılacak olan durumlar gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Analiz senaryoları

No	Emniyet Kemer 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.

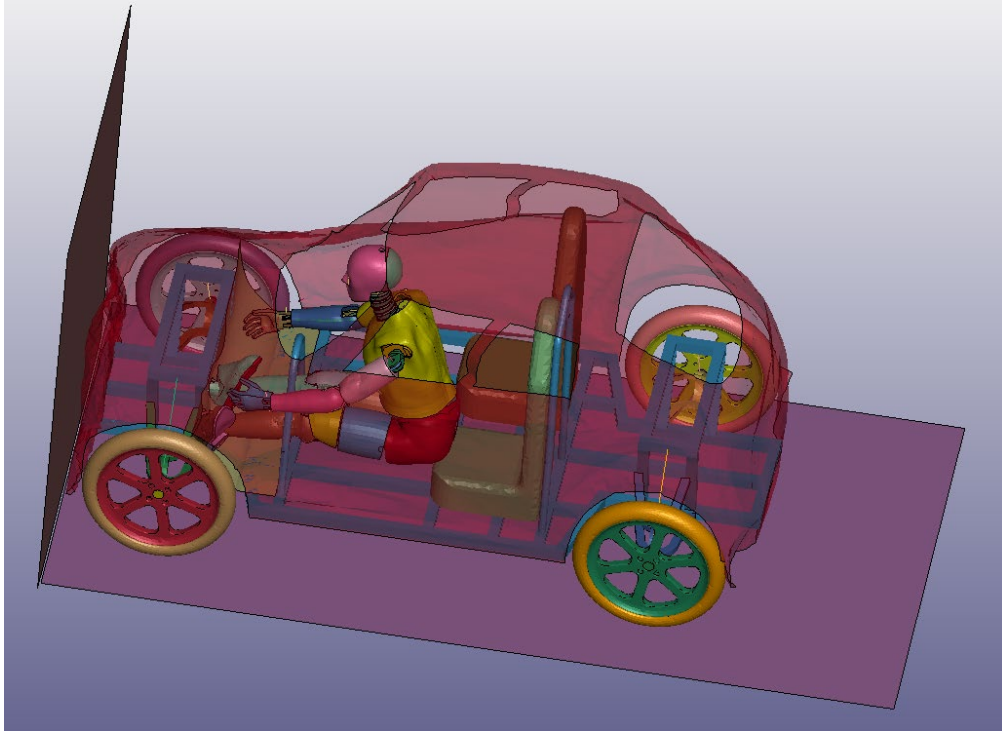
HIC, CSI ve uyluk kemikleri grafiklerinin elde edilmesinde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Channel Frequency Class (CFC) filtresi ile benzer olan LS-PrePost SAE filtresi (108 Hz) kullanılmıştır.

4.1. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Elastiki Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 75.7487 ms sürmüştür. Normal şartlarda 150 ms ve 500 eşit aralıklı yazdırılması gereken çözüm; 75.7487 ms anında 254. dilimde sona ermiştir.

Emniyet kemeri tanımlanmadığından dolayı modelin ayak kısımları destek sacı parçasına çarparak kırılmış ve ayak bilekleri ters dönmüştür. Bu durumdan dolayı “CONTROL_SOLUTION” anahtar kelimesi içinde yer alan “ISNAN” parametresi açılmasına rağmen “sayı değil” hatası (NAN-not a number) alınmış ve çözüm durmuştur. Bahse konu hata, çözümün kararsız olmaya başlaması ve kuvvet ve/veya momentlerin menzil dışına çıkması (çok fazla büyük olması) nedenleri ile meydana gelmektedir.

Şekil 4.1’de emniyet kemersiz ve yapı çeliği parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



Şekil 4.1. Analiz sonu model görüntüsü (durum 1)

LS-PrePost ortamında “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_01.k) Setting

*MAT_ELASTIC_(TITLE) (001) (119)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT_USED
	10	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

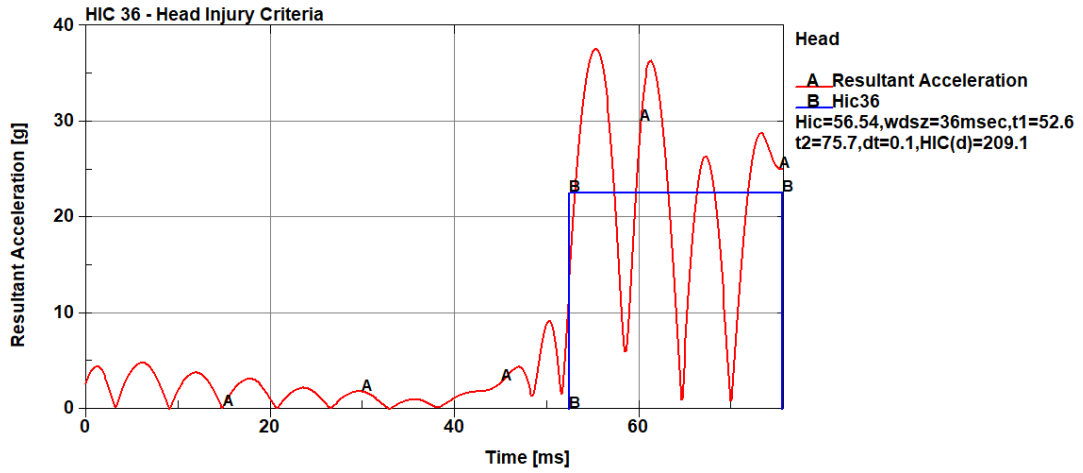
\$ ID ro E pr da db k unused1

Total Card: 119 Smallest ID: 2 Largest ID: 53400020 Total deleted card: 0

2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
23
51100002
51100003
51100006
51200002
51200003
51200005
51200006
51200007
51200008
51300003
51300006

Şekil 4.2. Yapı çeliği elastik malzeme parametreleri (durum 1)

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. HIC₃₆ grafiği (durum 1)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55.4 ms anında 37.7 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

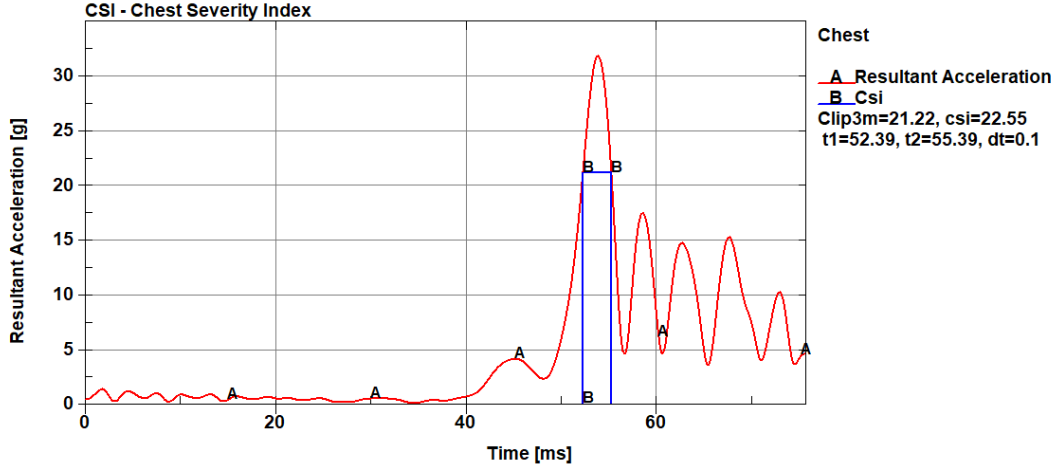
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 209.1 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10'da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

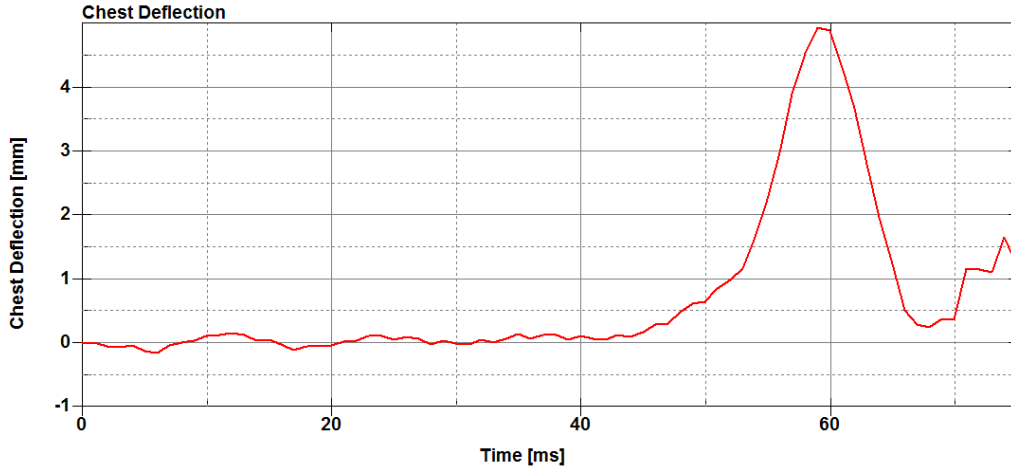
Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 210 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 2.87'dir.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.4 ve 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. CSI grafiği (durum 1)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde 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 (Clip3m) 21.22 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.5. Göğüs sapması grafiği (durum 1)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 59 ms anında 4.94 mm olduğu anlaşılmaktadır.

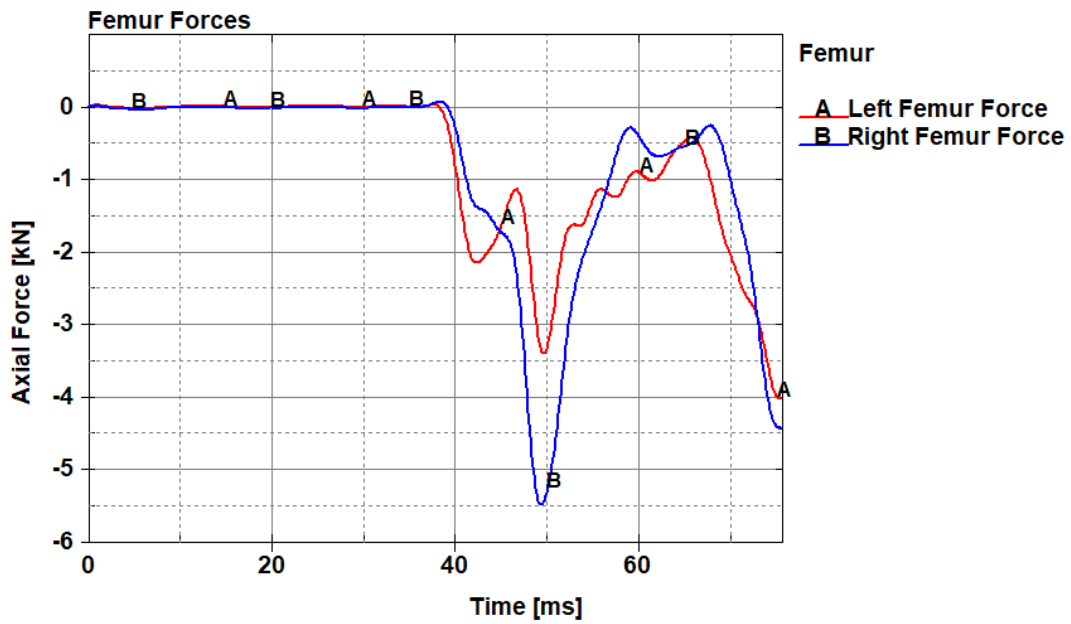
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaranma kriterleri olarak 60 g 3 ms aralığı omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.6. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 1)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 40 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve 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.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

Belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) % 35.46'dır.

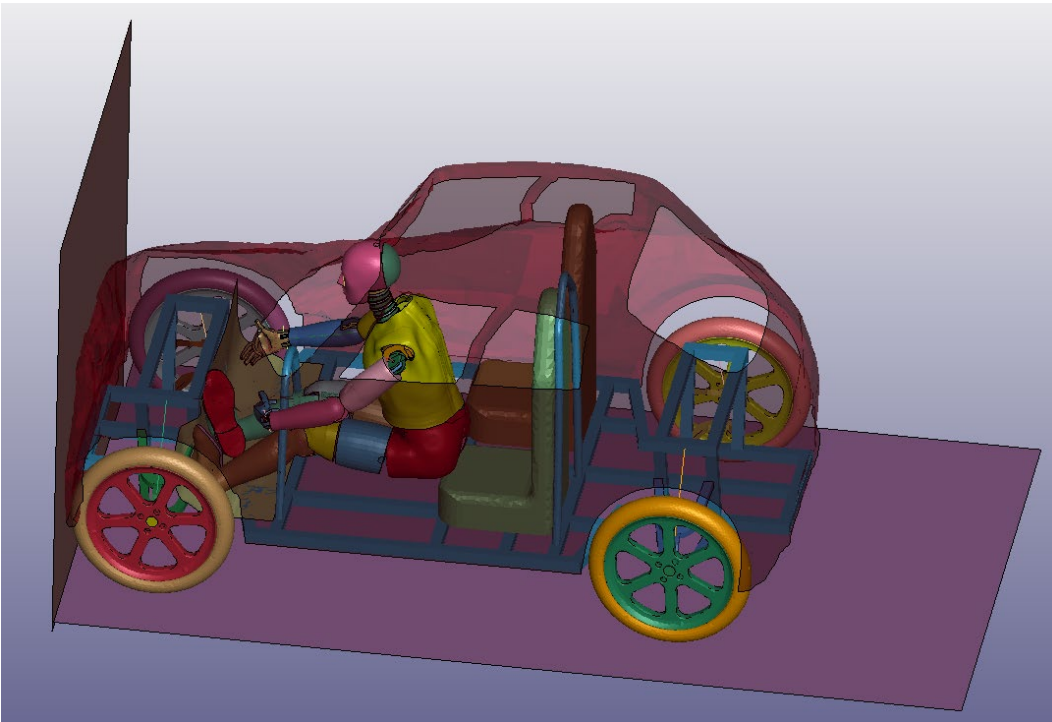
Buna göre, analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri aksenal kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla % 4.98 ve % 2.40'dır.

4.2. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 87.1227 ms sürmüştür. Normal şartlarda 150 ms ve 500 eşit aralıklı yazdırılması gereken çözüm; 87.1227 ms anında 292. dilimde sona ermiştir.

Emniyet kemeri tanımlanmadığından dolayı modelin ayak kısımları destek sacı parçasına çarparak kırılmış ve ayak bilekleri ters dönmüştür. Bu durumdan dolayı "CONTROL_SOLUTION" anahtar kelimesi içinde yer alan "ISNAN" parametresi açılmasına rağmen "sayı değil" hatası (NAN-not a number) alınmış ve çözüm durmuştur. Bahse konu hata, çözümün kararsız olmaya başlaması ve kuvvet ve/veya momentlerin menzil dışına çıkması (çok fazla büyük olması) nedenleri ile meydana gelmektedir.

Şekil 4.7'de emniyet kemersiz ve yapı çeliği parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



Şekil 4.7. Analiz sonu model görüntüsü (durum 2)

LS-PrePost ortamında “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_02.k) Setting

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (10)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
	23	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.1500000	2.0000000	0.0

2	SRC	SRP	FS	VP
	0.0	0.0	0.1500000	0.0

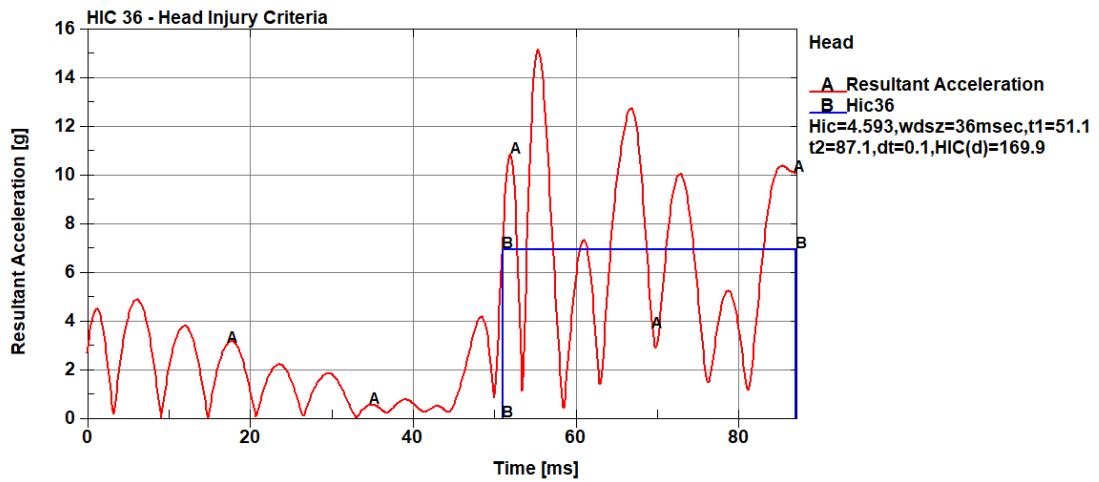
COMMENT:

Total Card: 10 Smallest ID: 2 Largest ID: 23 Total deleted card: 0

Şekil 4.8. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 2)

Şekil 4.8’den de görüleceği üzere yapı çeliği malzeme parametresi olan “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesine çevrilerek (transfer to) akma gerilmesi (yield stress) 0.15 GPa, tanjant modülü (tangent modulus) 2 GPa ve kopma durumundaki gerinim (failure strain) 0.15 alınmıştır.

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. HIC₃₆ grafiği (durum 2)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55.4 ms anında 15.2 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

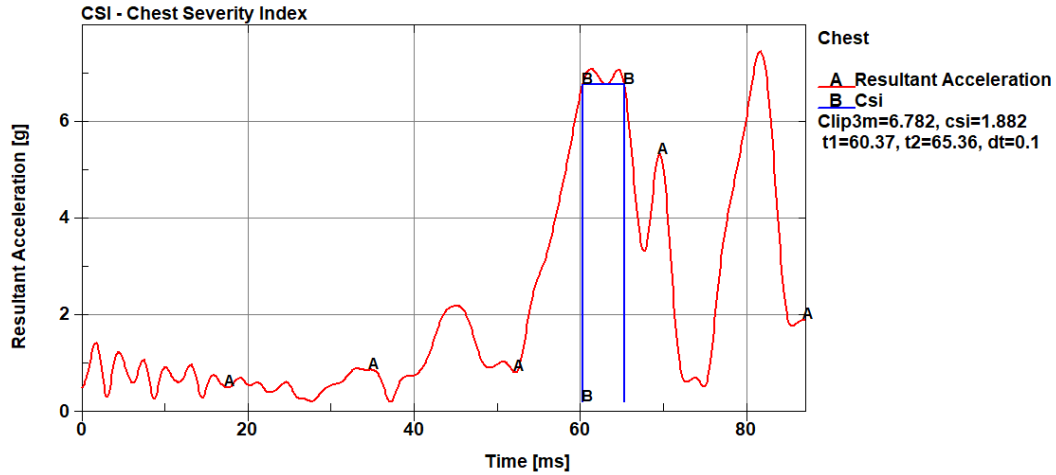
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 169.9 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10'da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

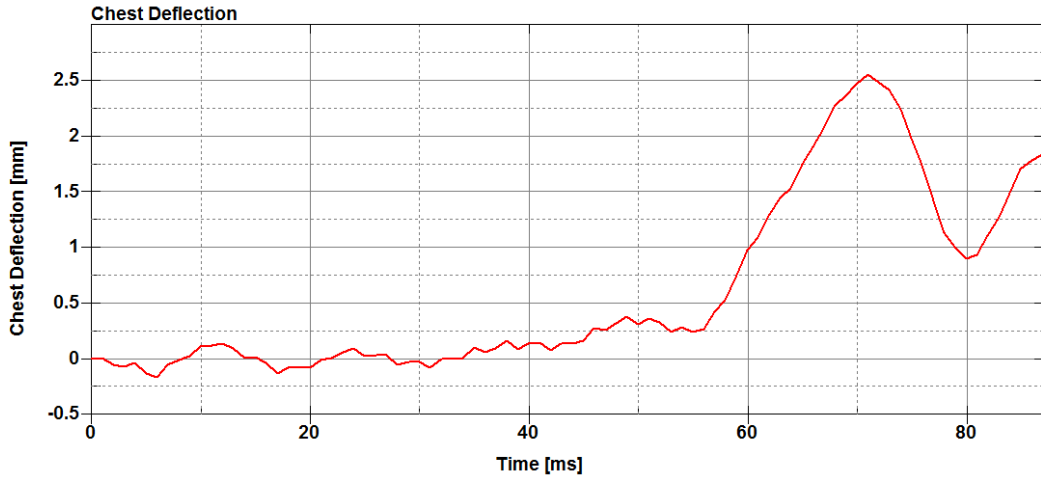
Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 170 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS ≥ 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 1.54'tür.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.10. CSI grafiği (durum 2)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde 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 (Clip3m) 6.782 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.11. Göğüs sapması grafiği (durum 2)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 71 ms anında 2.56 mm olduğu anlaşılmaktadır.

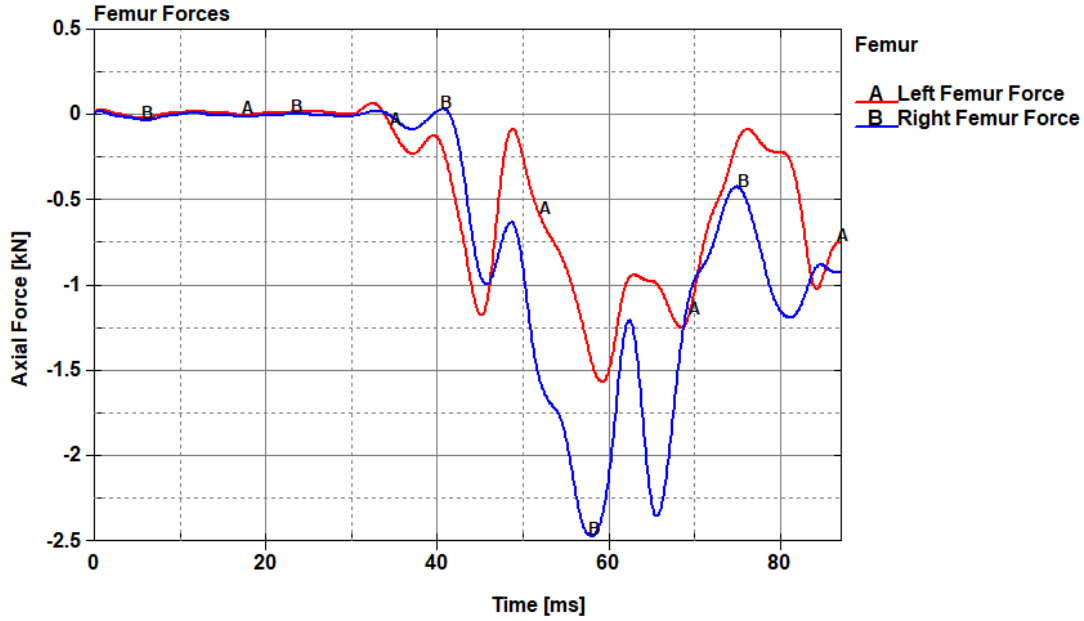
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 4.12'de yer almaktadır.



Şekil 4.12. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 2)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 30 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve sağ uyluk kemiği için 58.1 ms anında 2.47 kN, sol uyluk kemiği için ise 59.3 ms anında 1.56 kN maksimum bası kuvvetleri oluşmaktadır.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değeri olarak tavsiye edilmiştir.

Belirlenen sınır değeri için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) % 35.46'dır.

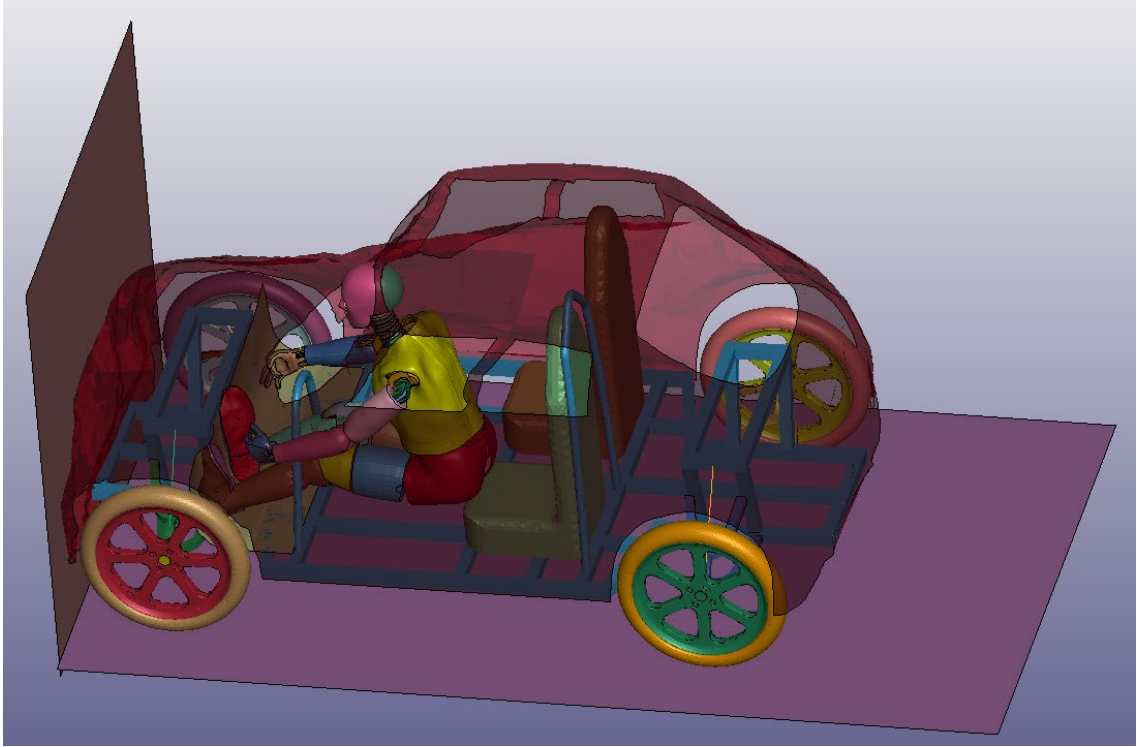
Buna göre, analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS \geq 2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla % 1.09 ve % 0.68'dir.

4.3. Emniyet Kemersiz ve Yapı Çeliği Parçaları Mukavim Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 82.6882 ms sürmüştür. Normal şartlarda 150 ms ve 500 eşit aralıklı yazdırılması gereken çözüm; 82.6828 ms anında 277. dilimde sona ermiştir.

Emniyet kemeri tanımlanmadığından dolayı modelin ayak kısımları destek sacı parçasına çarparak kırılmış ve ayak bilekleri ters dönmüştür. Bu durumdan dolayı “CONTROL_SOLUTION” anahtar kelimesi içinde yer alan “ISNAN” parametresi açılmasına rağmen “sayı değil” hatası (NAN-not a number) alınmış ve çözüm durmuştur. Bahse konu hata, çözümün kararsız olmaya başlaması ve kuvvet ve/veya momentlerin menzil dışına çıkması (çok fazla büyük olması) nedenleri ile meydana gelmektedir.

Şekil 4.13'te emniyet kemersiz ve yapı çeliği parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



Şekil 4.13. Analiz sonu model görüntüsü (durum 3)

LS-PrePost ortamında “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) Şekil 4.14'te gösterilmektedir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_02.k) Setting

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (10)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
	23	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.2500000	6.6700001	0.0
2	SRC	SRP	FS	VP			
	0.0	0.0	0.2000000	0.0			

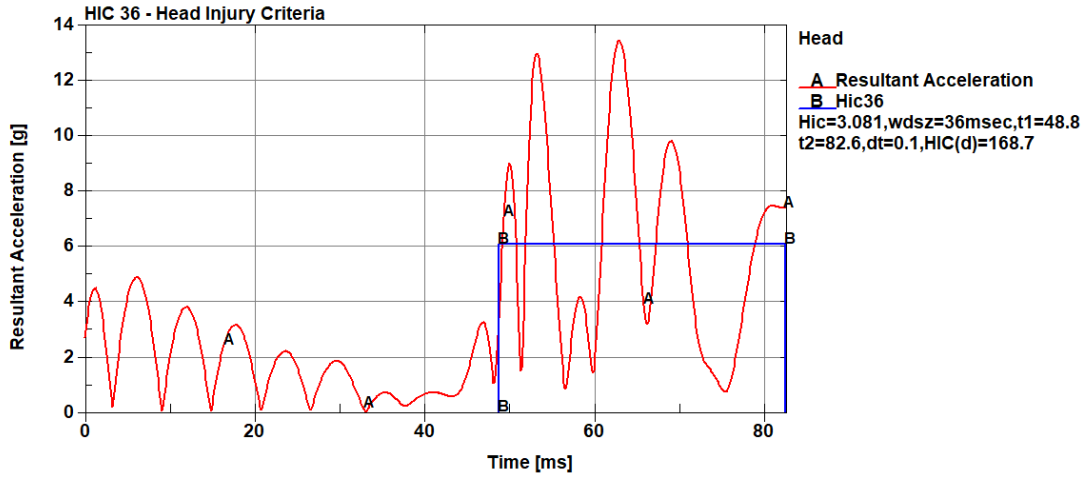
COMMENT:

Total Card: 10 Smallest ID: 2 Largest ID: 23 Total deleted card: 0

Şekil 4.14. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 3)

Şekil 4.14'ten de görüleceği üzere yapı çeliği malzeme parametresi olan “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesine çevrilerek (transfer to) akma gerilmesi (yield stress) 0.25 GPa, tanjant modülü (tangent modulus) 6.67 GPa ve kopma durumundaki gerinim (failure strain) 0.2 alınmıştır.

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. HIC₃₆ grafiği (durum 3)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 63 ms anında 13.4 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

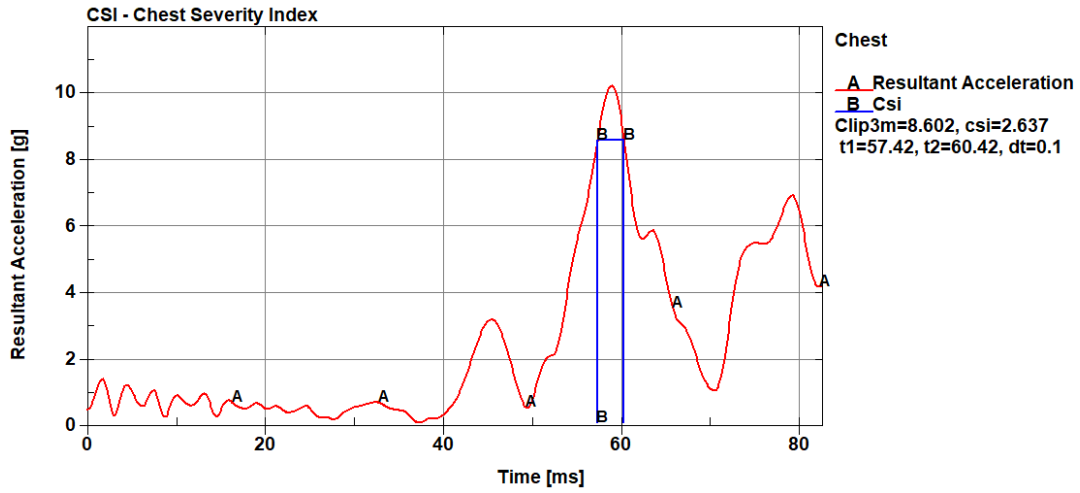
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 168.7 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10'da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

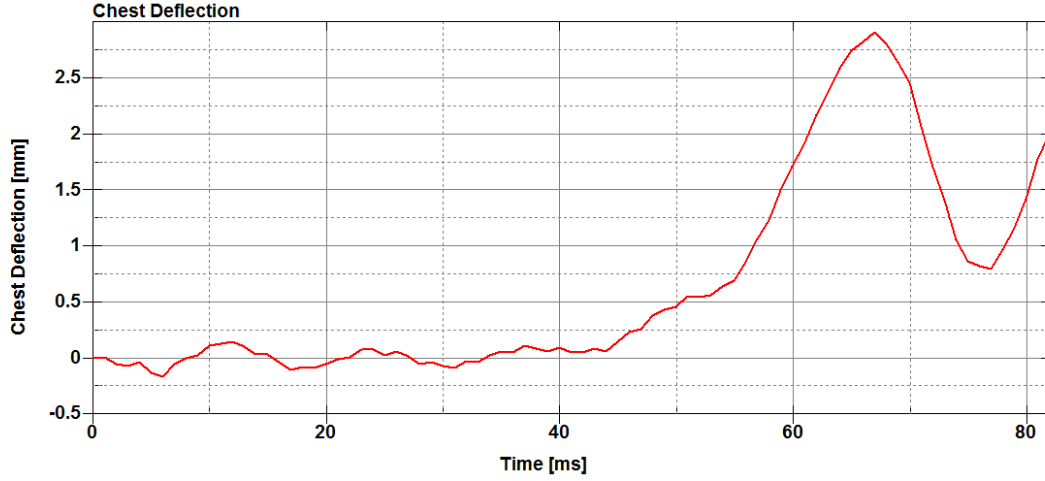
Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 169 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 1.5'tir.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.16 ve 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.16. CSI grafiği (durum 3)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 59 ms anında 10.3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise (Clip3m) 8.602 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.17. Göğüs sapması grafiği (durum 3)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 67 ms anında 2.91 mm olduğu anlaşılmaktadır.

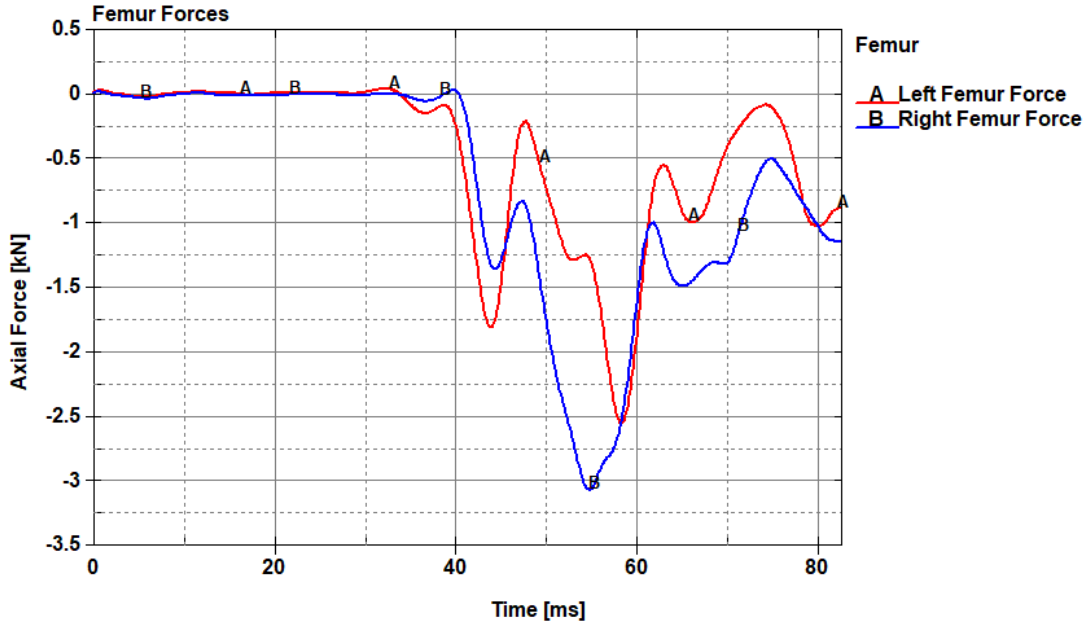
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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'tür.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 4.18'de yer almaktadır.



Şekil 4.18. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 3)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 30 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve 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.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değeri olarak tavsiye edilmiştir.

Belirlenen sınır değeri 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 eksenel 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'tür.

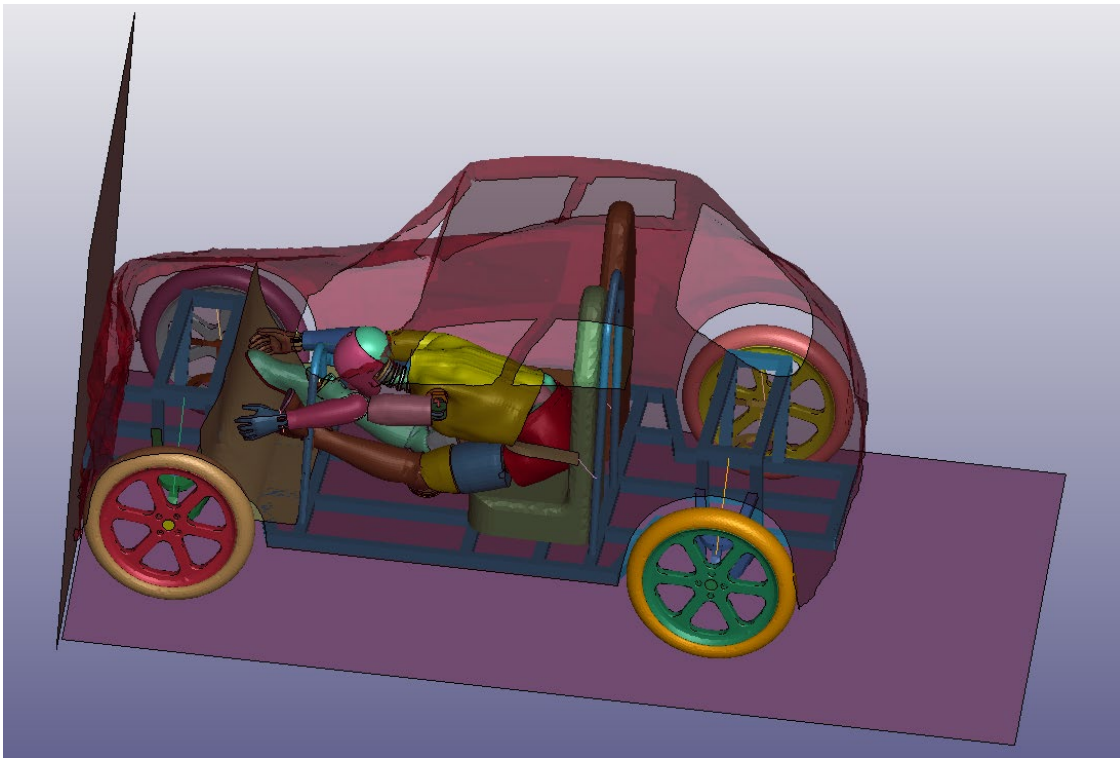
4.4. Emniyet Kemerli ve Yapı Çeliği Parçaları Elastiki Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 106.33 ms sürmüştür.

Normal şartlarda 150 ms ve 500 eşit aralıklı yazdırılması gereken çözüm; 106.33 ms anında 356. dilimde sona ermiştir.

Emniyet kemeri tanımlanmasına rağmen modelin sol ayak bilek kısmı, elastiki parametreye sahip şasinin ön koruyucu çubuk (roll bar) kısmına çarpmıştır. Bu durumdan dolayı “CONTROL_SOLUTION” anahtar kelimesi içinde yer alan “ISNAN” parametresi açılmasına rağmen “sayı değil” hatası (NAN-not a number) alınmış ve çözüm durmuştur. Bahse konu hata, çözümün kararsız olmaya başlaması ve kuvvet ve/veya momentlerin menzil dışına çıkması (çok fazla büyük olması) nedenleri ile meydana gelmektedir.

Şekil 4.19’da emniyet kemerli ve yapı çeliği parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



Şekil 4.19. Analiz sonu model görüntüsü (durum 4)

LS-PrePost ortamında “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) Şekil 4.20’de gösterilmektedir.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_01.k) Setting

*MAT_ELASTIC_(TITLE) (001) (119)

TITLE

MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT_USED
10	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0

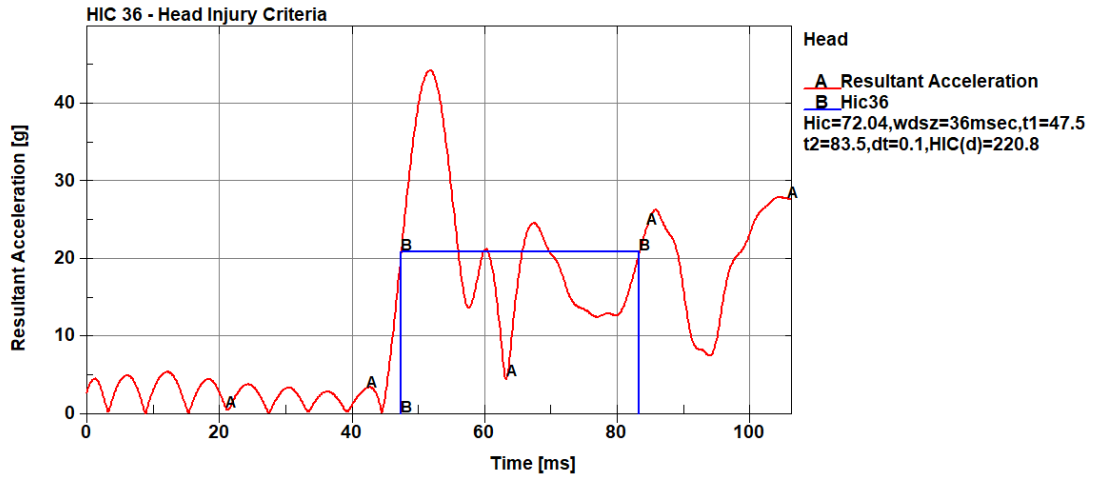
COMMENT:

\$ ID ro E pr da db k unused1

Total Card: 119 Smallest ID: 2 Largest ID: 53400020 Total deleted card: 0

Şekil 4.20. Yapı çeliği elastik malzeme parametreleri (durum 4)

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. HIC₃₆ grafiği (durum 4)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 51.9 ms anında 44.3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

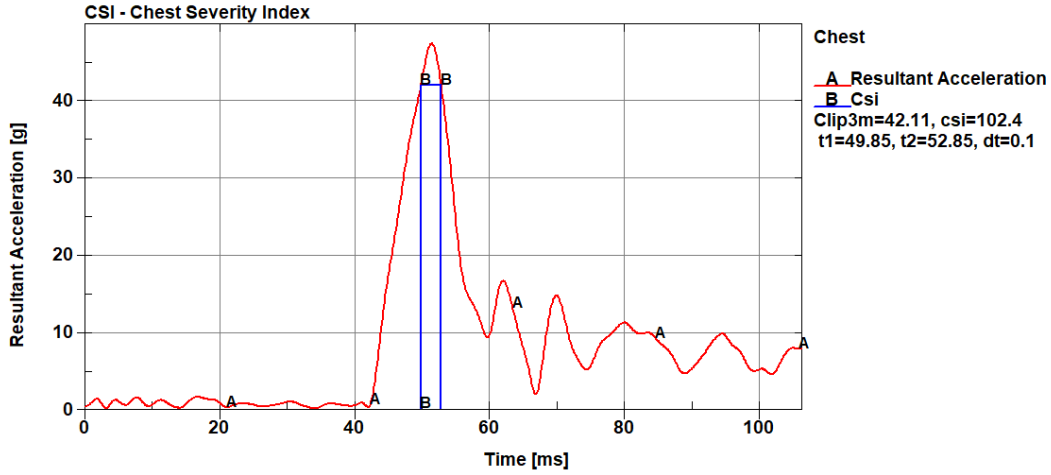
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 220.8 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10'da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

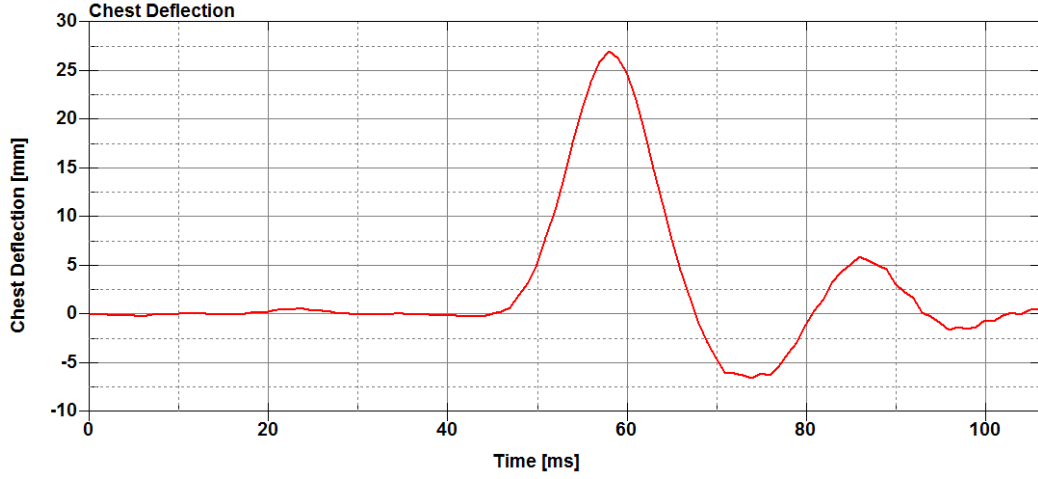
Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 221 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS ≥ 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 3.22'dir.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.22 ve 4.23'te gösterilmektedir.



Şekil 4.22. CSI grafiği (durum 4)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde 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 (Clip3m) 42.11 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.23. Göğüs sapması grafiği (durum 4)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 58 ms anında 27.06 mm olduğu anlaşılmaktadır.

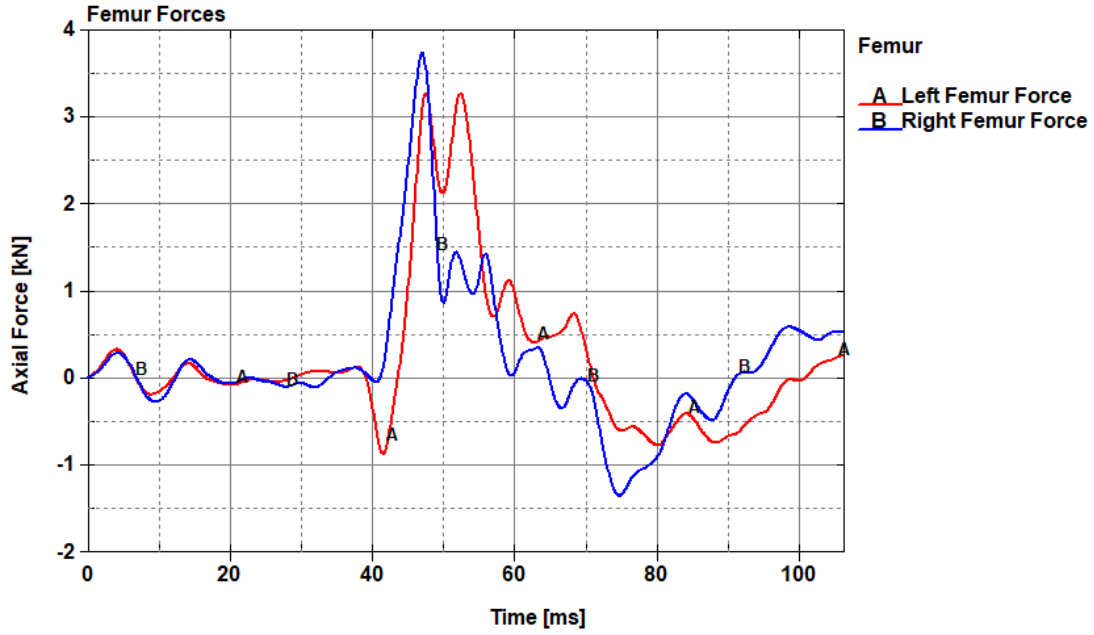
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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 % 39.24'tür.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 5.24'te yer almaktadır.



Şekil 4.24. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 4)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde çarpışmanın etkisinin 40 ms anından itibaren oluşmaya başladığı görülmektedir. 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.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değeri olarak tavsiye edilmiştir.

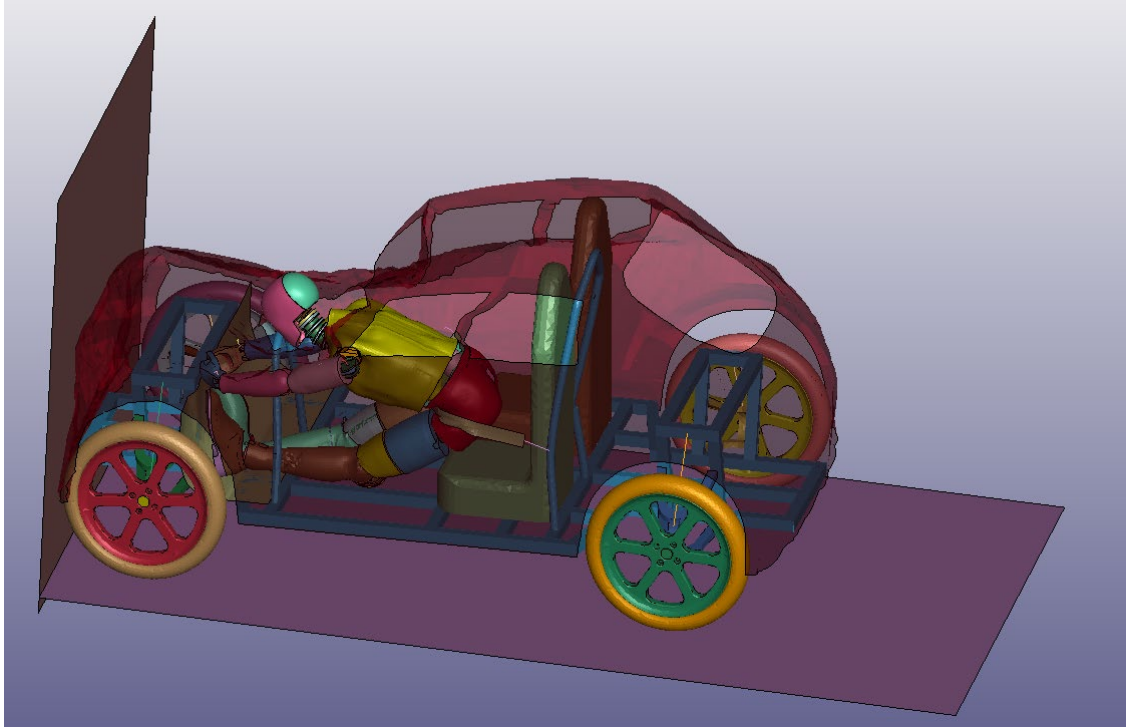
Belirlenen sınır değeri için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) % 35.46'dır.

Buna göre, analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla % 2.09 ve % 2.73'tür.

4.5. Emniyet Kemerli ve Yapı Çeliği Parçaları Malzemeleri Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm herhangi bir hataya maruz kalmadan 150 ms anında tamamlanmıştır.

Şekil 4.25'te emniyet kemerli ve yapı çeliği parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



Şekil 4.25. Analiz sonu model görüntüsü (durum 5)

LS-PrePost ortamında “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) Şekil 4.26’da gösterilmektedir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_02.k) Setting

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (10)

TITLE

MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
23	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.1500000	2.0000000	0.0

SRC	SRP	FS	VP
0.0	0.0	0.1500000	0.0

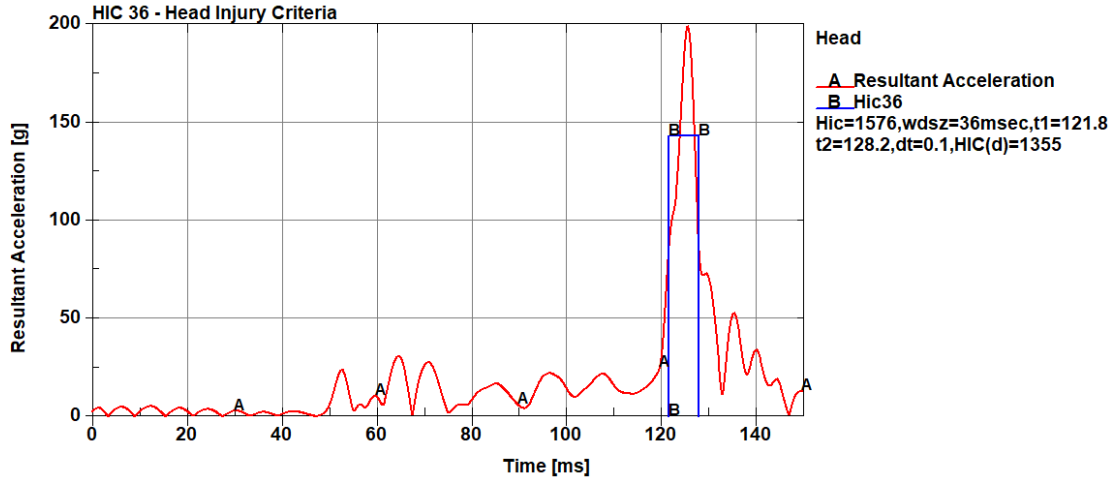
COMMENT:

Total Card: 10 Smallest ID: 2 Largest ID: 23 Total deleted card: 0

Şekil 4.26. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 5)

Şekil 4.26’den da görüleceği üzere yapı çeliği malzeme parametresi olan “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesine

çevrilerek (transfer to) akma gerilmesi (yield stress) 0.15 GPa, tanjant modülü (tangent modulus) 2 GPa ve kopma durumundaki gerinim (failure strain) 0.15 alınmıştır. Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. HIC₃₆ grafiği (durum 5)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 126 ms anında 200 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

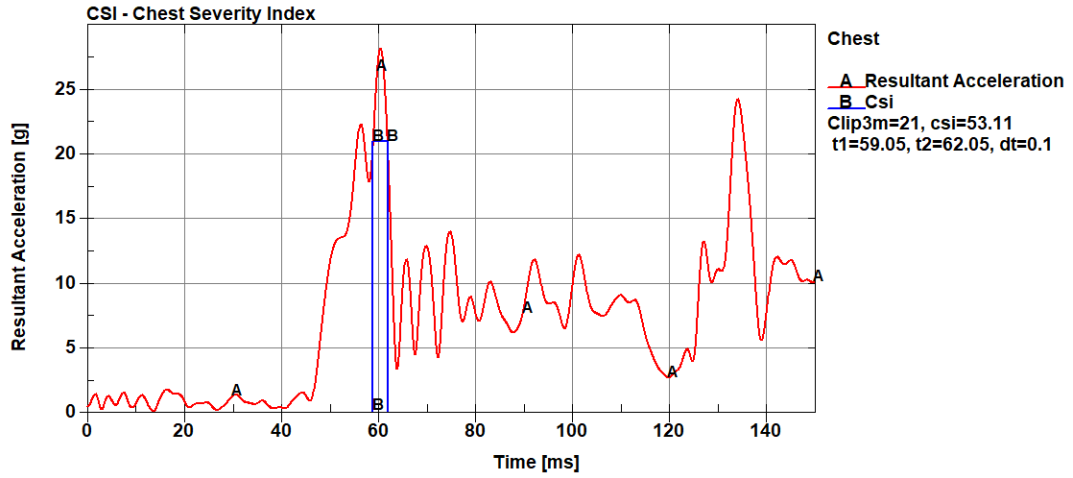
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 1355 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10’da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

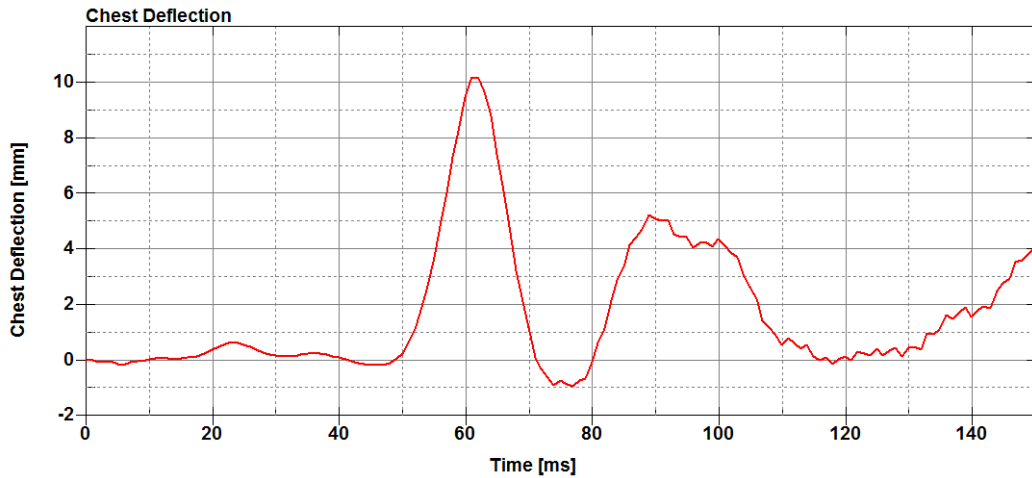
Bu bilgiler ışığında, analizde 1355 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin üstünde kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS ≥ 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 61.41’dir.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.28. CSI grafiği (durum 5)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde 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 (Clip3m) 21 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.29. Göğüs sapması grafiği (durum 5)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 61 ms anında 10.19 mm olduğu anlaşılmaktadır.

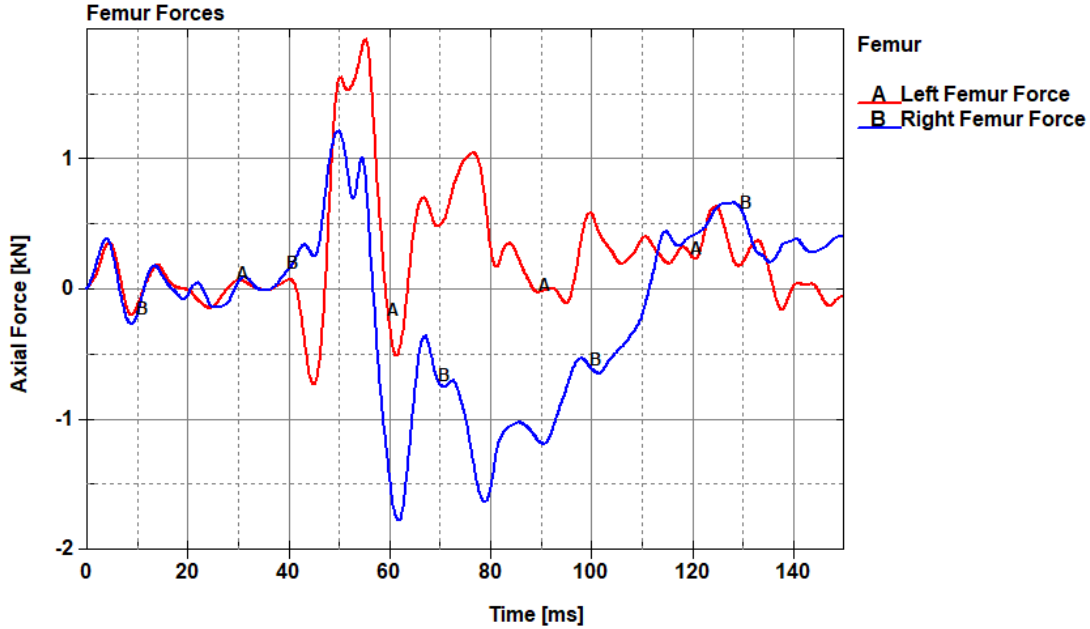
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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 % 5.51'dir.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 4.30'da yer almaktadır.



Şekil 4.30. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 5)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde çarpışmanın etkisinin 40 ms anından itibaren oluşmaya başladığı görülmektedir. Sağ uyluk kemiği için 62 ms anında 1.77 kN bası, sol uyluk kemiği için ise 55.3 ms anında 1.93 kN çeki maksimum kuvvetleri oluşmaktadır.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değeri olarak tavsiye edilmiştir.

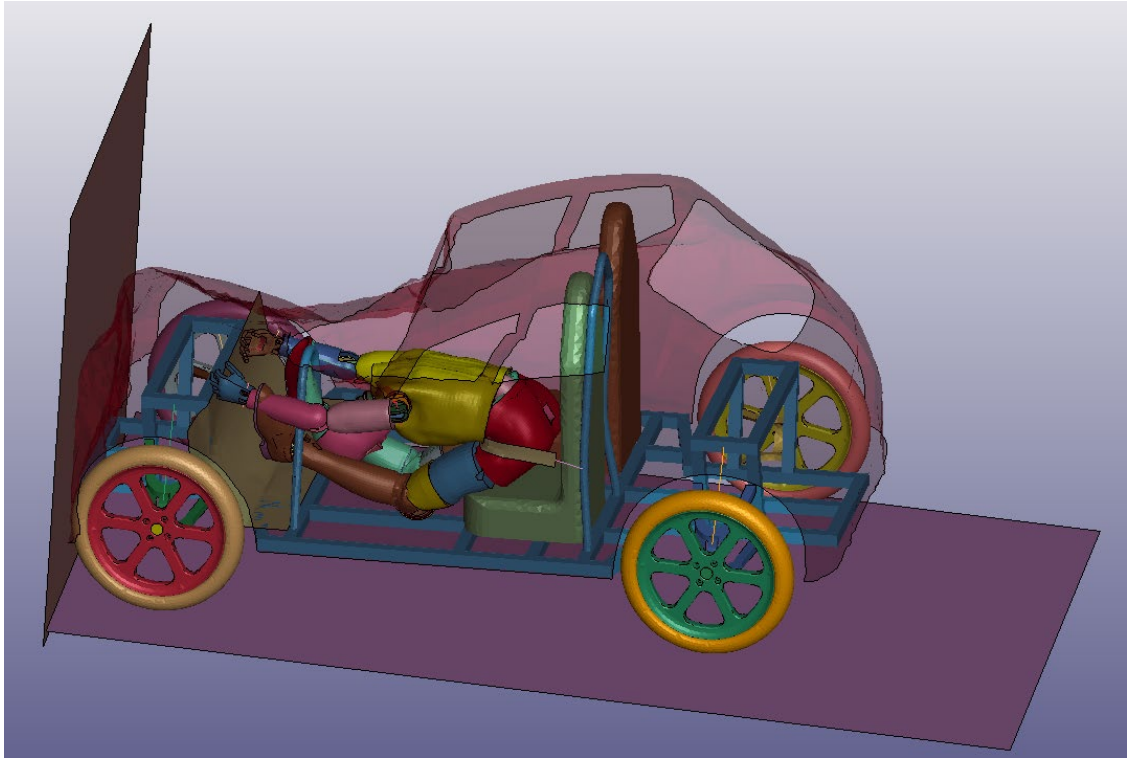
Belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) % 35.46'dır.

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 % 0.76 ve % 0.82'dir.

4.6. Emniyet Kemerli ve Yapı eliği Parçaları Mukavim Plastik Parametrelere Sahip Olan Model için Sonuçlar

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm herhangi bir hataya maruz kalmadan 150 ms anında tamamlanmıştır.

şekil 4.31'de emniyet kemerli ve yapı çeliği parçalarına mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan modelin analiz sonundaki görseli yer almaktadır.



şekil 4.31. Analiz sonu model görüntüsü (durum 6)

LS-PrePost ortamında "MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC" anahtar kelimesi içinde yer alan şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının malzeme parametreleri (MID: 2-10 arası ve 23) şekil 5.32'de gösterilmektedir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 input_02.k) Setting

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (10)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
	23	7.850e-06	200.00000	0.3000000	0.2500000	6.6700001	0.0
2	SRC	SRP	FS	VP			
	0.0	0.0	0.2000000	0.0			

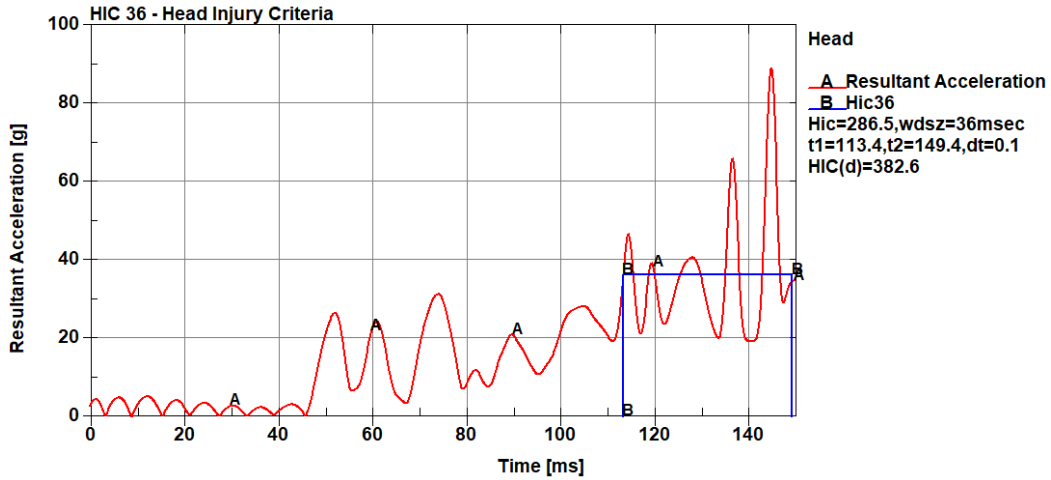
COMMENT:

Total Card: 10 Smallest ID: 2 Largest ID: 23 Total deleted card: 0

Şekil 4.32. Yapı çeliği plastik malzeme parametreleri (durum 6)

Şekil 4.32’den de görüleceği üzere yapı çeliği malzeme parametresi olan “MAT_001-ELASTIC” anahtar kelimesi “MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC” anahtar kelimesine çevrilerek (transfer to) akma gerilmesi (yield stress) 0.25 GPa, tanjant modülü (tangent modulus) 6.67 GPa ve kopma durumundaki gerinim (failure strain) 0.2 alınmıştır.

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen baş yaralanma kriteri değeri ve grafiği Şekil 4.33’te gösterilmektedir.



Şekil 4.33. HIC₃₆ grafiği (durum 6)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 145 ms anında 89.3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir.

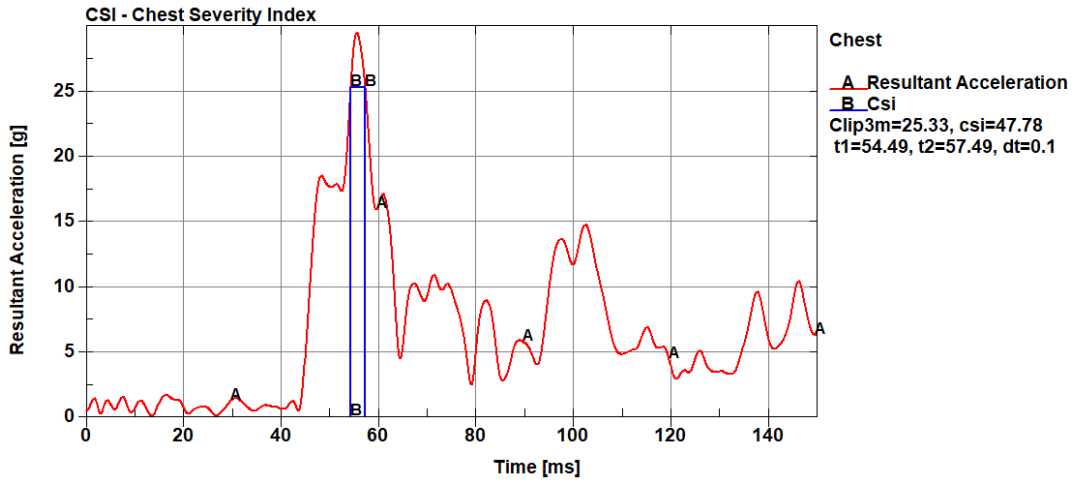
Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin oluştuğu bölgede, HIC değerinin 382.6 olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10'da belirtildiği üzere orta büyüklükteki hibrid 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.

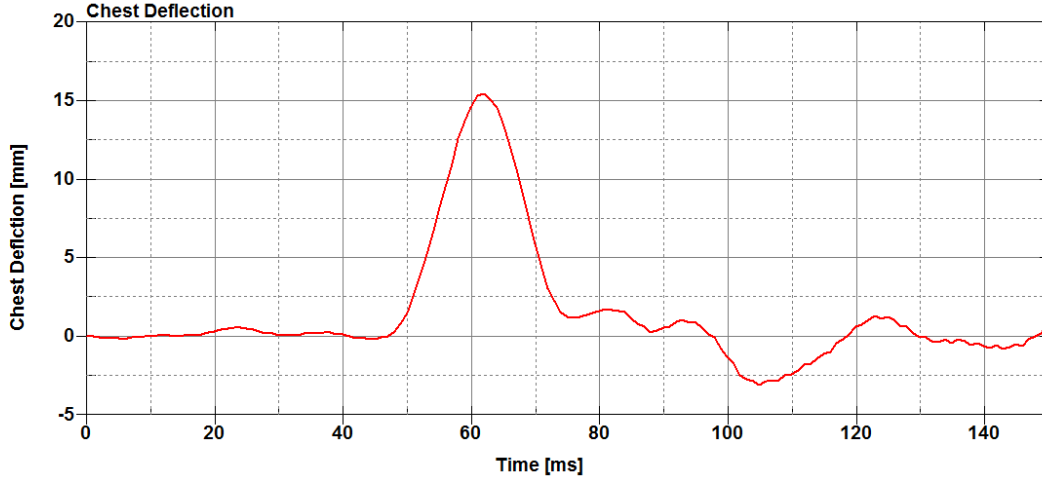
Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 383 HIC₃₆ değeri, kritik 1000 HIC₃₆ değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS ≥ 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı % 11.51'dir.

Model için göğüs şiddet indeksi ve göğüs sapması grafikleri Şekil 4.34 ve 4.35'te gösterilmektedir.



Şekil 4.34. CSI grafiği (durum 6)

Analizde kullanılan hibrid III 50th erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55.8 ms anında 29.5 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise (Clip3m) 25.33 g büyüklüğündedir.



Şekil 4.35. Göğüs sapması grafiği (durum 6)

Göğüs sapması grafiği incelendiğinde maksimum sapmanın 62 ms anında 15.49 mm olduğu anlaşılmaktadır.

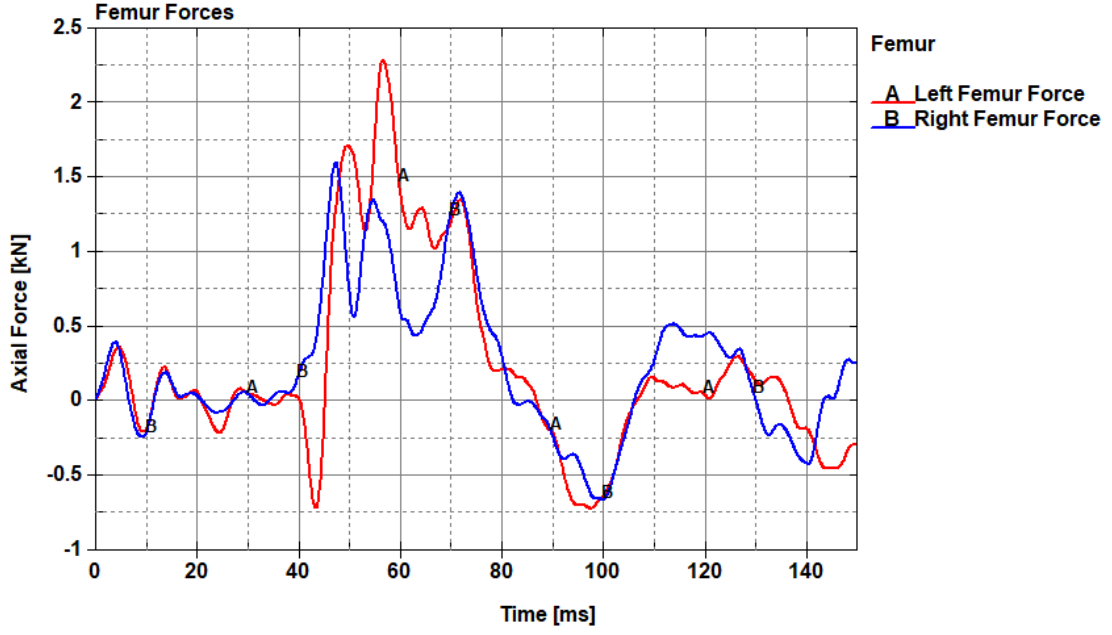
Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir.

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 % 9.62'dir.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 4.36'da yer almaktadır.



Şekil 4.36. Eksenel uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği (durum 6)

Sağ ve sol uyluk kemikleri kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde çarpışmanın etkisinin 40 ms anından itibaren oluşmaya başladığı görülmektedir. 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.

Çizelge 2.9'da gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta büyüklükteki erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değeri olarak tavsiye edilmiştir.

Belirlenen sınır değeri 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 eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ($AIS \geq 2$) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla % 0.69 ve % 0.99'dur.

5. ANALİZİN DOĞRULANMASI

Bu bölümde, sonuçları elde edilen 6 farklı durumun doğrulaması yapılacaktır. Doğrulama, kinetik ve toplam enerji dengesi üzerinden yapılacaktır.

5.1. Toplam Enerji Verisi Doğrulaması

Analizlerde yapılan çözümün doğruluğunun kontrolünün sağlanması için toplam enerji verisi kullanılabilir. Toplam enerji dengesi eşitliği, icra edilen simülasyonun hassasiyetinin tespit edilmesinde kullanılır. Toplam enerji dengesi eşitliği aşağıda yer almaktadır.

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

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 enerjiyi (initial kinetic energy)

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

W_{ext} , harici işi (external work)

E_{total} ise toplam enerjiyi (total energy) ifade etmektedir. [24]

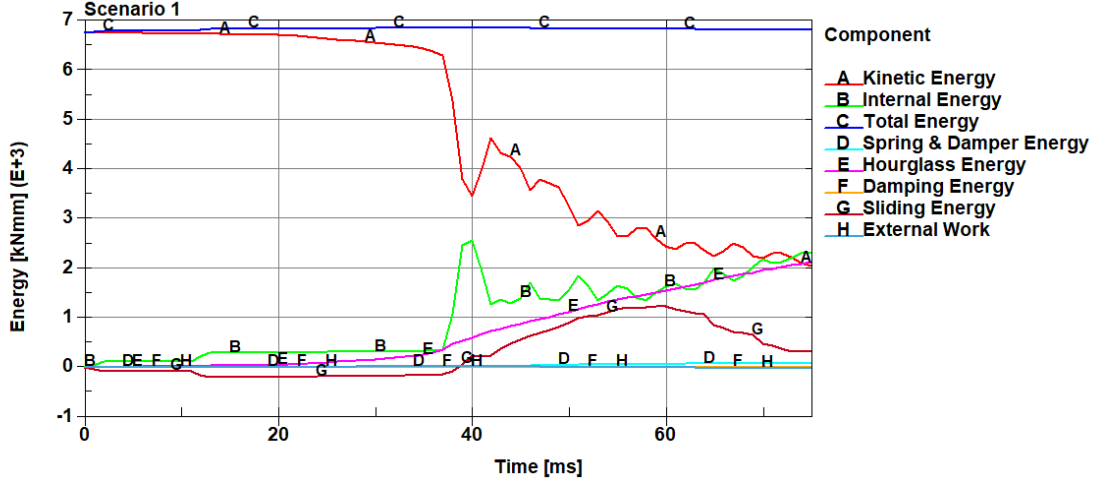
Yukarıdaki eşitlik, sisteme giren işin, yapılan işe eşit olduğunu göstermektedir. Denklemden oluşabilecek herhangi bir eşitsizlik analizin hatalı olduğunu gösterecektir.

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.

5.1.1. Durum 1 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.1'de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır.

Analizde $t = 0$ ms ile $t = 75$ ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değışikliği % 0.79 olarak hesaplanmıştır.



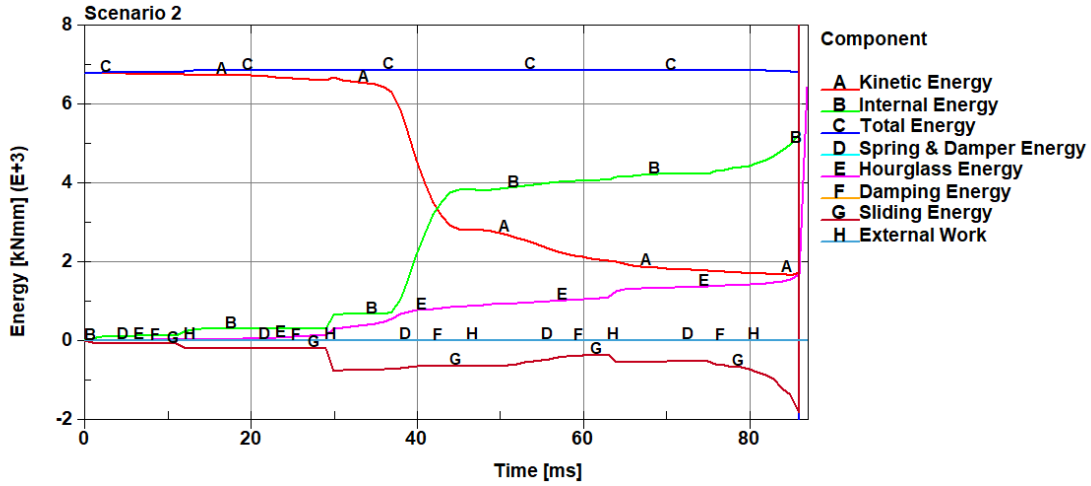
Şekil 5.1. Durum 1 için enerji dengesi

5.1.2. Durum 2 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.2’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 değışikliği % 0.56 olarak hesaplanmıştır.

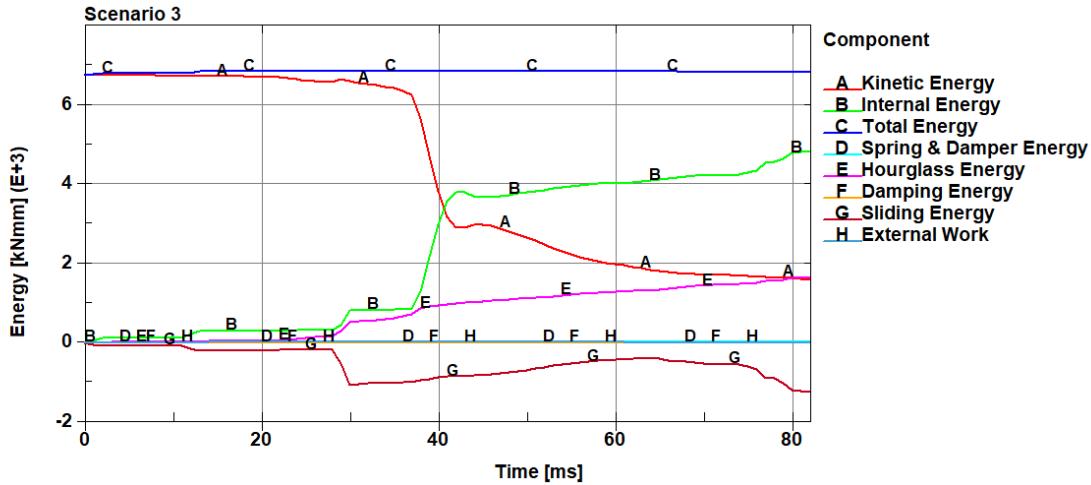


Şekil 5.2. Durum 2 için enerji dengesi

5.1.3. Durum 3 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.3'te 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.

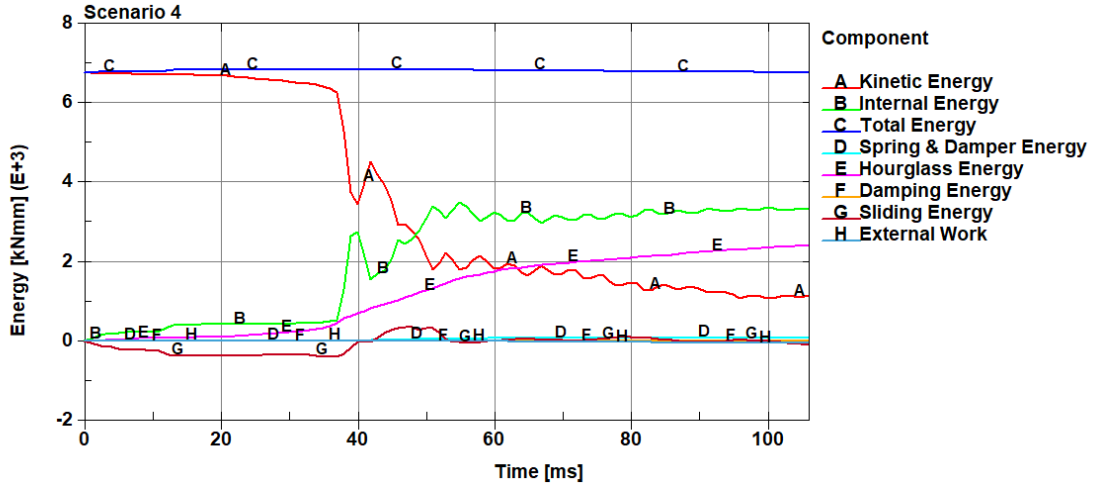


Şekil 5.3. Durum 3 için enerji dengesi

5.1.4. Durum 4 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.4'te 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.

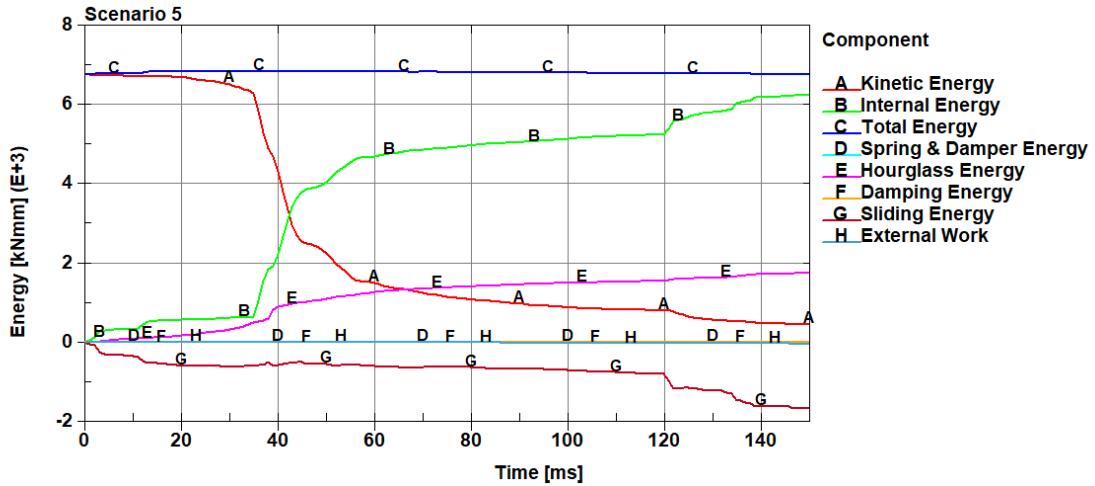


Şekil 5.4. Durum 4 için enerji dengesi

5.1.5. Durum 5 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.5'te 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.

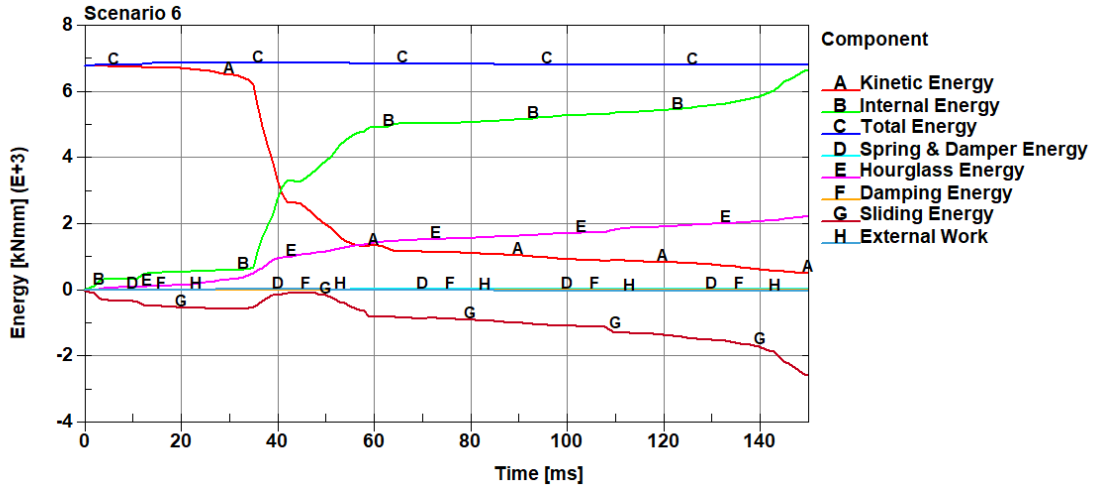


Şekil 5.5. Durum 5 için enerji dengesi

5.1.6. Durum 6 için Toplam Enerji Doğrulaması

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 5.6'da 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 5.6. Durum 6 için enerji dengesi

5.2. Kinetik Enerji Verisi Doğrulaması

Tüm analiz durumlarında aracın ilk hızı 7.1 m/s (7.1 mm/ms) idi. Bununla birlikte araç ana bileşenleri üzerinde araç kütlesini 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 6.76425×10^3 kNmm olduğu görülmektedir.

Emniyet kemerli modellerin analizlerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde ise başlangıç kinetik enerjilerinin 6.76442×10^3 kNmm olduğu görülmektedir.

Buna göre emniyet kemerinin oluşturduğu başlangıç kinetik enerji değerinin 1.69922×10^{-1} kNmm olduğu anlaşılabilmektedir.

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

6. DEĞERLENDİRME

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 Çizelge 6.1 oluşturulmuştur.

Çizelge 6.1. 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.

Çizelge 6.2’de 75 ms anında tüm durumlar için baş, göğüs ve uyluk kemikleri değerlere yer almaktadır.

Çizelge 6.2. 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, Yapı çeliği plastik	30.9	28.2	-7.23	-1.77/1.93
6	Emniyet kemerli, Yapı çeliği mukavim plastik	31.4	29.5	1.27	1.6/2.29

Çizelge 6.2’de yer alan 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 sonlanmıştı. 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 değerinde olduğu, bileşke göğüs ivmelerinin biraz yüksek olduğu, göğüs sapmalarının ise düşük olduğu görülmektedir.

Bununla birlikte uyluk kemikleri aksenal 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.

Özellikle emniyet kemersiz analiz modellerinde ortaya çıkabilecek kukla model yaralanmalarının önlenmesi için aracın ön kısmında darbe sönümleyici kullanılabilir. Araç şasisine bağlı roll bar kısmı tasarımı üzerinde modifikasyonlar yapılabilir. 2 noktalı emniyet kemeri yerine 3 noktalı emniyet kemeri uygulaması tercih edilebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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. Tarrière, 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. Tarriere, 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. Üzüm, Gtech-Revolution Yarış Takımı Tübitak Alternatif Enerjili Araç Yarışları Teknik Tasarım Raporu.
- [22] Anonim, Mass Scaling, <https://www.dynasupport.com/howtos/general/mass-scaling> (Erişim tarihi: 19 Mayıs 2019).
- [23] S. Guha, LSTC_NCAC Hybrid III 50th Dummy Positioning & Post-Processing, LSTC. (2014).
- [24] Anonim, Energy Data, <https://www.dynasupport.com/tutorial/lis-dyna-users-guide/energy-data> (Erişim tarihi: 09 Ekim 2019).