



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOBÜS DEVRİLME SİMÜLASYONLARI ve ECE R66 YÖNETMELİĞİ

İskender Önder GÜMÜŞ

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2016

TEZ ONAYI

İskender Önder GÜMÜŞ tarafından hazırlanan “Otobüs Devrilme Simülasyonları ve ECE R66 Yönetmeliği” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Başkan: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği

Üye: Prof. Dr. Necmettin KAYA
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği

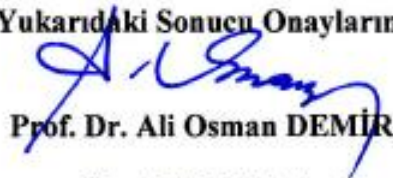
Üye: Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ
Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği


İmza

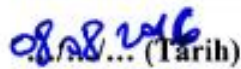

İmza


İmza

Yukarıdaki Sonucu Onaylarım


Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü


... (Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum bütün eserleri kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

01/08/2016

İskender Önder GÜMÜŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOBÜS DEVRİLME SİMÜLASYONLARI ve ECE R66 YÖNETMELİĞİ

İskender Önder GÜMÜŞ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Otobüs devrilme kazalarında deforme olan araç gövdesi, otobüs içerisinde yer alan yolcu ve mürettebatın yaralanması veya ölümünde etkilidir. Bu durum, otobüs üreticilerinin ürettikleri araçlarda devrilme mukavemetini dikkate almaya sevk etmiştir. Günümüzde uygulamada olan ECE-R66 yönetmeliği, devrilme kazalarında yolcuların ve mürettebatın güvenliğini sağlamak için araç üreticilerinin uyması gereken tasarım şartlarını içermektedir.

Bu tez çalışmasında, bir otobüs gövdesinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak devrilme simülasyonu gerçekleştirilmiş ve ECE-R66 yönetmeliğine göre tasarım süreci doğrulaması çalışması anlatılmıştır.

Yapılan bu çalışma için; araç gövde tasarım modeli olarak, Politecnico Di Milano Üniversitesi tarafından hazırlanmış ve George Washington Üniversitesi (National Crash Analysis Center – NCAC) tarafından akademik çalışmalarda kullanılmak üzere kullanıma sunulmuş otobüs sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır.

Otobüs modeli üzerinde yapılan sonlu eleman değişiklikleri için HyperMesh ve HyperCrash, çözüm için RADIOSS programları kullanılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları ise HyperView ve HyperGraph yazılımlarında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otobüs Devrilme, Simülasyon, ECE-R66, Yönetmelik, Tasarım Doğrulama

2016, (x) + (65) sayfa.

ABSTRACT

Msc Thesis

BUS ROLLOVER SIMULATION and ECE R66 REGULATION

İskender Önder GÜMÜŞ

Uludağ University
Graduate School Of Natural And Applied Sciences
Department Of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

A rollover event is one of the most critical hazard for the safety of passengers and crew riding in a vehicle. As a result of observations made over the years, it was observed that the deformed vehicle body, after the rollover accident, of a major impact on passenger injury or death. In this case, the bus manufacturers has led to consider for rollover strength in their vehicles. Today, ECE R66 regulation tests is used to provide safety for passengers and crew in this kind of rollover accidents.

In this study, a rollover simulation of a bus structure and design validation study has performed with finite element method.

For this study, the finite element model, which prepared by Politecnico di Milano University and opened for using and sharing academic studies by George Washington University (NCAC), is used for rollover simulation analysis.

HyperMesh and HyperCrash has used for modification on finite element model and RADIOSS has used for running analysis. HyperView and HyperGraph has used for post-process.

Key Words: Bus Rollover, Simulation, ECE-R66, Regulation, Design Validation

2016, (x) + (65) pages.

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan anneme, eğitim öğretim hayatım boyunca bana göstermiş oldukları sabırdan dolayı kardeşlerime, tez çalışmam boyunca manevi desteğini üzerimde hissettiğim nişanlıma teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında yaptıkları yardımlardan ötürü değerli hocam Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK, Dipl. Ing. Marian BULLA ve çalışma arkadaşlarıma, tez çalışmasında kullanmış olduğum HyperMesh, HyperCrash, RADIOSS, HyperView, HyperGraph yazılımlarını kullanmama izin verdiği için DTA Mühendislik firmasına teşekkür ederim.

İskender Önder Gümüş
01/08/2016

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Devrilme Kazası İstatistikleri.....	7
2.2. ECE-R66 Yönetmeliği.....	10
2.2.1. Yaşam Hacmi.....	11
2.2.2. Devrilme Testi.....	12
2.2.3. Devrilme Testi Metotları.....	13
2.2.3.1. Tüm Araç Devrilme Testi.....	14
2.2.3.2. Belirli Bir Kesitin Devrilme Testi.....	15
2.2.3.3. Belirli Bir Kesite Eşdeğer Yarı-Statik Kuvvet Uygulanması.....	16
2.2.3.4. Yarı-Statik Hesaplamaya Dayalı Komponent Testi.....	16
2.2.3.5. Bilgisayar Simülasyonuna Dayalı Tüm Araç Devrilme Testi.....	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1. Materyal.....	18
3.1.1. Sonlu Eleman Modellemesi.....	18
3.1.1.1. Sonlu Eleman Modelleme Yazılımları.....	19
3.1.2. Otobüs Sonlu Elemanlar Modeli.....	20
3.1.3. Sonlu Eleman Kalite Kontrolü.....	24
3.1.4. Devrilme Süreç Yöneticisi Ara Yüzü Kullanımı.....	25
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Eksplisit Dinamik Analizler.....	29
3.2.1.1. Eksplisit Dinamik Analiz Çözücü Yazılımı.....	35
3.2.2. Eksplisit Dinamik Analizlerde Zaman Adımı.....	35
3.2.3. Eksplisit Dinamik Analizlerde Kütle Artırımı Yöntemi.....	38
3.2.4. Model Doğrulama Süreci.....	40

3.2.4.1. Eksplicit Dinamik Analiz Çözücü Yazılımı Kararlılık Analizleri	41
3.2.5. Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Hazırlıkları	44
3.2.6. Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Tanımlamaları	47
3.2.7. Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Bilgileri	50
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	54
4.1. Birinci Versiyon Analiz Sonuçları	54
4.2. İkinci Versiyon Analiz Sonuçları	56
4.3. Üçüncü Versiyon Analiz Sonuçları	57
4.4. Dördüncü Versiyon Analiz Sonuçları	59
5. SONUÇ	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	Referans Enerji
M	Araç Kütlesi
g	Yerçekimi İvmesi
h	Ağırlık Merkezinin Platform Yüzeyinden Uzaklığı
F	Dış Kuvvet
k	Sertlik (Stiffness)
u	Deplasman Miktarı
P	Global Kuvvet Vektörü
$L(u)$	Sistemin Lineer Olmayan Cevabı
$[M]$	Kütle Matrisi
$[C]$	Sönüm Matrisi
$[K]$	Sertlik (Stiffness) Matrisi
$\{\ddot{x}\}$	Hareket Sonucu Oluşan İvme
$\{\dot{x}\}$	Hareket Sonucu Oluşan Hız
$\{x\}$	Hareket Sonucu Oluşan Deplasman
$\{F(t)\}$	Sisteme Dışarıdan Etkiyen Zamana Bağlı Koşul
Δt	Kritik Zaman Adımı
L	En Küçük Elemanın Kenar Uzunluğu
ρ	Yoğunluk
c	Malzeme İçerisinde Sesin Yayılma Hızı
E	Elastisite Modülü

Kısaltmalar	Açıklama
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
NCAC	National Crash Analysis Center

AIS	Automotive Industry Standard
AMS	Advanced Mass Scaling
NCSA	National Center for Statics and Analysis
FARS	The Fatality Analysis Reporting System
NASS	National Automotive Sampling System
CDS	Crashworthiness Data System
WP 29	UN World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations
TCL	Tool Command Language
CFD	Computational Fluid Dynamics
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. FARS kaza istatistikleri	8
Şekil 2.2. NASS-CDS verilerine göre ağır yaralanmalı kaza oranları.....	8
Şekil 2.3. NASS-CDS verilerine göre ölümlü kaza oranları.....	9
Şekil 2.4. Yaşam hacminin yanalda yerleşim planı	11
Şekil 2.5. Yaşam hacminin dikeyde yerleşim planı	12
Şekil 2.6. Devrilme testi prosedürü.....	13
Şekil 2.7. Tüm araç devrilme testi	14
Şekil 2.8. Belirli bir kesitin devrilme testi	15
Şekil 2.9. Belirli bir kesite eşdeğer yarı-statik kuvvet uygulanması.....	16
Şekil 2.10. Yarı-statik hesaplama dayalı komponent testi	17
Şekil 3.1. Otobüs sonlu elemanlar modeli	20
Şekil 3.2. Ls-Dyna modelinin RADIOSS formatına dönüştürülmesi	21
Şekil 3.3. Superstructure yapısı.....	22
Şekil 3.4. St-37 malzemesi Stress-Strain eğrisi	23
Şekil 3.5. Devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün açılması	26
Şekil 3.6. Aracın içeri alınması ve koordinat sisteminin belirlenmesi.....	26
Şekil 3.7. Modelin ağırlığı ve ağırlık merkezinin belirlenmesi	27
Şekil 3.8. Yaşam hacmi alt başlangıç (S_R) noktaları.....	27
Şekil 3.9. Platformun oluşturulması ve devrilme yönünün belirlenmesi	28
Şekil 3.10. Platformun kararsız denge konumuna kadar döndürülmesi.....	28
Şekil 3.11. Devrilme şartları ve yüzeyinin belirlenmesi	29
Şekil 3.12. Modelin çözüm için dışarı gönderilmesi.....	29
Şekil 3.13. Kütle-yay sistemi ve F-u eğrisi	30
Şekil 3.14. Lineer olmayan sistemin P-u eğrisi	31
Şekil 3.15. Zaman entegrasyon şeması	32
Şekil 3.16. Çözümlerin karşılaştırması.....	34
Şekil 3.17. Çözümlerin çözüm kapasiteleri	34
Şekil 3.18. Basit model üzerinde zaman adımı	36
Şekil 3.19. Zaman adımı ve eleman boyu ilişkisi	37
Şekil 3.20. Geleneksel kütle ekleme ve AMS metodu kullanılan simülasyon sonucu ...	38
Şekil 3.21. Geleneksel kütle ekleme yöntemi ve AMS metodu arasındaki reaksiyon kuvveti farkı	39

Şekil 3.22. RANDOM komutunun sonuçlar üzerindeki etkisi	42
Şekil 3.23. RANDOM komutunun referans olarak alınan otobüs modeli üzerindeki etkisi	43
Şekil 3.24. Zamana göre enerji değişimi.....	44
Şekil 3.25. Otobüs modelinden silinen dış sac yapısı	45
Şekil 3.26. HyperMesh Model Checker arayüzü	46
Şekil 3.27. Yaşam hacminin otobüs modeli içerisindeki yerleşimi	48
Şekil 3.28. Devrilme platformu arka tekerlek bölümü.....	48
Şekil 3.29. Otobüs modelinin devrilme yönünde döndürülmesinin önden görünümü ...	49
Şekil 3.30. Otobüs modelinin son halinin HyperCrash içerisinde önden görünümü	50
Şekil 3.31. Referans otobüs modeli üzerindeki 45x45 mm ebadındaki profiller.....	51
Şekil 3.32. Referans otobüs modeli üzerindeki 50x90 mm ebadındaki profiller.....	52
Şekil 3.33. Referans otobüs modeli üzerindeki 50x100 mm ebadındaki profiller.....	52
Şekil 4.1. Birinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi.....	54
Şekil 4.2. Birinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti	55
Şekil 4.3. Birinci versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi	55
Şekil 4.4. İkinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi.....	56
Şekil 4.5. İkinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti	56
Şekil 4.6. İkinci versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi	57
Şekil 4.7. Üçüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi.....	58
Şekil 4.8. Üçüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti.....	58
Şekil 4.9. Üçüncü versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi	59
Şekil 4.10. Dördüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi	60
Şekil 4.11. Dördüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Otobüs kazalarında yaralanma dağılımı, İspanya	9
Çizelge 3.1. Eleman tipleri ve sayıları	22
Çizelge 3.2. St-37 malzeme özelliği	23
Çizelge 3.3. Kauçuk malzeme özelliği.....	24
Çizelge 3.4. Eleman kalite bilgileri.....	25
Çizelge 3.5. Geleneksel kütle ekleme ve AMS metodu arasındaki çözüm süresi farkı..	39
Çizelge 3.6. 45x45, 50x90 ve 50x100 mm ebatlarındaki profillerin kalınlık bilgileri....	51
Çizelge 3.7. Yapılacak olan devrilme analizleri ve profil kalınlıkları	53

1. GİRİŞ

Otobüs kazaları içerisinde devrilme, yolcuların ve mürettebatın güvenliğini ve daha önemlisi hayatını tehdit eden en önemli tehlikelerden biridir. Bu güne kadar yapılan araştırma ve çalışmalar incelendiğinde, otobüs veya midibüs kazalarındaki yaralanma ve ölümlerin önemli bir bölümünün, aracın devrilmesi sonucu olduğu gözlemlenmiştir. Avrupa'daki şehirlerarası yollar ve otobanlarda gerçekleşen otobüs veya midibüs kazalarının oluşum raporlarına göre; kazaların %42'si devrilme sonucudur. Oluşan bu devrilme kazalarında otobüs veya midibüs içerisindeki insanların %19'u ölmekle birlikte en yüksek oran; sabit bariyer üzerinden devrilmelerde %30'luk bir ölü veya ağır yaralı oranı ile karşımıza çıkmaktadır. Otobüsün çift katlı olması ise, ölü veya ağır yaralı oranının %80 ile üst katında olmasına neden olmaktadır. 1995 – 1999 yılları arasında oluşan kazalarda; devrilme sonucu oluşan kazalardaki ölüm oranının diğer kazalara oranla 5 kat fazla olduğu değerlendirilmektedir. (http://www.figes.com.tr/ls-dyna/dokuman/LS-DYNA%20_ile_ECE-R66_Yonetmeli.pdf, 2016)

Bir otobüs veya midibüs devrilmesinde yolcular, otomobil yolcusuna kıyasla dönme merkezine uzak bir konumda bulunmaktadır. Bu da devrilmenin gerçekleştiği esnada yolcuların araç içerisinde savrulmasına veya araçtan fırlamasına neden olabilmektedir.

Oluşabilecek tüm bu kötü senaryoların önüne geçilebilmesi adına “Yolcu Taşıyan Araçların Yapısal Mukavemeti” başlıklı “ECE-R66” yönetmeliği 1970 başlarında Avrupa tarafından testlerle uygulanmaya başlamıştır. Ancak 1986 başlarından itibaren ise yürürlüğe alınarak birçok Avrupa ülkesinde otobüslerde uygulanan bir yönetmelik halini almıştır. (Vincze, 1998)

Otobüs devrilmesi problemi ve sonrasında oluşabilecek durumlar ECE-R66 yönetmelik şartları göz önüne alınarak fiziksel testle belirlenebilir. Ancak bu konuda yapılan birçok çalışmadan anlaşılmıştır ki; fiziksel testlerin dışında, bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da bu çalışmalar gerçekleştirilebilir ve fiziksel test ile uyumlu sonuçlar alınabilir. Gerçek test sonuçları ile uyumluluğu sağlanan sonlu elemanlar yöntemi sayesinde pahalı test düzenekleri ve test işlemlerinden kurtulmak

mümkündür. Fiziksel testlerin gerçekleştirilemediği durumlarda ise sonlu elemanlar modelinin yine sonlu elemanlar modeli ile doğrulanması mümkündür. Bu tip yöntemler kullanılarak herhangi fiziksel bir test yapmadan üretim gerçekleştiren otomotiv firmaları günümüzde mevcuttur.

Sadece sonlu eleman yöntemleri kullanılarak yapılan bu çalışmalar, “simülasyon sonuçları için kararlılık analizleri” olarak isimlendirilebilir. Arka arkaya gerçekleştirilen analizlerin sonuçları arasında gerek fiziksel yapı burkulmalarından, gerek ise yapıların birbirleri arasındaki temas problemlerinden dolayı istikrarsızlıklar olabilmektedir. Bu tür farklar, yüksek hızlarda gerçekleştirilen fiziksel çarpışma testlerinde de meydana gelebilmektedir. Bu aşamada sonlu eleman çözücüsünün kararlılık analizlerini yapabilmesi önemlidir.

Yapılan bu tez çalışmasında kullanılan çözücü için kararlılık analizleri, yapıdaki elemanlara her bir çözümde farklı “Random Noise” değeri verilerek gerçekleştirilmiştir. Her çözüm için verilen bu farklı değerler sayesinde aralarında farklar olması beklenen sonuçlar değerlendirilmiştir. Zeminde oluşan kontak enerjisi üzerinden yapılan değerlendirmelerde, farklı “Random Noise” değerleri verilerek çıkan sonuçlar arasında kayda değer bir fark olmadığı gözlemlenerek, referans olarak alınacak modelin doğruluğu tespit edilmiştir.

Tez çalışması için, Politecnico Di Milano üniversitesi tarafından hazırlanan ve George Washington Üniversitesi (National Crash Analysis Center – NCAC) tarafından akademik çalışmalarda kullanılmak üzere yayınlanan otobüs modeli (<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, 2015) temel alınarak devrilme simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Otobüs iskeletinde yer alan belirli profillerin kesit kalınlıkları, üretim kataloglarında yer alan bilgilere göre, yani üretilebilir olacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede devrilme sonrasında yolcuları ve mürettebatı tehlikeye atacak deformasyonlar engellenmiş ve deforme olan araç gövdesinin yaşam hacmine girişim yapmaması için optimum profil kalınlıkları tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bu çalışmada modelleme ve var olan modelde yapılan güncelleştirmeler için HyperMesh ve HyperCrash yazılımları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar çözücü yazılımı olarak RADIOSS kullanılmış ve sonuçların incelenebilmesi için de HyperView ve HyperGraph yazılımları kullanılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

ECE-R66 devrilme testi yönetmeliğine ait bilgileri veya bu konudaki teknik açıklamaları vermeden önce bu konuda daha önceden yapılmış olan çalışmalara bakmak gerekir. Çalışmalar incelendiğinde, yönetmelikte yer alan talimatların uygulanmasıyla gerçekleştirilen ve sertifikasyon süreci anlatılmış çalışmaların yanında; test düzeneklerinin ve yaklaşımların değiştirilmesiyle süreci hızlandırmaya yönelik çalışmalar, araçta kullanılan malzemelerin seçimiyle daha mukavim gövdenin elde edilmesine yönelik çalışmalar veya sanal ortamda gerçekleştirilen analizlerin hızlandırılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle yapılan bu tez çalışmasında verilen temel bilgiler ve tanımlar, çeşitli kaynaklardan alıntılar yapılarak anlatılmıştır.

SML Isuzu firmasından Sidhu (2012) yapmış olduğu çalışmasında AIS-031 standardına göre bir otobüsün devrilme simülasyonlarını HyperWorks yazılımlarını kullanarak gerçekleştirmiş ve otobüs gövdesinin profil bileşenlerine ait dayanım gereksinimlerini irdemiştir. Aracın profil kesitlerine etkiyen normal ve teğet yönündeki kuvvetler yardımıyla profillerin hangi kesit özelliklerine sahip olması gerektiği çıkarımını yapmıştır.

Belsare ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmalarında yine AIS-031 standardına göre bir otobüsün devrilme simülasyonunu gerçekleştirmiş ve yapılan nümerik doğrulamalardan sonra sonlu elemanlar yönteminin, fiziksel teste alternatif olarak kullanılabilmesi ve bu sayede zaman ve maliyet açısından tasarrufa gidilebileceği kanısına varmıştır.

Volvo firmasından Kumar (2012), ECE-R66 yönetmeliğine göre sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirdiği çalışmasının doğruluğunu analizler sonucunda oluşan enerji eğrilerine göre değerlendirmiştir. Toplam enerjinin analiz boyunca değişmediğine dikkat çekerek kinetik enerjinin azalıp iç enerjiye dönüştüğünü göstermiştir.

Bobineau ve ark. (2013) HyperWorks yazılımlarını kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında, sonlu elemanlar yönteminin hızlandırılması için AMS (Advanced Mass Scaling) ve Multi-Domain metotlarını kullanarak hangi yöntemde nelere dikkat edilmesi gerektiğini irdelemişlerdir. Buna göre; AMS metodunun, rijit gövdenin ötelenme momentumunu değiştirmeden elemanların zaman adımı değerini yükselttiği için yüksek doğrulukta sonuçlar verebildiğini belirtmişlerdir. Ancak Multi-Domain metodu kullanılmak istendiğinde, lokal bazı bölgelerde (özellikle fiziksel kopmaların olduğu bölgelerde) daha küçük elemanlarla sonlu eleman yapısının oluşturulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Deshmukh (2002) biraz daha farklı bir yaklaşım sergileyerek rijit ve esnek gövde yapısına sahip otobüs gövdelerinde tavandan ezme ve devrilme simülasyonları gerçekleştirmiştir. Özellikle devrilme simülasyonlarında; rijit gövde yapısına sahip araç içine manken (Dummy) insan modelleri yerleştirerek bu modellerin davranışlarını incelemiştir. Sonuç olarak ise emniyet kemeri takan ve takmayan manken (Dummy) modellerinin çeşitli bölgelerinde oluşabilecek yaralanmalara dikkat çekmiştir. Günümüzde uygulamada olan ECE-R66 gibi standartlara atıfta bulunarak, yaşam hacmi için var olan standartların yanında insanların farklı uzuvlarında oluşabilecek yaralanmalar için de standartların olması gerektiği kanısına varmıştır.

Isuzu Türkiye firmasından Kara ve ark. (2014), Visigo model araçları için HyperWorks yazılımlarını kullanarak devrilme simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları bu simülasyonların ardından akreditasyonları, NCSA (National Center for Statistic and Analysis Research and Development) tarafından onaylanmıştır.

Hashemi (2005), İngiltere, İspanya ve Macaristan'da zorunlu olarak uygulanan UN-ECE-R66 standardı için farklı metotları değerlendirmiştir. Yapılabilecek olan testleri üç başlıkta incelemiştir. Bunlardan ilki, aracın tam yapı olarak devrilmesinin gerçekleştirilmesi, ikincisi, aracın belirli bir kesitinin devrilme testine tabi tutulması ve son olarak sabit bir eğimde bağlanan aracın belirli bir kesiti üzerine pendulum çarpma testinin gerçekleştirilmesi olarak alınabilir. Bu testlerin uygulanabilirlik ve tekrar

edilebilirlik açısından aralarındaki farkları incelemiş ve pendulum testinin tekrar edilemez olduğu kanısına varmıştır.

Vincze (1998) yapmış olduğu çalışmada Avrupa ülkelerinde devrilme testlerinin tarihinden bahsederek Macaristan'ın devrilme test şartnamelerinin geliştirilmesi için üstlendiği rolleri kaleme almıştır. Ayrıca Hashemi (2005) gibi kendisi de devrilme test düzeneklerinin tiplerinden bahsetmiştir.

Iskandar ve ark. (2013), yaşlı araçların devrilme mukavemetlerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada yaşlanma faktörü ve profillerdeki korozyonun, direkt olarak malzeme özelliklerini etkilediği ve aracın tümünün mukavemetini azalttığı bulunmuştur. Buradan hareketle yaşlı büyük araçlarda devrilme mukavemetinin değerlendirilebilmesi için yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği kanısına varmışlardır.

Devrilme esnasında daha mukavim bir profil yapısının elde edilmesi adına Yılmaz (2011), çelik profillerde malzeme özellikleri daha iyi olan bir malzeme seçiminin gerekliliğini vurgulamıştır. Bunun yanında çelik profillerin içerisine köpük uygulamasının yapılması durumunda devrilme mukavemetinin yükseleceği sonucuna varmıştır.

HyperWorks yazılımlarında devrilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan ve kullanıcının işini oldukça kolaylaştıran devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün (Rollover Process Manager) geliştirme ve doğrulama aşamasından Wood (2013), yaptığı çalışmasında bahsetmiştir.

Sonlu eleman yapısının oluşturulması için ANSA, çözümlerin gerçekleştirilmesi için Ls-Dyna yazılımının kullanıldığı çalışmada Elitok ve ark. (http://www.fig.es.com.tr/ls-dyna/dokuman/LS-DYNA%20ile_ECE-R66_Yonetmeli.pdf, 2016); TEMSA HD Safari model otobüsün ECE-R66 yönetmeliğine göre sertifikasyon sürecini anlatmıştır. Araçta devrilme mukavemetinin yükseltilmesi ve güvenliğin artırılması için kullanılan "Roll-Over Protection Structure" yapısının etkileri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; bu yapının, çarpışma enerjisinin emilimini arttırdığı ve yolcu güvenliğini daha iyi sağladığı anlaşılmıştır.

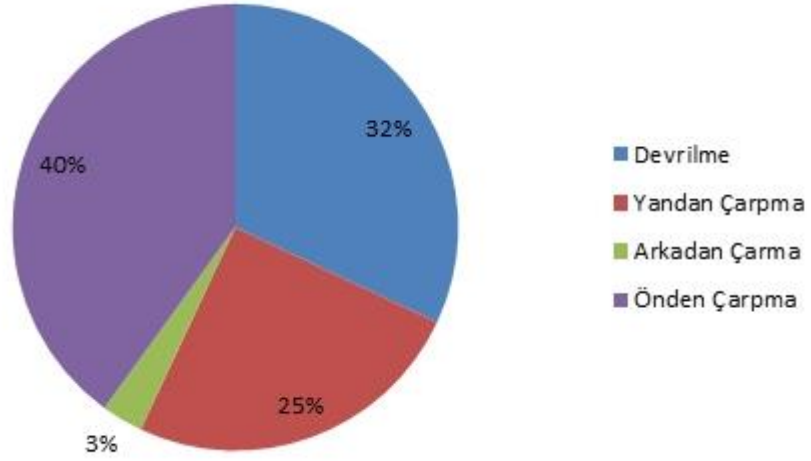
Fiziksel bir test olmadan sonlu elemanlar modelinin doğrulanmasına yönelik diğer bir çalışma (http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/RADIOSS_TechPaper.pdf, 2016), RANDOM komutunun RADIOSS çözümlerindeki kullanımından bahsetmektedir. Yapılan çalışmaya göre; bu komut sayesinde modelde yer alan elemanların her birine bir “Random Noise” değeri atanarak çözüme başlanmakta ve arka arkaya yapılan çözümlerde bir önceki çözümle karşılaştırma yapılarak aralarındaki farklara bakılmaktadır. Farkların göz ardı edilebildiği sonuçlar sayesinde, sonlu elemanlar modelinde herhangi bir şekilde tanımlama ve modelleme hatası olmadığı anlaşılmaktadır. Bu sayede de fiziksel bir test olmadan model doğrulaması gerçekleştirilmiş olacaktır.

2.1 Devrilme Kazası İstatistikleri

Her yıl gerçekleşen kazalar, birçok insanın ölümüne neden olduğu gibi birçoğunun da yaralanmasına veya sakat kalmasına neden olmaktadır. Gerçekleşen kazalar incelendiğinde hafif araçların karıştığı kazaların yanında yolcu taşıyan otobüs, midibüs gibi araçların karıştığı kazalar da azımsanmayacak derecede çoktur. Bu araçlarda aynı anda daha fazla insanın taşınabilmesi ve gerçekleşen kazanın oluşumuna göre daha fazla insanın ölme riski olduğundan, üzerinde dikkatle durulması ve önlenmeye çalışılması gerekmektedir.

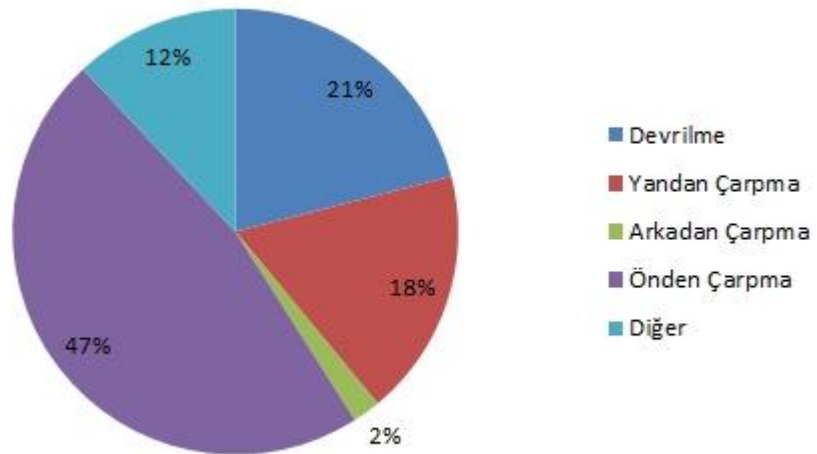
Yolcu taşıyan araç kazaları incelendiğinde devrilme kazalarının yeri oldukça büyüktür. Ayrıca devrilme kazalarında araç içerisinde savrulma, araçtan fırlama veya araç içerisindeki bir uzvun insanlara şiddetli teması gibi durumlardan dolayı ölümler artmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri’nde FARS (The Fatality Analysis Reporting System) raporlarına göre; gerçekleşen otobüs kazalarının %32’si devrilme olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle devrilme testleri veya analizleri, üreticiler ve akademik çalışmalar yapan personel tarafından araştırma konusu haline gelmiştir. (Belsare ve ark., 2012)

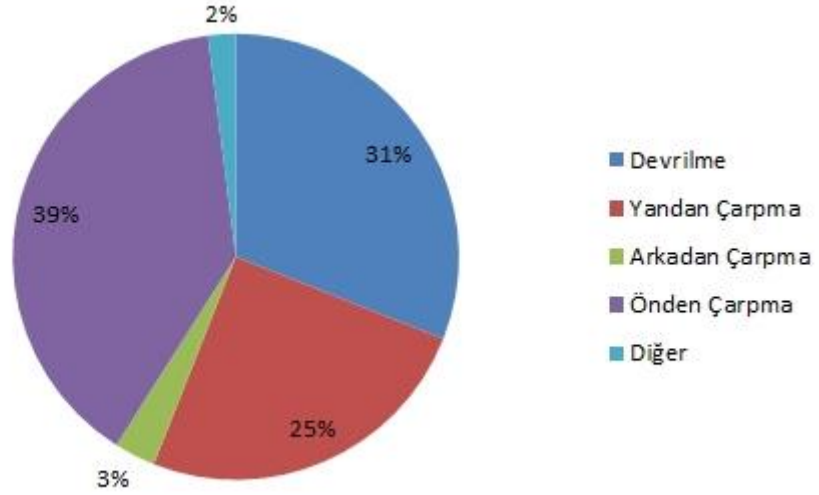


Şekil 2.1 FARS kaza istatistikleri (Belsare ve ark., 2012)

NASS (National Automotive Sampling System) ve CDS (Crashworthiness Data System) tarafından yapılan başka bir istatistiğe göre ise; 1997-2001 yılları arasında gerçekleşen otobüs kazalarında yolcu ölümüyle sonuçlanan kazalarda %31’lik bir dilim devrilme kazasından dolayı olurken, ağır yaralanmalarda devrilme kazalarının etkisi %21 olarak belirtilmektedir. (Deshmukh, 2002)



Şekil 2.2 NASS-CDS verilerine göre ağır yaralanmalı kaza oranları (Deshmukh, 2002)



Şekil 2.3 NASS-CDS verilerine göre ölümlü kaza oranları (Deshmukh, 2002)

Avrupa’da da otobüs üreticileri, yolcuların güvenliği ve devrilme kazalarında ölümlerin azaltılması için çalışmalarını sürdürmektedir. Bu nedenle devrilme güvenilirliği ve devrilme mukavemeti, üreticilerin odaklandığı en önemli hususlar olmuştur.

1995-1999 yılları arasında İspanya’da yapılan araştırmalara göre; devrilme kazasının tüm kazalar içerisindeki oranı %4 olarak ölçülmüş ve ölümlü sonuçlanan kazalara bakıldığında devrilme kazalarının oranı diğer kazalara oranla 4 kat yüksek bulunmuştur. (Deshmukh, 2002)

Çizelge 2.1 Otobüs kazalarında yaralanma dağılımı, İspanya (Deshmukh, 2002)

Yaralanma Durumu	Devrilme	Diğer
Ölüm	% 9,6	% 2,5
Ciddi Yaralanma	% 32,1	%7,7
Orta Derecede Yaralanma	% 55,6	% 43,3
Yaralanma Olmayan	% 2,6	% 46,5
Toplam Yolcu Sayısı	1037	14151

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde devrilme kazalarının riski ve önemi daha iyi anlaşılabilir. Bu nedenle, 50 yılı aşkın süredir Avrupa Birliği çerçevesinde çalışan Araç Yönetmeliği Uyum Dünya Forumu (WP 29) vasıtası ile; motorlu taşıtlarda global çapta uyumlaştırılmış düzenlemelerin yer aldığı bir takım sözleşmeler imzalanmaktadır. Bu yönetmelik ve sözleşmeler yol ve yolcu güvenliği alanında motorlu taşıt üreticilerine ekstra yükümlülükler getirmektedir.

Hazırlanan bu uyum sözleşmelerine üye ülkelerin yanında, AB'ye üye olmayan ülkelerin de girmeleri sağlanarak global düzeyde uyumun sağlanması amaçlanmaktadır. Yapılan bu düzenlemelerin yer aldığı sözleşmeye UNECE Yönetmelikleri veya daha kısaca ECE Yönetmelikleri denilebilmektedir. Türkiye de, yapılan veya bundan sonra yapılacak sözleşmelere uyacağını 27 Şubat 1996 tarihinde taahhüt ederek, Araç Yönetmeliği Uyum Dünya Forumu'nda kabul edilmiş yönetmelikleri uygulama sürecine girmiştir. (UNECE, 2006)

Yapılan bu tezin de konusunu oluşturan sözleşme ECE Yönetmelikleri içerisinde 66. numaraya sahip olan (ECE-R66) “Yolcu Taşıyan Araçların Yapısal Mukavemeti” başlıklı sözleşmedir.

2.2 ECE-R66 Yönetmeliği

ECE-R66 yönetmeliğinin temel olarak amacı; otobüs içerisinde belirlenen yaşam hacminin dışında kalan yapıların, devrilme testi esnasında veya sonrasında yolcu veya mürettebata vereceği zararı sifira indirgemektir. Yani aracın, test öncesinde yaşam hacminin dışında kalan hiçbir iskelet uzvunun test sonunda da yaşam hacmine girmemesi istenmektedir. Test süresince devrilmeden dolayı oluşan enerjinin, araç iskeleti tarafından sönmülmesi ve bu sayede yaşam hacminin korunması beklenmektedir.

ECE-R66 yönetmeliği, tek katlı, şoför ve mürettebatın dışında 22 veya daha fazla yolcu taşıma kapasitesi olan otobüs veya midibüslere uygulanması zorunlu olan bir yönetmeliktir. Yönetmelik içerisinde belirtilmiş ve “Superstructure” olarak

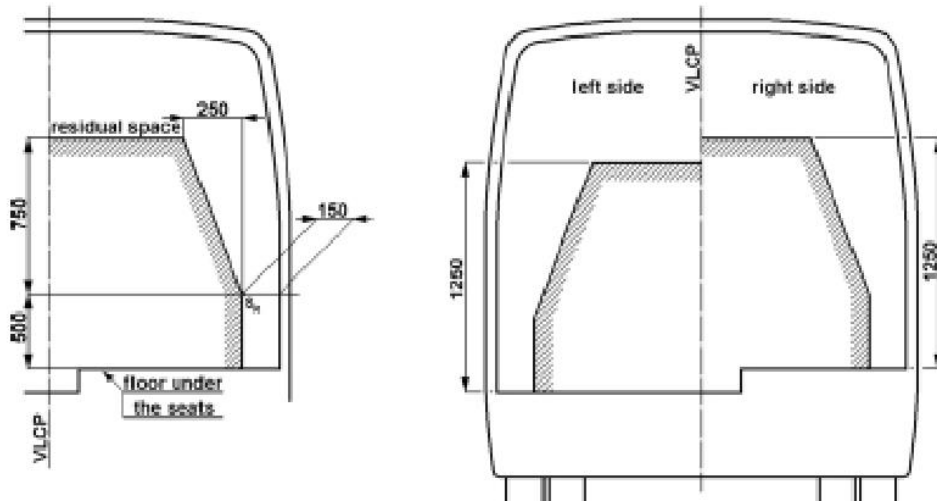
isimlendirilen yapı, araç üzerinde devrilme esnasında enerjinin sönümlenmesine katkı sağlayacak olan tüm üst iskelet yapısını temsil etmektedir. Aracın yönetmelikteki şartları sağlayıp sağlamadığı da bu yapı üzerinden yapılan değerlendirmelerle belirlenmektedir. (Yılmaz, 2011)

2.2.1 Yaşam Hacmi

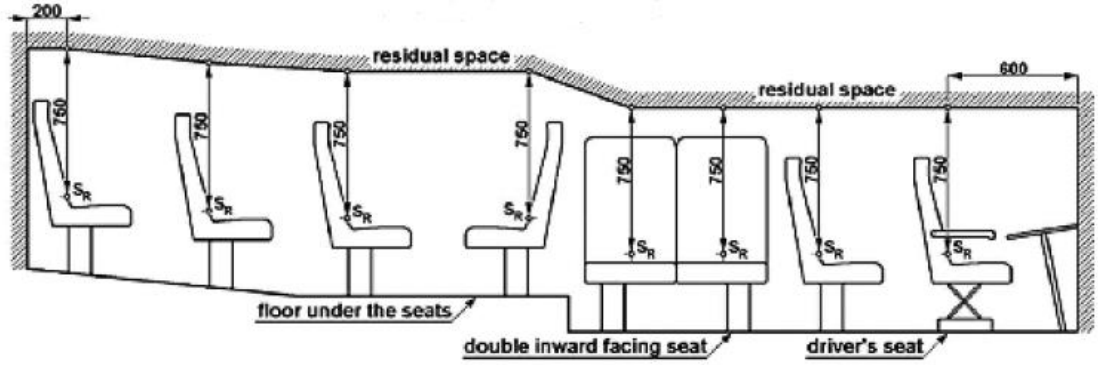
Yolcu ve mürettebatın hayatta kalabilmesi için oluşturulacak olan ve test sonunda herhangi bir uzvun girişim yapıp yapmadığı değerlendirilecek olan yaşam hacminin boyutları ECE-R66 yönetmeliği içerisinde detaylı olarak belirlenmiştir.

Hacmin alt başlangıç noktaları; önde şoför ve muavin koltuğu, arkada ise sağ ve solda yer alan yolcu koltuklarının S_R noktaları temel alınarak oluşturulur. Hacmin yan iskelete olan uzaklığı minimuma indiği noktada 150 mm, maksimuma ulaştığı noktada ise 250 mm'de olması gerekmektedir. Dikey ekseninde ise boyunun 750 mm olması gerekmektedir.

Araç içerisinde dikeyde ve yanlarda belirli bir yerleşime sahip olan bu yaşam hacminin yerleşim özellikleri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te yer almaktadır.



Şekil 2.4 Yaşam hacminin yanlarda yerleşim planı (UNECE, 2006)



Şekil 2.5 Yaşam hacminin dikeyde yerleşim planı (UNECE, 2006)

2.2.2 Devrilme Testi

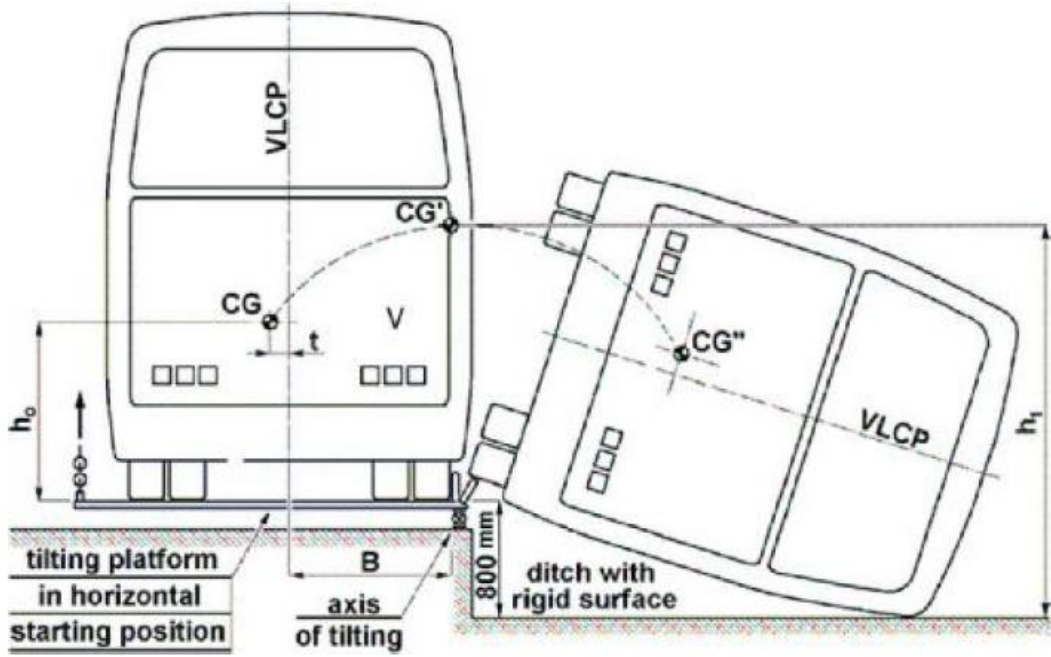
Yürürlükte olan bu yönetmelik, sürekli olarak günün gereksinimlerine göre güncellenen uluslararası bir yönetmeliktir. Mevcut olarak kullanılan yönetmelik ise; 22 Şubat 2006 tarihinde yayınlanarak yürürlüğe alınmıştır. (Yılmaz, 2011)

Devrilme testi, komple bir araç gövdesinin yanal olarak bir platform üzerinden serbest düşmeye bırakılması ile gerçekleştirilmektedir. Araç gövdesi platform üzerindeyken, durağan halden kararsız denge konumuna kadar yavaşça yana yatırılır. Devrilme testi ise; araç bu kararsız denge konumunda iken, tekerleklerin platformda yere değme noktalarından geçen dönme eksenine göre sıfır açısız hız ile başlar. Bu esnada araç, sahip olduğu referans enerji ile aşağıda verilen denkleme göre karakterize edilir.

$$E = 0.75Mgh \quad (2.1)$$

Bu denklemde " M " araç kütleini, " g " yerçekimi ivmesini, " h " ise ağırlık merkezinin platform yüzeyinden uzaklığını göstermektedir. (UNECE, 2006)

Araç ile üzerinde bulunduğu platform arasındaki temas, kararsız denge konumu geçildiğinde kesilir ve araç, 800 mm derinliğe sahip kuru ve pürüzsüz bir beton hendeğe devrilir. Devrilme testinin yönü, araç iskeletinde yer alan ve yaşam hacmini tehdit eden uzuvların yoğun olduğu kısma göre değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 2.6 Devrilme testi prosedürü (UNECE, 2006)

2.2.3 Devrilme Testi Metotları

Mevcut olarak kullanılan ECE-R66 yönetmeliğinin gerçekleştirilebilmesi için, aşağıda belirtilmiş olan test metotlarından birinin uygulanması gerekmektedir. (UNECE, 2006)

1. Tüm araç devrilme testi
2. Araç gövdesinin belirli bir kesitinin devrilme testi
3. Araç gövdesinin belirli bir kesitine eşdeğer yarı-statik kuvvet uygulanması
4. Yarı-statik hesaplama dayalı komponent testi
5. Bilgisayar simülasyonuna dayalı tüm araç devrilme testi

Bu metotlardan birincisi standart metot olarak kullanılmaktadır. Diğer metotlar ise eşdeğer hesaplama metodu olarak ele alınmalıdır. 3. ve 4. metotlar; ECE-R66 yönetmeliği 2006 versiyonunda ilk defa ele alınmıştır. Bunun yanında 1., 2. ve 3. metotlar, deneysel metotlar olarak karşımıza çıkmaktadır. 5. metot kullanılmak istendiği durumda ise; resmi olarak tüm araç devrilme simülasyonunun kabul gördüğü unutulmamalıdır. (Yılmaz, 2011)

2.2.3.1 Tüm Araç Devrilme Testi

Bu test yönteminde otobüs gövdesinin tamamı kullanılmaktadır. Otobüs, devrilme platformundan başlık 2.2.2’de belirtildiği gibi serbest düşmeye bırakılarak, gövde iskeleti üzerinde oluşan deformasyonlar incelenmektedir.

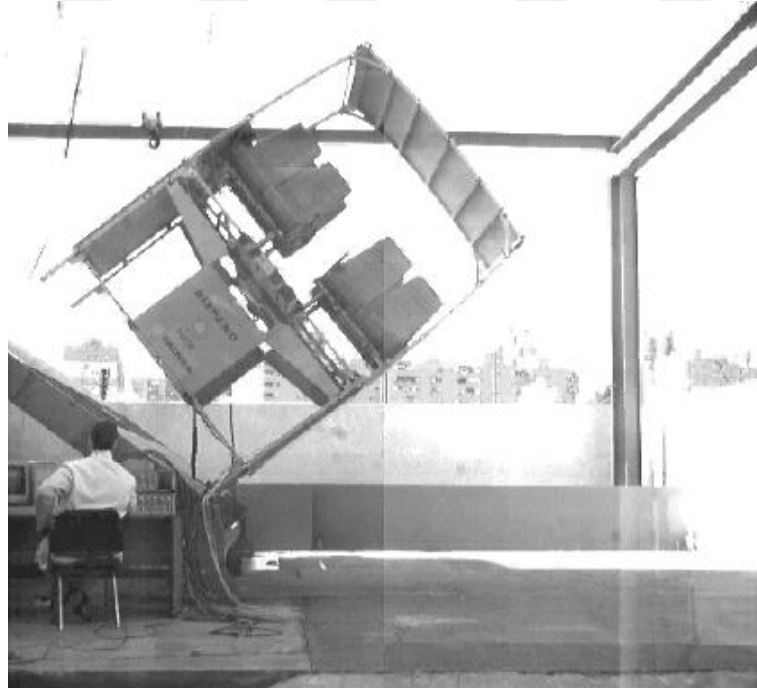


Şekil 2.7 Tüm araç devrilme testi (Vincze, 1998)

2.2.3.2 Belirli Bir Kesitin Devrilme Testi

Bu yöntemde otobüs gövdesinin belirli bir kesiti devrilme platformundan serbest bırakılarak devrilme testi gerçekleştirilmektedir. Devrilme platformu özelliği ve yüksekliği, tüm araç devrilme testindeki platform özelliği ve yüksekliği ile aynıdır. Gövdenin belirli bir bölümü seçilirken dikkat edilmesi gereken hususlar mevcuttur. (UNECE, 2006) Buna göre;

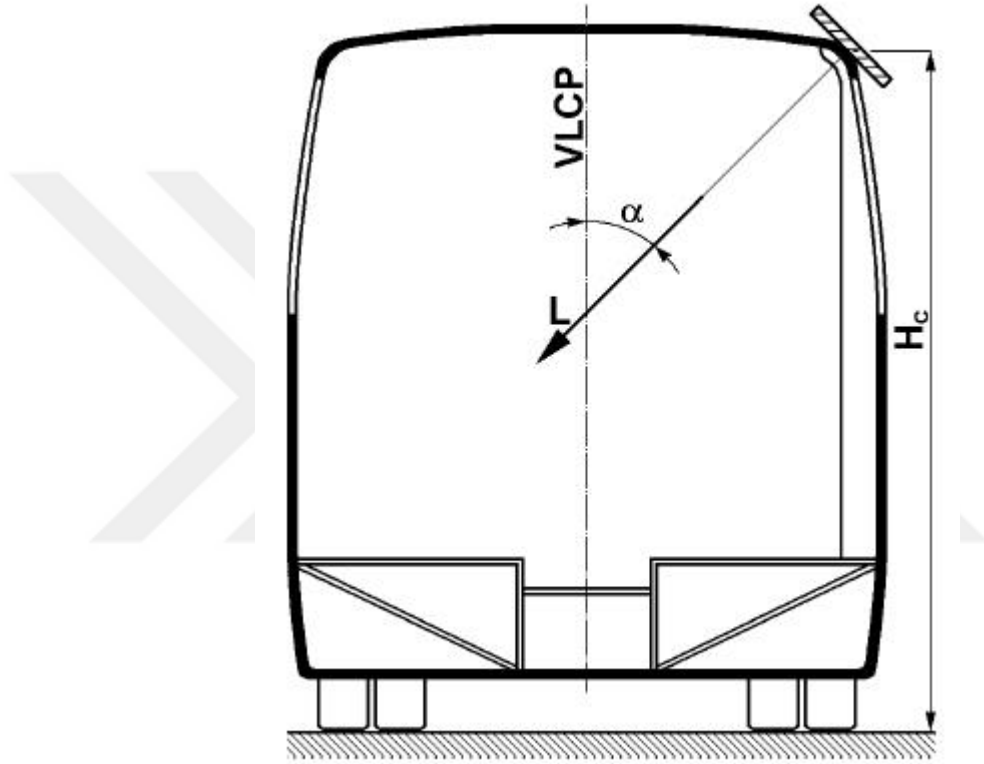
- Tavan bölmesindeki profil yapısı ve bağlantısı farklı olan tüm kesitlerin teste tabi tutulması gerekmektedir.
- Test edilen kesitin enerjiyi sönmleme yeteneği, tüm aracın sönm yeteneğinin en az %80'i olmalıdır.
- Kesitin kütle dağılımı, tüm aracın kütle dağılımı ile aynı olmalıdır.
- Test edilen bölüm temel enerji sönmleyici elemanları da içermelidir. (Koltuk çerçeveleri, sac kaplamaları vs.)



Şekil 2.8 Belirli bir kesitin devrilme testi (Hashemi, 2005)

2.2.3.3 Belirli Bir Kesite Eşdeğer Yarı-Statik Kuvvet Uygulanması

Bu test yöntemindeki amaç ise; aracın iskeletinin belirli bir bölgesine odaklanılarak, malzeme veya kaynak bağlantısının dayanımının kontrol edilmesidir. Bu bölgenin seçimi de dikkatli yapılmalıdır. Enerji sönümü tüm aracı temsil edebilecek bölgelerin seçilmesi gereklidir.



Şekil 2.9 Belirli bir kesite eşdeğer yarı-statik kuvvet uygulanması (UNECE, 2006)

2.2.3.4 Yarı-Statik Hesaplamaya Dayalı Komponent Testi

Bu yöntemde araç iskeletinin sadece belirli bir komponent veya komponent grubunun dayanımı kontrol edilmektedir. Bu yöntemde uygulanan kuvvet yarı-statik olarak belirlenen bir bölgeye uygulanmaktadır. Ancak bazı durumlarda dinamik olarak çarpma testi de gerçekleştirilebilir. Seçilecek olan yöntemde göre test düzeneği farklılık gösterir.



Şekil 2.10 Yarı-statik hesaplama dayalı komponent testi (Hashemi, 2005)

2.2.3.5 Bilgisayar Simülasyonuna Dayalı Tüm Araç Devrilme Testi

Bu yöntem seçilmek istendiği takdirde aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. (UNECE, 2006)

- Malzeme modelinin test verilerinden desteklenerek oluşturulmasına dikkat edilmelidir. Matematiksel model davranışının fiziksel davranışla uyumu sağlanmalıdır.
- Sanal ortamda hesaplanan ağırlığın gerçek modelle uyumuna ve ağırlık merkezi hesaplamasının gerçek modelle uyumuna dikkat edilmelidir.
- Simülasyon programı analize kararsız denge konumundan başlamalı ve deformasyonun en fazla olduğu zamana kadar devam etmelidir.
- Simülasyon çözümü istikrarlı olarak ilerlemeli, sonuçlar zaman adımı değerlerinden bağımsız ve kesin olmalıdır.
- Matematiksel modelde simülasyon süresince fiziksel olarak teması girecek parçalar arasında kontak tanımlanmalı ve kontak davranışı iyi incelenmelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Sonlu Eleman Modellemesi

Sonlu elemanlar yöntemi ya da sonlu elemanlar metodu; kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen problemleri çözebilmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. İlgilenilen bölge sonlu elemanlar (Finite Element) topluluğu olarak gösterilerek, bu elemanların düğüm bölümlerinde yaklaşık fonksiyonlar belirlenmekte ve bu elemanlar ağı kullanılarak kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüme ulaşılmaktadır.

Karmaşık mühendislik problemleri, beraberinde aynı karmaşıklıkta çözümler içermektedir. Bu karmaşa, çözüm aşamasını da hassasiyetlikten uzaklaştırmaktadır. Karmaşık problemlerin en kısa yoldan ve doğru sonuca en yakın çözüme götürülmesi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılabilmektedir. Bu sayede çözümsüz gibi görülen problemlerin çözümü de bu yöntemle gerçekleştirilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle; katı ve sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetik, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda problemler çözülebilmektedir. Bu sayede sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, kararlı hal veya zamana bağlı problemlere ve lineer / lineer olmayan problemlere uygulanabilmektedir.

Bütün bu nedenlerden dolayı mühendislik alanında sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1950 başlarında uçak gövdelerinin gerilme analizleri için kullanılmıştır. Sonrasında da bu yöntem, uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaya devam etmiştir. Günümüzde de birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılan en etkili ve en hızlı yöntem haline gelmiştir.

Sonlu eleman modellemesi için kullanılabilecek birçok bilgisayar yazılımı mevcuttur. Yapılan bu tez çalışmasında da HyperMesh ve HyperCrash yazılımları kullanılmıştır.

3.1.1.1 Sonlu Eleman Modelleme Yazılımları

Altair HyperMesh yazılımı, birçok sonlu eleman çözücü yazılımı ile uyumlu çalışabilen, bu çözücülere model hazırlamak için kullanılabilen, güçlü ara yüzüyle kullanıcı dostu bir yazılım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bünyesine hemen hemen tüm CAD formatındaki verileri alabilmekte ve kullanıcıya bu CAD verilerinden sonlu elemanlar ağı oluşturulabilmesi için imkânlar sunmaktadır.

Ayrıca Altair dışındaki başka firmalara ait çözücüler için hazırlanmış model dosyalarını da kendi çözücüsü için dönüştürebilmekte ve çoğu zaman başka bir değişikliğe gerek olmadan bu modeller çözüm için kullanılabilir.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulabilmesi için HyperMesh; 1D, 2D ve 3D tipindeki elemanları, bunların yanında rijit, yani üzerinde herhangi bir deformasyon oluşmayan ve esnek yapıları birbirine bağlamak için kullanılabilen bağlantı eleman tiplerini de kullanmaktadır. (<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperMesh>, 2016)

Kullanıcı, elinde var olan yapıyı modellemek için HyperMesh bünyesindeki çeşitli algoritmaları kullanarak sonlu eleman yapısını oluşturabilmektedir. Ayrıca analiz için gerekli olan sınır koşullarının tanımlanabilmesi de HyperMesh ile mümkündür. Yani kullanıcı, analizini yapacağı yapıyı sıfırdan ele alıp sınır koşullarını da tanımladıktan sonra direkt olarak çözüme başlayabilmektedir.

Altair HyperCrash yazılımı da HyperMesh yazılımı gibi analizden önce tanımlamaları yapabilmek için kullanılan bir ön işlemci (Pre-Processor) yazılımıdır. HyperCrash bünyesindeki komutlar, lineer olmayan ve zamana bağlı eksplisit dinamik analiz tanımlamaları için kullanılmaktadır.

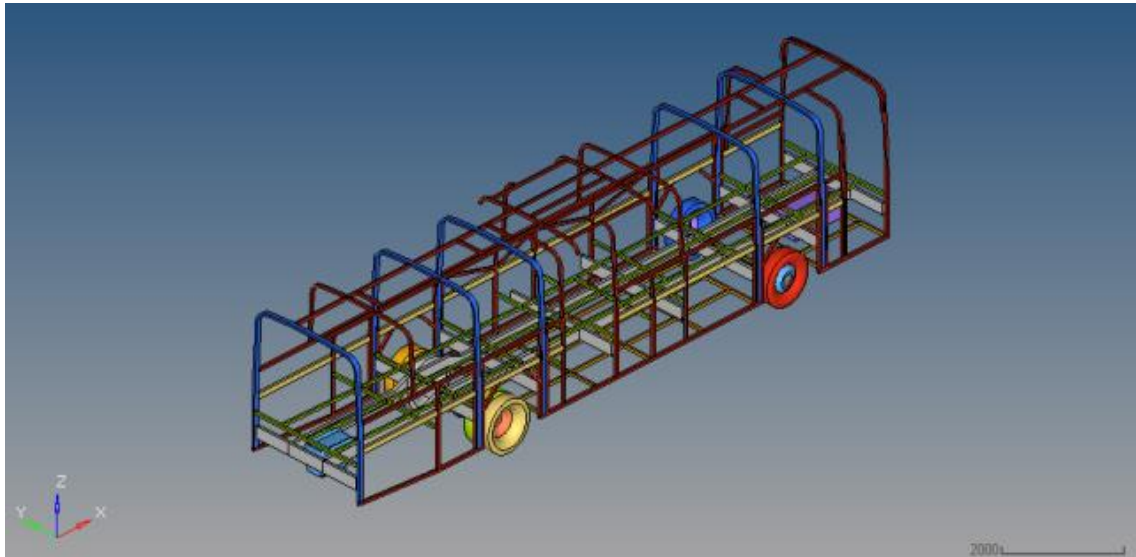
Modelleme için HyperCrash yazılımı genellikle kullanılmamaktadır. Genellikle bir boyutlu basit elemanların modellenmesi veya bu elemanların var olan modele eklenmesi için kullanılabilir. Genel olarak; modellenmesi bitirilmiş sonlu eleman yapısına sınır koşullarının daha hızlı bir şekilde tanımlanması mümkündür. HyperMesh yazılımı

ile modellenen sonlu elemanlar modeli HyperCrash yazılımına alınarak tanımlamalar yapılabilmektedir. (<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperCrash>, 2016)

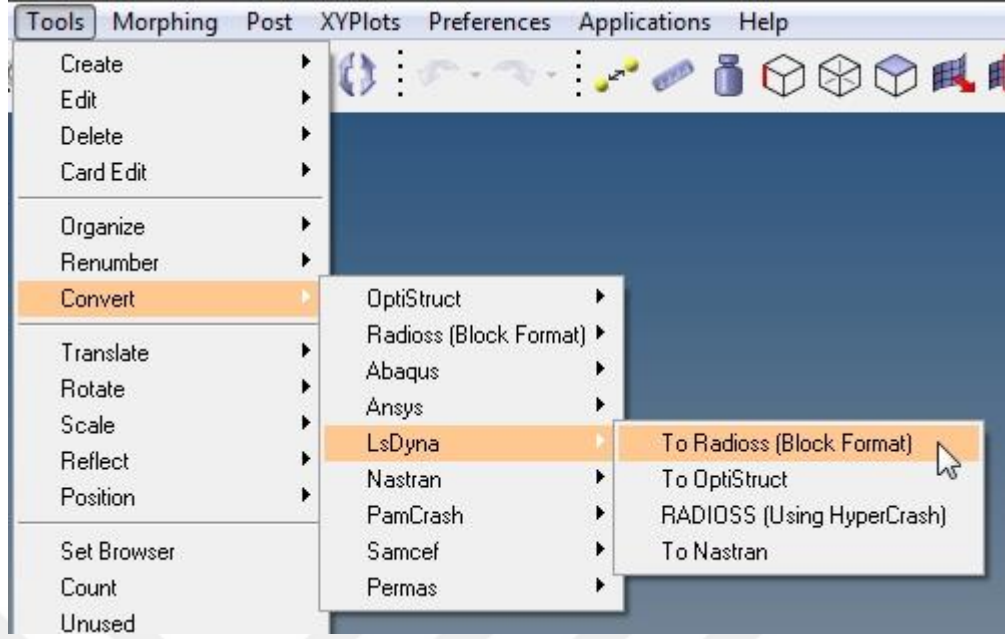
Sonuç olarak; HyperMesh ve HyperCrash yazılımları birlikte kullanılarak, CAD formatındaki bir modelden analize hazır haldeki bir model aşamasına varılabilmektedir.

3.1.2 Otobüs Sonlu Elemanlar Modeli

Yapılan bu tez çalışmasında kullanılmak üzere, George Washington Üniversitesi (National Crash Analysis Center – NCAC) arşivinden edinilmiş ve Ls-Dyna çözücüsü için hazır olan otobüs modeli (<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, 2015), Şekil 3.1’de görüldüğü üzere 12.325 metre uzunluğunda ve iskelet yapısındadır. Modelin Ls-Dyna formatından RADIOSS formatına dönüştürülmesi, HyperMesh yazılımı içerisinde “Convert Ls-Dyna to RADIOSS (Block Format)” komutuyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede otobüs sonlu eleman yapısındaki elemanlar RADIOSS formatına dönüştürülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.1 Otobüs sonlu elemanlar modeli



Şekil 3.2 Ls-Dyna modelinin RADIOSS formatına dönüştürülmesi

Otobüs karkasında 45x45 mm, 50x90 mm ve 50x100 mm ebatlarında profiller yer almaktadır. Yapılacak analizlerde kullanılmak üzere bu profillerin et kalınlıkları, bu alanda üretim yapmakta olan Borusan Mannesmann firmasının üretim kataloglarından (<http://www.borusanmannesmann.com/pdf/kataloglar/genel-urun-katalogu.pdf>, 2016) alınmıştır.

Otobüs iskeletindeki profillerin birbirine olan bağlantıları, bazı bölümlerde düğüm noktalarının öpüştürülmesi yöntemiyle, bazı bölümlerde ise RBODY rijit elemanlarının kullanılmasıyla yapılmıştır. Bu şekilde devrilme analizleri sonucunda otobüs karkası üzerinde oluşacak deformasyon direkt olarak profillerde oluşmaktadır. Profillerin birbirine olan bağlantılarının kopmadığı var sayılmıştır.

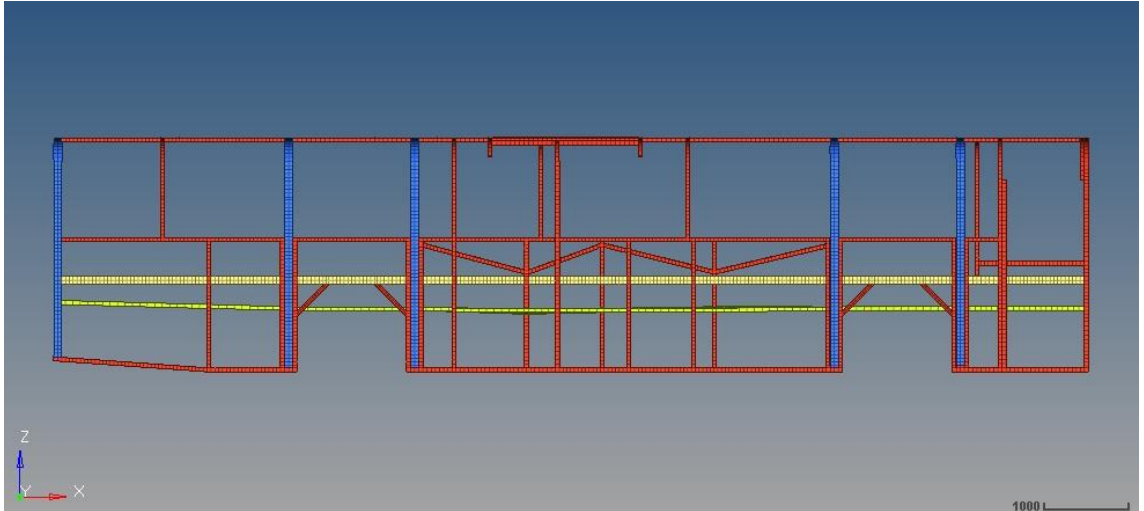
Sonlu eleman yapısında kullanılan eleman boyutları modelin genelinde ortalama 40 mm ile 50 mm arasında değişmekle birlikte motor bloğunu temsil eden yapı haricindeki tüm yapılarda kabuk elemanlar (Shell) kullanılmıştır. Modelin tamamında kullanılan eleman tipleri ve sayıları Çizelge 3.1 içerisinde belirtilmektedir.

Çizelge 3.1 Eleman tipleri ve sayıları

Eleman Tipi	Sayısı
Solid Eleman (HEXA8N)	184
Kabuk Eleman (SHELL4N)	67442
Kabuk Eleman (SHELL3N)	1342
Bir Boyutlu Eleman (RIGID – RBODY)	364
Bir Boyutlu Eleman (SPRING2N)	260
Toplam	69592

Otobüs karkasında profil kalınlıkları boyunca 3 eleman bulunması amacıyla sonlu eleman yapısında güncellemeler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tek eleman kullanımıyla oluşabilecek olası rijitlik engellenmiş ve profil üzerinde oluşabilecek çeki ve bası gerilmelerinin tek elemana indirgenmesinin önüne geçilmiştir. Bu bölgelerde eleman boyutu minimumda 8,86 mm'ye düşmektedir.

Sonlu elemanlar modelinde superstructure olarak isimlendirilen ve devrilme sırasında oluşacak enerjiyi sönmlemesi beklenen komponentler Şekil 3.3'te yer almaktadır.

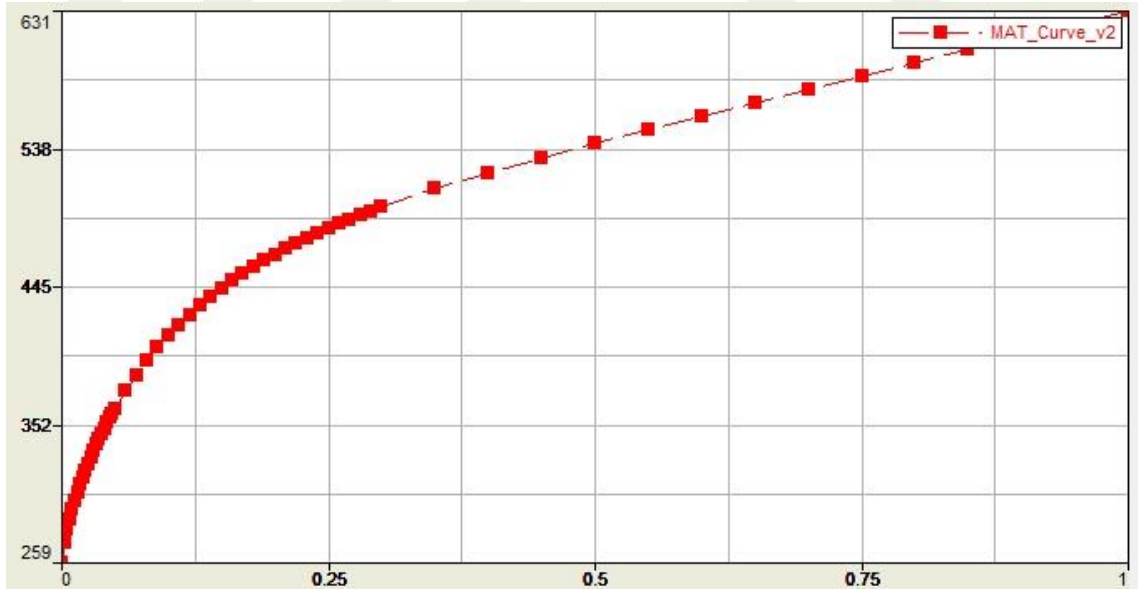


Şekil 3.3 Superstructure yapısı

Otobüs modelinde deforme olacak komponentler için lineer olmayan plastik, deforme olmayacak yani; motor bloğu, şasi, aks, tekerlekler gibi komponentler için ise lineer elastik malzemeler kullanılmıştır. Metalik özelliği bulunan malzemeler için St-37 çelik malzemesi kullanılmıştır. Tekerlekler için ise kauçuk malzemesi kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 St-37 malzeme özelliği (<http://www.matweb.com>, 2016)

Malzeme Özelliği	Değeri	Birimi
Elastisite Modülü	205.00	GPa
Poisson Oranı	0.30	-
Yoğunluk	7.85	g/cc
Akma Gerilmesi	230.00	MPa
Kopma Gerilmesi	415.00	MPa



Şekil 3.4 St-37 malzemesi Stress-Strain eğrisi

Çizelge 3.3 Kauçuk malzeme özelliği (<http://www.matweb.com>, 2016)

Malzeme Özelliği	Değeri	Birimi
Elastisite Modülü	9.60	GPa
Poisson Oranı	0.35	-
Yoğunluk	1.60	g/cc

Otobüs modelinde modelleme aşamaları tamamlandıktan sonra eleman kalite hatalarının dışındaki olası modelleme, bağlantı, eleman tipi hataları veya eksik tanımlamaların görülebilmesi amacıyla HyperMesh yazılımındaki “Model Checker” ara yüzü kullanılmıştır. Bu aşamada herhangi bir hatanın olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan bu kontrolden sonra eleman kalitesinin kontrolü yapılması önerilmektedir.

3.1.3 Sonlu Eleman Kalite Kontrolü

Yapılacak olan devrilme analizlerinde modelde yer alan elemanlardan dolayı oluşabilecek herhangi bir tekillik probleminin önüne geçilmesi adına sonlu eleman kalite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Buna göre HyperMesh içerisinde gerçekleştirilen eleman kalite kontrolünde aşağıda yer alan kriterler kontrol edilmiştir.

- **Min. Length:** Modelde yer alan 2D ve 3D elemanların en kısa kenarı hesaplanır.
- **Max. Length:** Modelde yer alan 2D ve 3D elemanların en uzun kenarı hesaplanır.
- **Aspect:** Modelde yer alan elemanların en uzun kenarı ile en kısa kenarı arasındaki oranı temsil etmektedir.
- **Warpage:** Kabuk tipindeki elemanların düzlemsel olmaktan çıkma durumunun incelendiği komuttur. Genellikle 5°'lik bir sapma kabul edilmektedir.
- **Jacobian:** Elemanların ideal ya da eşkenar bir üçgenden sapma değerini hesaplamaktadır. En ideal eleman için jacobian değeri 1'dir. Bu değer 0'a yaklaştıkça elemanın kalitesi bozulmaktadır.

Bu kriterlere göre yapılan eleman kontrolünde bulunan değerler izelge 3.4’te yer almaktadır.

Çizelge 3.4 Eleman kalite bilgileri

Kriter Adı	Bulunan Değer
Min. Length	8,86 mm
Max. Length	48,60 mm
Aspect	5,36
Warpage	15
Jacobian (Worst)	0,89

Yapılan eleman kontrolünün ardından devrilme analizinin gerçekleştirilmesi adına, ECE-R66 yönetmeliğinde belirtilen şartlara göre otobüs modelinin platforma yerleştirilmesi ve sınır şartlarının tanımlanması için HyperMesh içerisinden “Devrilme Süreç Yöneticisi Ara Yüzü ’ne” (Rollover Process Manager) geçiş yapılmıştır.

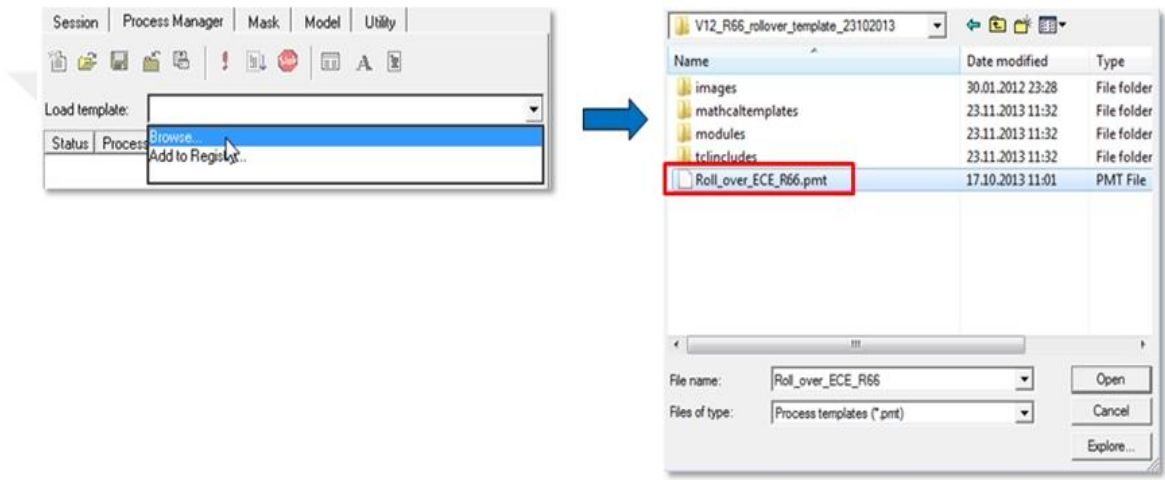
3.1.4 Devrilme Süreç Yöneticisi Ara Yüzü Kullanımı

ECE-R66 yönetmeliğinin bilgisayar ortamında sanal analizler ile gerçekleştirilmesi için; fiziksel test şartlarındaki gibi otobüs modelinin üzerinde duracağı platformun oluşturulması, bu platform ve otobüsün kararsız denge konumuna gelene kadar platformun dönme ekseninde döndürülmesi, yer çekimi kuvvetinin tanımlanması gibi işlemlerin hepsinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin el hesapları yardımıyla sanal ortama aktarılması mümkündür.

Ancak bu işlemlerden kullanıcının kurtulmasını sağlamak maksadıyla, Altair ve İngiltere’den Plaxton firmasının proje ortaklığıyla hazırladıkları ara yüz ile HyperMesh ve TCL dilinde yazılmış olan makroların kullanılmasına izin veren devrilme süreç yöneticisi ara yüzü sayesinde, ECE-R66 yönetmelik koşulları basit bir şekilde modele tanımlanabilmektedir.

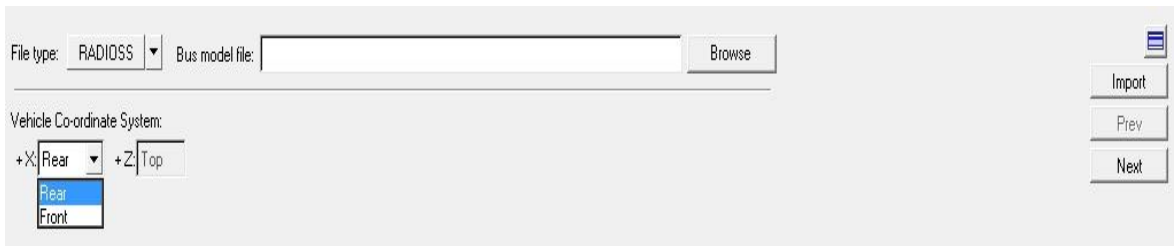
Devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün geliştirilme aşamasında birçok fiziksel test ile karşılaştırması yapılmış ve sonuç olarak bu ara yüzün ECE-R66 yönetmelik şartlarını karşıladığı anlaşılmıştır. (Wood, 2013) HyperMesh içerisinde devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün kullanım aşamaları incelendiğinde;

HyperMesh devrilme süreç yöneticisi ara yüzünden ilgili şablonun *.pmt uzantılı başlangıç dosyası çalıştırılır. Bu dosya çalıştırıldığında ilgili klasörlerde yer alan TCL makroları devreye girerek devrilme süreç yöneticisi ara yüzü açılır.



Şekil 3.5 Devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün açılması

Daha önce sonlu eleman modeli oluşturulmuş otobüs HyperMesh içerisine alınırken aracın referans koordinat sistemi, yani pozitif X ekseninde aracın hangi kısmının olacağı belirlenir.



Şekil 3.6 Aracın içeri alınması ve koordinat sisteminin belirlenmesi

Sonraki aşamada aracın ağırlık bilgisi ve ağırlık merkezi hesaplaması gerçekleştirilir.



CG of Bus model

X: Y: Z: Mass: C of G: Automatic

Determine

Prev

Next

Şekil 3.7 Modelin ağırlığı ve ağırlık merkezinin belirlenmesi

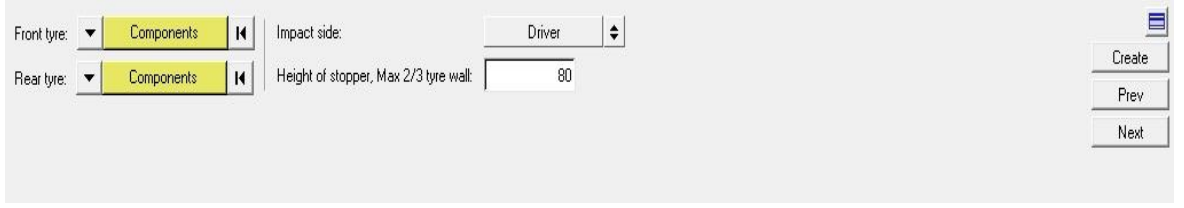
Yaşam hacminin oluşturulması amacıyla bir sonraki aşamaya geçilir. Bu aşamada yaşam hacminin dört adet alt noktasının devrilme yöneticisine tanıtılması gerekir. Bu noktaların koordinatları *.csv uzantılı bir dosyaya yazılarak tanıtma işlemi gerçekleştirilir. Muavin, şoför, sağ arka koltuk, sol arka koltuk bölümlerinde yer alan S_R noktalarının koordinatları Şekil 3.8’de belirtildiği gibi *.csv uzantılı dosyaya yazılır.

```
1 ,Driver Side Outboard,,Co-driver Side Outboard,,
2 ,X,Y,Z,X,Y,Z
3 Driver/Co-driver,-1674.431,-1354.689,2085.038,-1674.431,705.631,2085.038
4 P1,-12105.536,-1352.985,2078.210,-12105.536,704.055,2078.210
```

Şekil 3.8 Yaşam hacmi alt başlangıç (S_R) noktaları

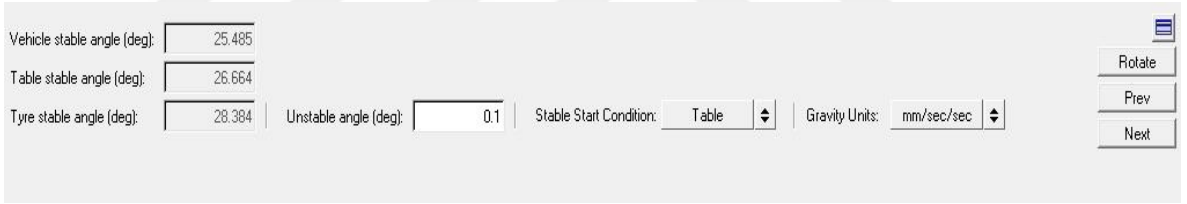
Otobüsün üzerine oturtulacağı platformun oluşturulma aşamasına geçildiğinde aracın ön ve arka tekerleklerinin model üzerinden seçilmesi istenir. Bu şekilde platform ve tekerlekler arasında kontak oluşturulur.

Devrilmenin hangi yöne olacağına da kullanıcı karar verebilir. Şoför veya muavin seçeneklerinden biri seçilerek devrilme yönü belirlenmiş olur.



Şekil 3.9 Platformun oluşturulması ve devrilme yönünün belirlenmesi

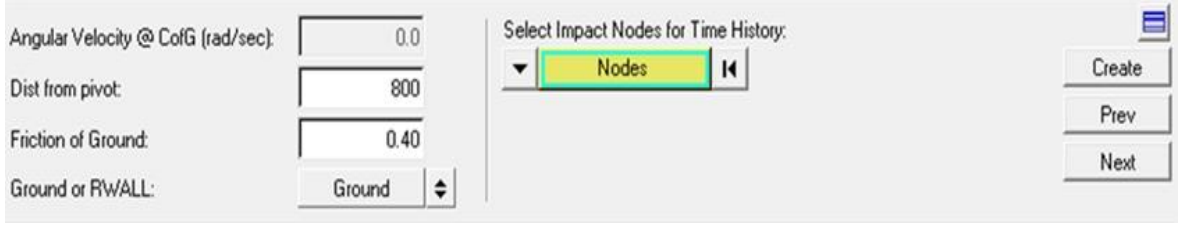
Devrilme yönünün belirlenmesinin ardından platformun kararsız denge konumuna kadar döndürülmesi gerekir. Sıradaki aşamada bu adım gerçekleştirilir. “Vehicle stable angle”, “Table stable angle”, “Tyre stable angle” değerleri, ECE-R66 yönetmeliği şartlarına göre ve aracın ağırlık merkezi göz önüne alınarak program tarafından otomatik olarak hesaplanır. Bunun dışında; “Unstable Angle” değeri kararsız denge konumundaki açığı belirlemek için kullanılır. Yani araç “Stable Angle” + “Unstable Angle” pozisyonunda devrilmeye başlamaktadır.



Şekil 3.10 Platformun kararsız denge konumuna kadar döndürülmesi

Aracın devrilme şartları ve yüzeyinin belirlenmesi için bir sonraki aşamada “Angular Velocity”, “Distance from Pivot” ve “Friction of Ground” parametrelerinin belirlenmesi gereklidir.

Bu parametreler içerisinde “Angular Velocity” değeri program tarafından otomatik olarak hesaplanır. “Distance from Pivot” seçeneği ise platformun yerden yüksekliğini temsil etmektedir. Bu değer ECE-R66 yönetmeliğinde belirtildiği gibi 800 mm olması gereklidir. “Friction of Ground” seçeneği ile de zeminin sürtünme katsayısı belirlenir.



Şekil 3.11 Devrilme şartları ve yüzeyinin belirlenmesi

Devrilme yüzeyinin tipi için “Ground” seçeneğinin seçilmesi durumunda otomatik olarak 10 mm kalınlığında, yoğunluğu 2400 kg/m^3 , elastisite modülü 41.2 GPa ve poisson oranı 0.2 olan, kabuk elemanlardan oluşan bir yüzey oluşturulur. Ancak “RWALL” seçeneği seçilmesi durumunda ise zemini temsilen bir rijit duvar oluşturulur.

Son aşamaya geçildiğinde modelin çözüm için dışarıya gönderilmesi gerekir. Bu aşamanın ardından RADIOSS çözücüsü yardımıyla eksplisit dinamik analiz çözümü gerçekleştirilir.



Şekil 3.12 Modelin çözüm için dışarı gönderilmesi

3.2 Yöntem

3.2.1 Eksplisit Dinamik Analizler

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılması durumunda karşımıza iki yöntem çıkmaktadır. Bunlardan birincisi kararlı hal durumu, yani implisit metottur. Bu metot sonsuz zamanı temsil etmektedir. Analizi gerçekleştirilecek yapıya etkiyen kuvvetlerin zamana bağlı

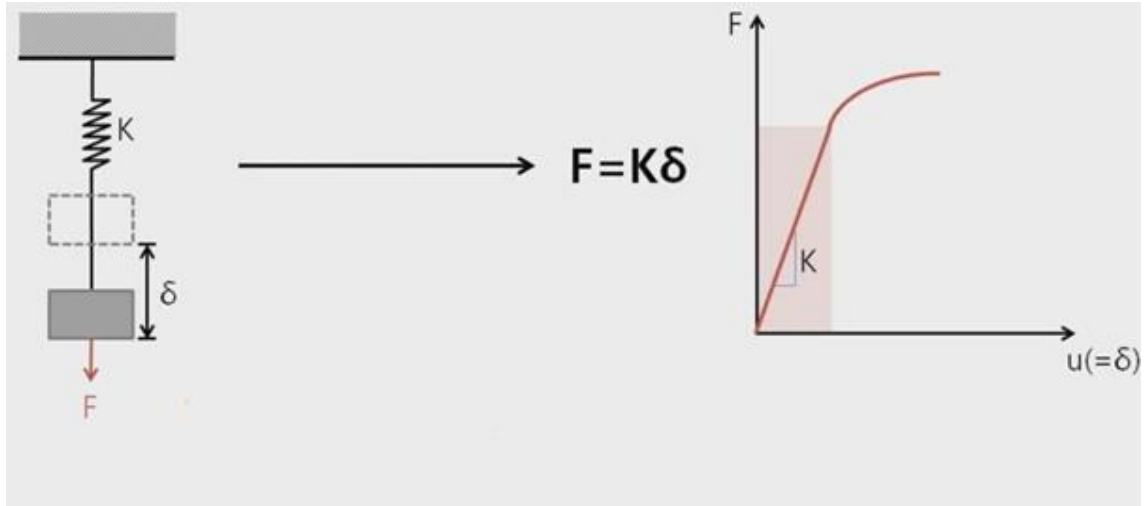
olmaması gerekmektedir. Sonuç olarak ölçülecek deplasman veya gerilme değerleri de zamandan bağımsızdır.

Bir diğer anlatım şekliyle bu tür analizler için; uzun zaman aralığında ufak deformasyon analizleri de denilebilmektedir. Bu yöntemle statik veya yarı-statik analizleri çözülebilmektedir. Statik problemler aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$F = ku \quad (3.1)$$

Bu denklemde " F " dış kuvvetleri, " k " sertliği (Stiffness), " u " ise deplasman miktarını göstermektedir.

Genellikle bu tür problemlerde yapı birinci dereceden kütle-yay sistemine benzeştirilerek çözülmektedir. Sistemin yapacağı deplasman, dışarıdan uygulanan kuvvete ve yapının kendi sertliğine bağlıdır.



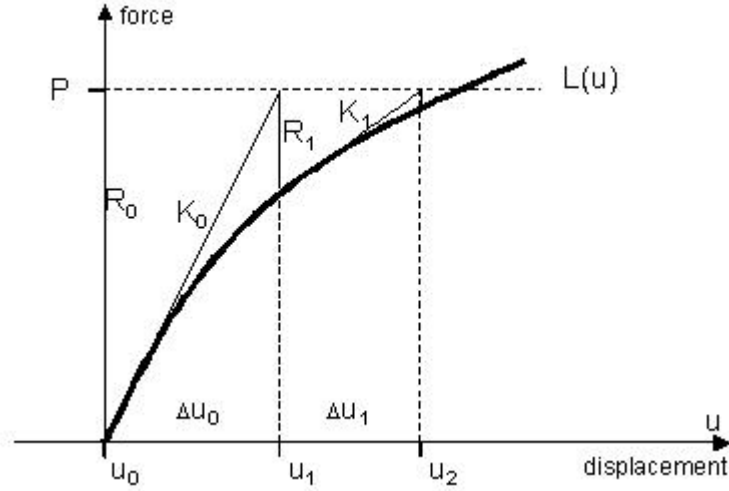
Şekil 3.13 Kütle-yay sistemi ve F-u eğrisi (Altair Help, 2016)

Eğer implisit metot ile lineer olmayan ancak kararlı hal durumundaki bir problem çözülmek isteniyorsa; bu durumda Denklem 3.1 yerine aşağıdaki denklem kullanılmalıdır.

$$P = L(u) \quad (3.2)$$

Bu denklemde ise; " P " global kuvvet vektörünü, " u " deplasman miktarını ve " $L(u)$ " da sistemin lineer olmayan cevabını temsil etmektedir.

Bu durumda sistemin analiz edilebilmesi için; her bir Δu entegrasyon noktalarında sertliğin güncellenmesi gereklidir. Bu durum Şekil 3.14'te belirtilmektedir.



Şekil 3.14 Lineer olmayan sistemin P-u eğrisi (Altair Help, 2016)

Bu durumda çözücü, sistemi her entegrasyon noktasında yeniden ele alarak çözüme ulaşmaktadır. Genellikle implisit çözücüler kullanıcıdan bağımsız olarak lineer olmayan problemleri on parçaya bölerek çözüme ulaşmaya çalışmaktadır. Ancak kullanıcı bu bölüntü sayısını arttırarak daha kesin sonuca ulaşabilmektedir.

İkinci yöntem ise; zamana bağlı dinamik problemlerin çözüldüğü eksplisit yöntemdir. Bu yöntem göreceli olarak kısa zaman diliminde çok büyük deformasyonların gerçekleştiği durumları çözmek için kullanılmaktadır. Örnek verilecek olunursa, çarpışma analizleri, düşürme testleri, patlama simülasyonları gibi problemler eksplisit yöntem ile çözülebilmektedir.

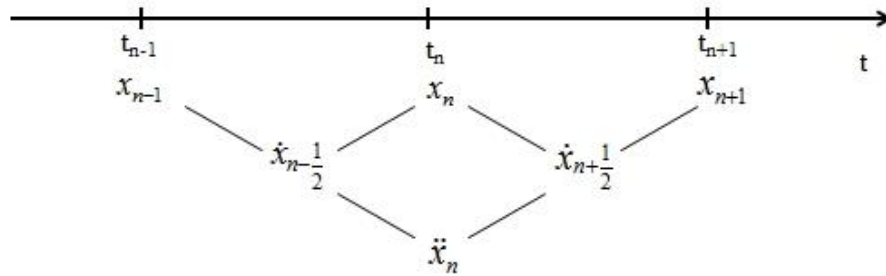
Sisteme etkiyen kuvvet zamana bağlıdır. Bu durumda yapıların sıfırdan farklı ivme değerleri mevcuttur. Sonuç olarak okunacak deplasman veya gerilme değerleri de zamana bağlı olarak değişecektir. Bu durumda; eksplisit yöntemler için zaman entegrasyonu metodu kullanılmaktadır.

Eksplisit metot için aşağıda belirtilen temel denklem kullanılmaktadır.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (3.3)$$

Bu denklemde "[M]" kütle matrisini, "[C]" sönüm matrisini, "[K]" sertlik (Stiffness) matrisini ifade etmektedir. Bunun yanında "{x}" hareket sonucu oluşan ivmeyi, "{x}" hareket sonucu oluşan hızı, "{x}" hareket sonucu oluşan deplasmanı ve "{F(t)}" ise sisteme dışarıdan etkiyen zamana bağlı koşulu temsil etmektedir.

Bu metot için zaman entegrasyon şeması incelendiğinde Şekil 3.15'te belirtildiği gibi zamana bağlı olarak deplasman, hız ve ivmenin konumları yer almaktadır.



Şekil 3.15 Zaman entegrasyon şeması (Altair Help, 2016)

Şemada yer alan ivme, zaman alanında entegre edilirse hız büyüklüğü hesaplanabilir.

$$\dot{x}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{x}_n \Delta t \quad (3.4)$$

Düğüm noktalarındaki yer değiştirme miktarı ise;

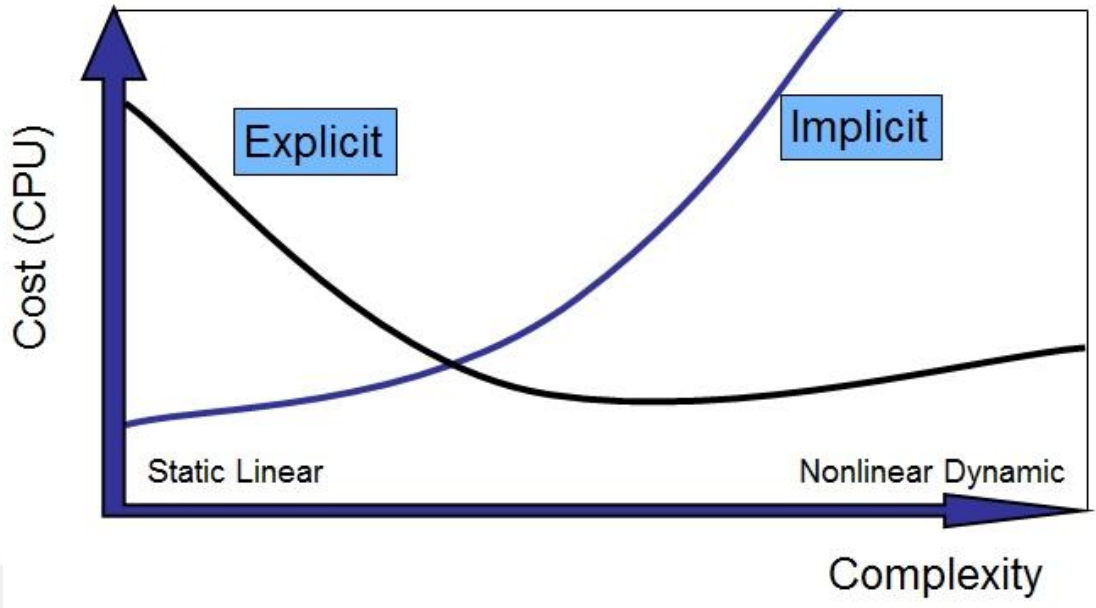
$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (3.5)$$

Denklemleri ile hesaplanabilir.

Hesaplanacak olan değerlerin doğruluğu, zaman artım değeri olan " Δt " değeri ile bire bir alakalıdır. Bu değer küçük alınması doğruluk açısından önemlidir. Ancak bu değer küçük seçilmesi çözüm süresinin artmasına neden olmaktadır. Her bir adım için hesaplama süresi, elemanlar üzerinde oluşan kuvvetlerin hesaplanmasına harcanmaktadır.

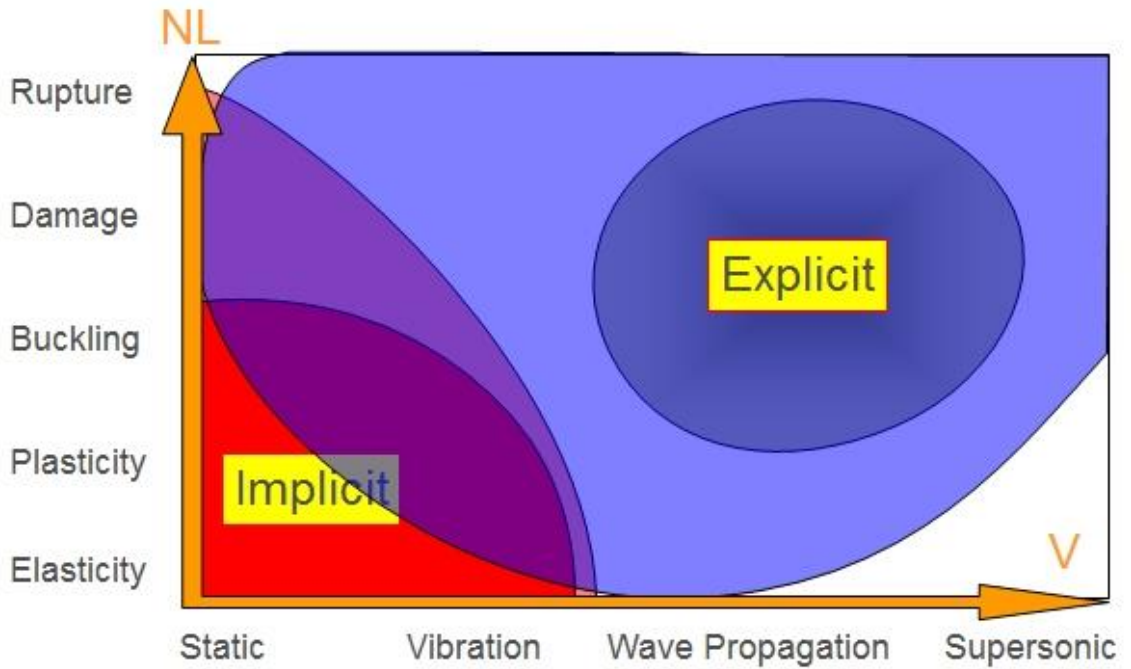
Ancak eksplisit metodu implisit metottan ayıran bir diğer fark ise; bilgisayar kaynağı olarak ihtiyaç duyduğu donanımdır. İmplicit metot kullanılmak istendiğinde bilgisayar kaynağı olarak RAM'e ihtiyaç duyulmaktadır. Eksplisit metot kullanılmak istendiğinde ise bilgisayarın CPU donanımı önemlidir. Eksplisit çözümler çoklu CPU kullanımına olanak sağladıklarından dolayı bilgisayar donanımında fiziksel ve sanal CPU sayısı ne kadar fazla ise, çözüm süresi o kadar azalacaktır.

Bunun dışında eksplisit çözümler yapının ve sınır koşullarının karmaşıklaşmasından implisit çözümler kadar etkilenmemektedir. Bu nedendir ki karmaşık ve dinamik problemlerde eksplisit çözümlerin kullanılması önerilmektedir. Bu durum Şekil 3.16'da belirtilmektedir.



Şekil 3.16 Çözücülerin karşılaştırması (Altair Help, 2016)

İki çözücü arasındaki çözüm kapasiteleri için ise Şekil 3.17 oldukça açıklayıcıdır.



Şekil 3.17 Çözücülerin çözüm kapasiteleri (Altair Help, 2016)

3.2.1.1 Eksplisit Dinamik Analiz Çözücü Yazılımı

Altair RADIOSS yazılımı, zamana bağlı dinamik, yani eksplisit problemlerin çözülmesi için kullanılan bir çözücü yazılımıdır. Yaklaşık olarak 20 yıllık bir geçmişe sahip olan RADIOSS çözücüsü, otomotiv çarpışma, terminal balistik, patlama ve yüksek hızda çarpma gibi simülasyonlarda sektör standardı ve çoğu analiz tipinde de lider konumunda bulunmaktadır.

Ölçeklenebilirlik, kalite ve tekrar edilebilirlik açısından bakıldığında tek CPU veya çoklu CPU farkı olmadan güvenilir sonuçları kullanıcıya sunmaktadır.

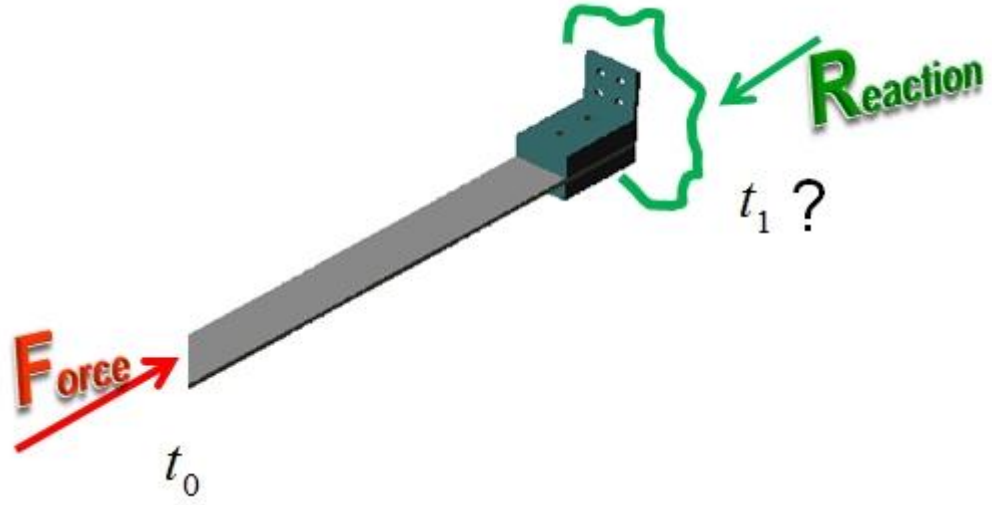
Bünyesinde barındırdığı birçok malzeme ve failure malzeme modeli sayesinde metalik, elastik, visko-elastik, köpük, hidrodinamik, kompozit, CDF, ALE vb. malzeme tiplerinin kullanımına olanak sunmaktadır.

Optimizasyon çalışmalarında da Altair OptiStruct ve Altair HyperStudy programları ile etkileşimli çalışması sayesinde; kullanıcının çözüm yöntemini lineerleştirmeden optimizasyon gerçekleştirebilmesine izin vermektedir.

RADIOSS yazılımı içerisinde çözüm hızını arttırmak için kullanılabilen çözüm komutları sayesinde, doğruluktan uzaklaşmadan analizlerin daha hızlı bir biçimde çözülebilmesi mümkündür. Ayrıca yapılan analizin doğruluğunun kontrol edilmesi aşamasında fiziksel testin yapılmadığı durumlarda da RADIOSS çözüm komutları sayesinde, sonlu elemanlar modelinin birden fazla çözüm ile yine kendisiyle mukayese edilmesi sağlanmaktadır. (<http://www.altairhyperworks.com/product/RADIOSS>, 2016)

3.2.2 Eksplisit Dinamik Analizlerde Zaman Adımı

Eksplisit dinamik analizlerde çözüm süresini belirleyen faktör zaman adımı değeridir. Bu değer, yapıya dışarıdan uygulanan bir etkinin, ölçüleceği noktaya ulaşma süresi olarak basitçe ifade edilebilir.



Şekil 3.18 Basit model üzerinde zaman adımı (Altair Help, 2016)

Belirtilen tanıma göre zaman adımı değeri aşağıdaki denklem ile belirlenebilmektedir.

$$\Delta t = \frac{L}{c} \quad (3.6)$$

Bu denklemde " Δt " kritik zaman adımı değerini, " L " sonlu elemanlar modeli içerisindeki en küçük elemanın kenar uzunluğunu ve " c " malzeme içerisinde sesin yayılma hızını belirtmektedir.

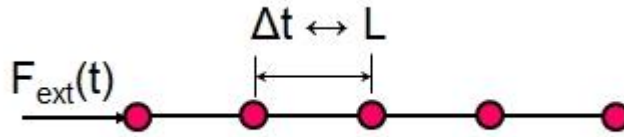
Malzeme içerisinde sesin yayılma hızı ise aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde de " E " malzemenin elastisite modülü, " ρ " ise yoğunluğudur.

Zaman adımı değeri, çözüme başlamadan önce çözücü tarafından model kontrolü esnasında belirlenmekte ve çözüm bu adım değeri ile başlamaktadır. Eğer bir eleman kalite bozukluğu yoksa çözücü tarafından hesaplanan bu adım değeri kritik adım değeridir.

Ancak kullanıcı isterse kendisi de çözüm için bir zaman adımı değeri belirleyebilir. Belirlenecek olan bu adım değerinin, kritik adım değerinden küçük olması gerekmektedir. Çözümün kararlı bir şekilde ilerleyebilmesi için bu şart önemlidir. Aksi takdirde; dışarıdan gelecek olan etki kuvveti, Δt zamanında bir eleman boyu ilerlemek yerine, birden fazla eleman boyu ilerleyebilir. Bu durum da istikrar problemine yol açmaktadır.



Şekil 3.19 Zaman adımı ve eleman boyu ilişkisi (Altair Help, 2016)

Bu bilgilere göre otobüs modelinin zaman adımı değeri hesaplanacak olursa;

Minimum eleman boyutu 8,86 mm ve St-37 malzemesi elastisite modülü 205000 MPa, yoğunluğu: $7,85 \times 10^{-9}$ Ton/mm³ olduğuna göre;

$$c = \sqrt{\frac{205000}{1,73 \times 10^{-9}}} = 10\,885\,637,78 \text{ mm/sn}$$

$$\Delta t = \frac{8,86}{10885637,78} = 8,14 \times 10^{-7} \text{ sn}$$

Olarak bulunmaktadır.

Eksplisit çözümlerde çözüm süresini düşürmek için birçok seçenek bulunmaktadır. Bunlardan biri bilgisayar kaynaklarını kullanarak, çözücünün fiziksel ve sanal CPU'ları kullanmasını sağlamak ve her bir CPU'ya düşen hesap yükünü azaltmaktır. Ancak bazı durumlarda, özellikle zaman adımı değerinin çok düştüğü durumlarda bilgisayar kaynakları da yeterli olmamaktadır. Bu durumda çözücüye, çözüm esnasında adım değerini düşürürken bir sınırlayıcı komut vermek gerekebilmektedir.

3.2.3 Eksplisit Dinamik Analizlerde Kütle Artırımı Yöntemi

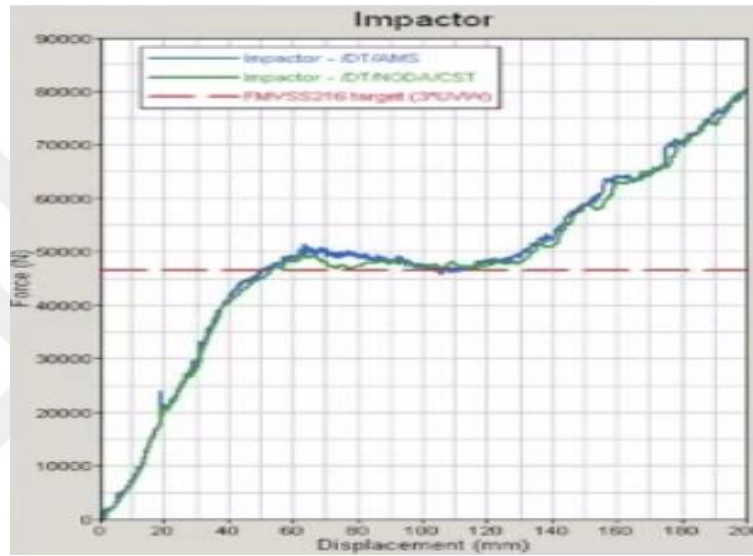
RADIOSS AMS (Advanced Mass Scaling) yöntemi, zaman adımı değerinin çözücü tarafından düşürüldüğü veya zaman adımı yüzünden çözümsüzlük gibi bir problem olduğu durumlarda kullanılan ve çözüm hızını önemli ölçüde arttıran bir komuttur.

AMS komutu, geleneksel düğüm ağırlıklarının artırılması metoduna benzer bir biçimde çalışmaktadır. Ancak ağırlık eklenmesi esnasında sistemin ötelenme momentumunu veya kinetik enerjisini değiştirmedığı için diğer ağırlık ekleme metotlarına göre daha doğru sonuç verebilmektedir. Ayrıca geleneksel metotlara göre çözüm süresini 3 ile 5 kat hızlandırdığı yapılan testlerde kanıtlanmıştır. (Bobineau ve ark., 2013)



Şekil 3.20 Geleneksel kütle ekleme ve AMS metodu kullanılan simülasyon sonucu
(Bobineau ve ark., 2013)

Bobineau ve ark.'nın (2013) geleneksel yöntem ve AMS yöntemi kullanılarak yapılmış oldukları karşılaştırma çalışmasında belirtilmektedir ki, AMS metodunun kullanılması sonuçlar üzerinde bir fark yaratmamaktadır. Şekil 3.20'de görülen aracı ezmek için kullanılan ezici komponent üzerinden okunan reaksiyon kuvvetlerinin, geleneksel yöntem ve AMS yöntemiyle yapılan hesaplamalarda çok benzer oldukları Şekil 3.21'de yer almaktadır. Yapmış oldukları bu karşılaştırma testini 16 CPU bulunan bir Workstation bilgisayarda gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3.21 Geleneksel kütle ekleme yöntemi ve AMS metodu arasındaki reaksiyon kuvveti farkı (Bobineau ve ark., 2013)

Çizelge 3.5 Geleneksel kütle ekleme ve AMS metodu arasındaki çözüm süresi farkı (Bobineau ve ark., 2013)

	DT/NODA/CST	DT/AMS
Timestep Target (μ s)	0,5	10
Number of Cycles	403187	20146
Number of CPU	16	16
Elapsed Time (h)	19,6	4,2
Speed Up		4,66

RADIOSS çözücüsünü ile birlikte analiz süresinin kısılması için AMS yönteminin kullanılması isteniyorsa; kullanılacak zaman adımı değerinin, geleneksel adım değerine göre 10 kat fazla olması tavsiye edilmektedir. Yani geleneksel kütle ekleme yönteminde analizin yakalaması istenilen zaman adımı değerinin 10 katının AMS yönteminde kullanılması ilk aşamada yeterli olacaktır. Kullanılacak olan bu değer ile analiz süresi, nümerik yakınsama durumu ve sonuçların kalitesine bakılarak değerlendirme yapılmalıdır. İncelenen bu kriterlerin herhangi birinde problem olduğu görünüyorsa, zaman adımı değerine 10 kattan daha düşük değerler yazılarak analiz tekrarlanmalıdır. (Altair Help, 2016)

3.2.4 Model Doğrulama Süreci

Normal bir üretim süreciyle paralel ilerleyen simülasyon çalışmalarında, model ve sonuçların doğrulanması temel olarak fiziksel test verilerine dayanmaktadır. Bu durum, üretimin olmadığı veya fiziksel testin gerçekleştirilemediği durumlarda farklılık göstermektedir.

Günümüzde otomotiv sektörü, zaman ve maliyet açısından fiziksel testleri en aza indirgeyerek simülasyon çalışmaları üzerinden üretime odaklanmaya başlamışlardır. Bu şekilde bir üretim mantığı ile fiziksel test olmadan ve sadece simülasyon çalışmaları sonucunda doğmuş olan araç modelleri günümüzde mevcuttur. (http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/RADIOSS_TechPaper.pdf, 2016)

Simülasyon ile doğrulama çalışmaları; kullanıcıya sadece sabit koşullar altında değil, model üzerinde yapılmış olan ufak değişikliklerden sonra da kontrol yapabilme olanağı vermektedir. Fiziksel test koşullarına bakıldığında; her bir değişiklik sonrası prototip üretilmesi ve fiziksel testin gerçekleştirilmesi, zaman alıcı ve maliyetli bir durumdur.

Simülasyon çalışmaları ile yapılan bu doğrulama çalışması aslında; “simülasyon sonuçları için kararlılık analizleri” olarak isimlendirilebilir. Arka arkaya hesaplanmış analiz sonuçları arasında gerek fiziksel yapı burkulmalarından, gerek ise bazı temas veya temassızlık problemlerinden kaynaklanan istikrarsızlıklar olabilmektedir. Bu tür

farklar, yüksek hızlardaki çarpışma için gerçekleştirilen fiziksel testlerde de meydana gelebilmektedir. Bu aşamada RADIOSS'un kararlılık analizlerini gerçekleştirmesi, fiziksel test olmadan da modelde değişiklikler yapılmasına veya olası bazı modelleme hatlarının bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu da; araç modelinin tasarımında optimizasyon ile yapılan ufak değişikliklerin, sonuçlar üzerinde oluşturabileceği ve çözücünden kaynaklanan farkların önüne geçmektedir.

Sonuç olarak, arka arkaya gerçekleştirilen simülasyon sonuçları arasında çözücünden veya modelleme hatalarından kaynaklanabilecek fark olup olmadığı bu yöntemle incelenebilmektedir.

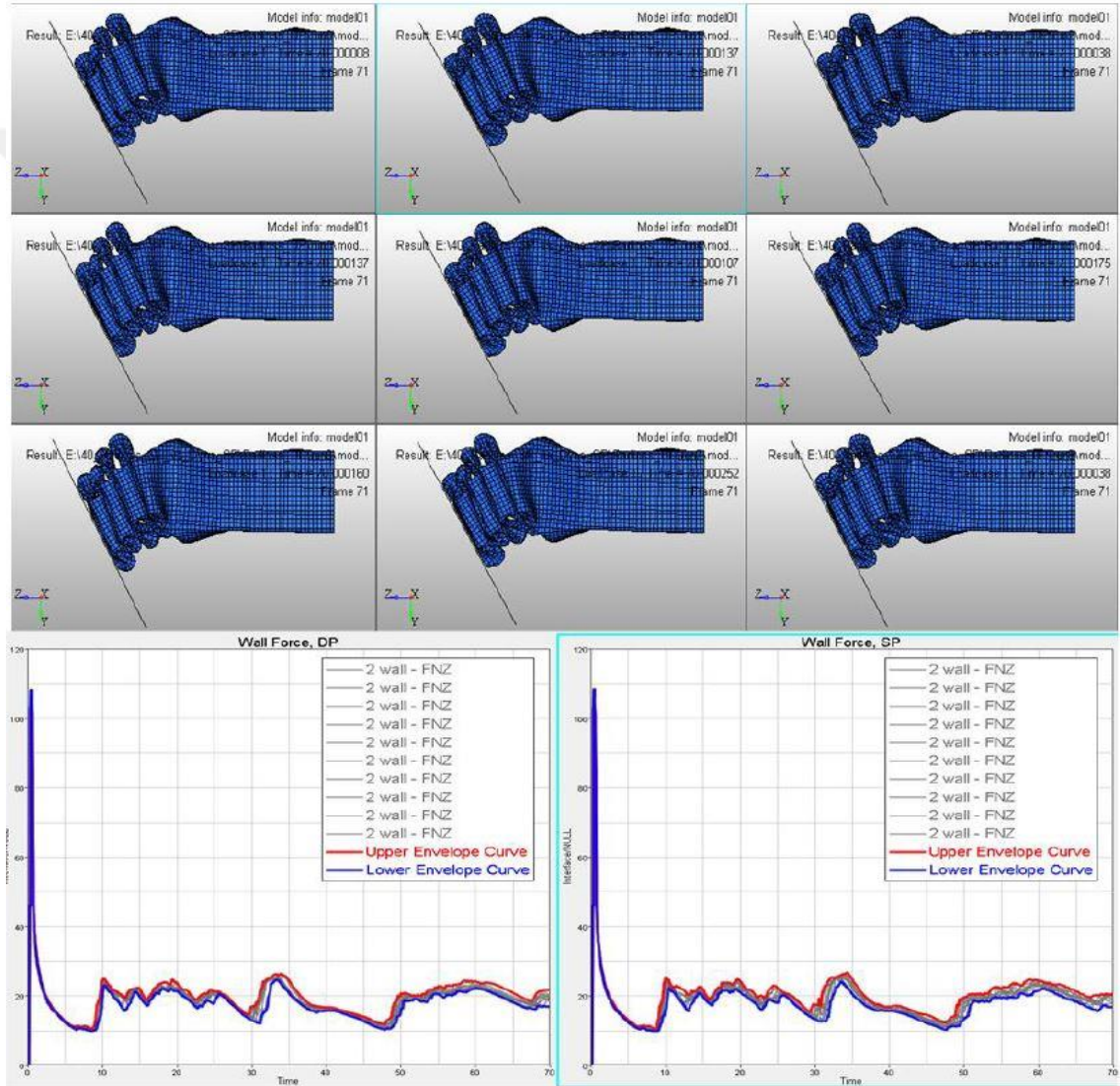
3.2.4.1 Eksplisit Dinamik Analiz Çözücü Yazılımı Kararlılık Analizleri

RADIOSS'un kararlılık analizlerini gerçekleştirebilmesi için model dosyası içerisine "/RANDOM" komutunun tanımlanması gerekmektedir. Bu komut, modelde yer alan elemanların her bir düğümüne veya kullanıcının belirlediği bölgedeki elemanların her bir düğümüne rastgele olacak biçimde "Random Noise" değeri atayarak çözüme başlanmasını sağlamaktadır.

Kullanıcının farklı parametrelerle belirlediği "Random Noise" değerleriyle gerçekleştireceği arka arkaya çözümlerde, bir önceki çözümle karşılaştırma yapması ve aradaki farklara bakması gerekmektedir. Her bir çözümde modelin düğümlerine farklı "Random Noise" değeri atanmış olacağı için sonuçlar arasında farkların oluşması muhtemeldir. Oluşan farklılık oranının yüksek olması durumunda; modelin doğruluğunun olmadığı ve kullanıcının modeli güncellemesi veya hataları belirlemesi gerektiği anlaşılmaktadır.

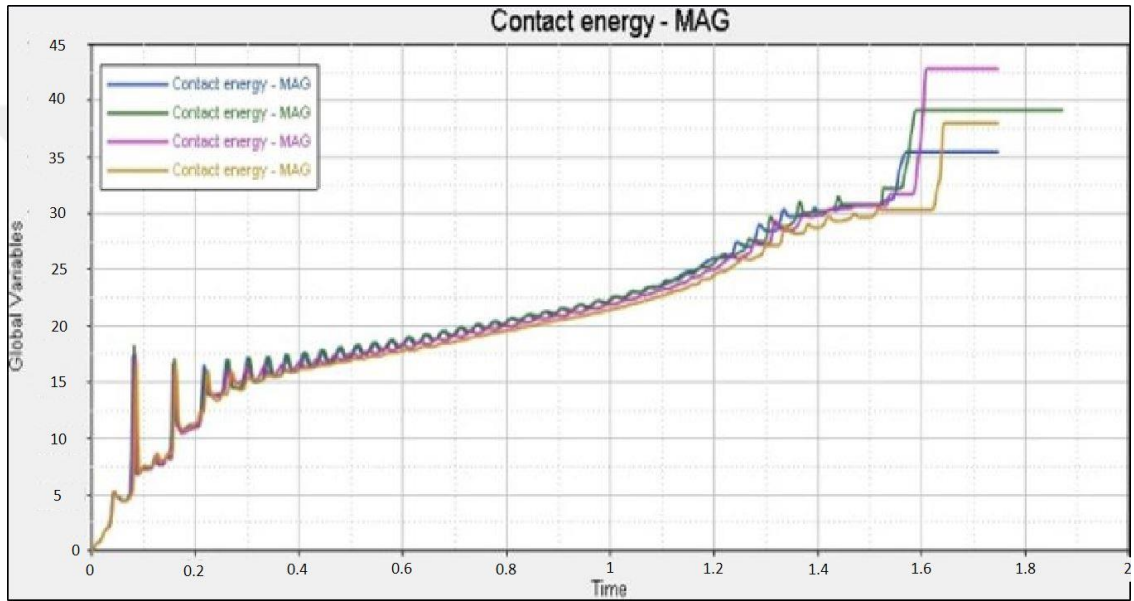
Farkların göz ardı edilebildiği sonuçlar sayesinde ise, sonlu elemanlar modelinde herhangi bir şekilde tanımlama ve modelleme hatası olmadığı anlaşılabilir. Bu sayede de fiziksel bir test olmadan model doğrulaması parametrik olarak gerçekleştirilmiş olacaktır.

Sonuçlar, tek bir komponent üzerinden değerlendirilebileceği gibi, tüm araç modeli üzerinden de yorum yapılabilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde (http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/RADIOSS_TechPaper.pdf, 2016), RANDOM komutu ve çözümleri sayesinde referans modeller oluşturulabilir. Daha sonra yapılacak analizlerde model üzerinde yapılacak kalınlık değişimi, malzeme özelliklerindeki ufak değişiklikler veya yapı topografyasında yapılabilecek ufak optimizasyonlar, kullanıcının tekrardan fiziksel test yapmasını gerektirecek derecede sonuçları değiştirmeyecektir.



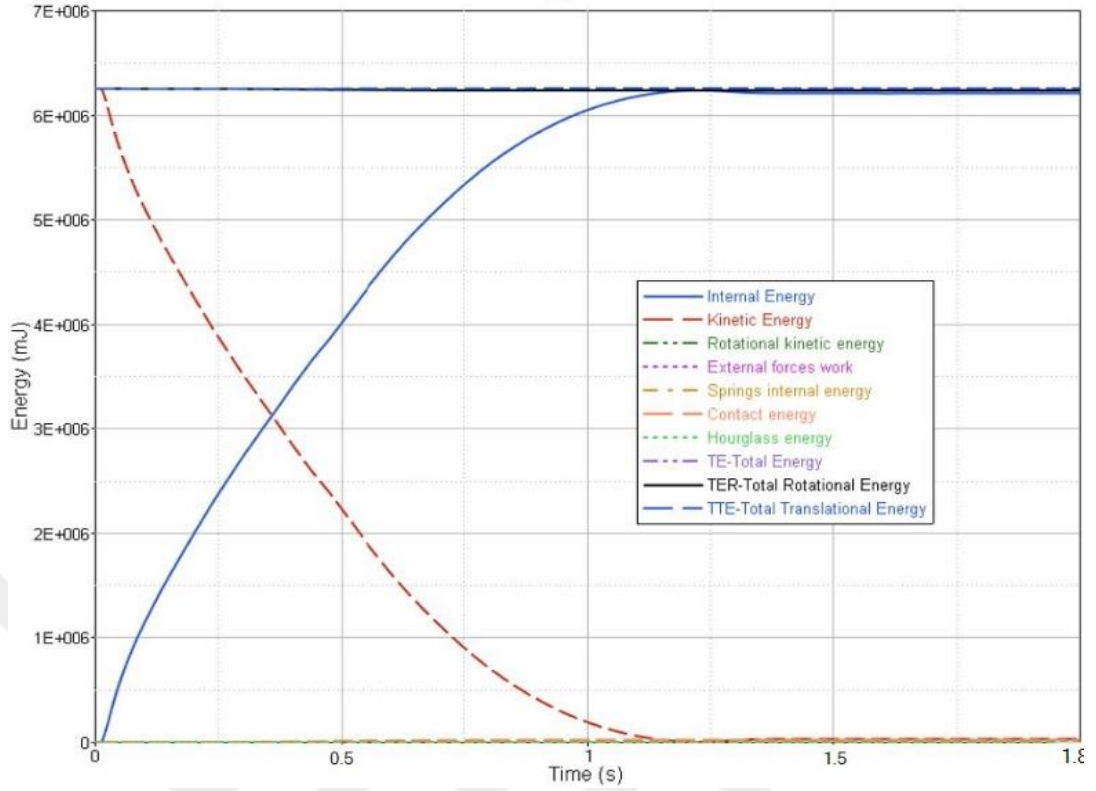
Şekil 3.22 RANDOM komutunun sonuçlar üzerindeki etkisi
(http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/RADIOSS_TechPaper.pdf, 2016)

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen devrilme analizleri için de RANDOM komutu kullanılarak zeminde oluşan kontak enerjisi sonuçları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde deformasyonun gerçekleştiği ilk an ve deformasyonun en yüksek olduğu an arasında oluşan kontak enerjilerinde olağanüstü bir fark gözlemlenmemiştir. Bu şekilde; analizlerde kullanılacak olan referans otobüs modelinde herhangi bir modelleme hatası veya çözücünden kaynaklanan herhangi bir hata olmadığı kanısına varılmıştır.



Şekil 3.23 RANDOM komutunun referans olarak alınan otobüs modeli üzerindeki etkisi

Eksplisit analizler için model ve analiz doğruluğunu kontrol etmenin bir diğer yolu da; analiz süresince enerjinin toplamda sabit kalıp kalmadığının gözlemlenmesidir. Analizin başından itibaren kinetik enerjinin zamanla düşüp iç enerjiye (Strain Energy) dönüşmesi ve kabuk elemanların (Shell) üzerinde oluşan çarpılma (Hourglass) enerjisinin göz ardı edilebilir düzeyde kalması gerekmektedir. Devrilme analizlerinde kullanılacak olan referans otobüs modeli üzerinde yapılan analizler göstermiştir ki; kinetik enerji analiz süresi boyunca düşmekte, iç enerji artmakta ve toplam enerji sabit kalmaktadır. Ayrıca elemanlar üzerinde oluşan çarpılma enerjisi de kabul edilebilir düzeydedir.



Şekil 3.24 Zamana göre enerji değişimi

Yapılmış olan bu çalışmalardan anlaşılmaktadır ki; referans olarak alınacak olan otobüs modeli, yapılacak analizler için uygundur. Referans otobüs modeli üzerinde yer alan profillerin kalınlıklarının değiştirilmesi ve analizlerin tekrardan çözülmesi sonucunda oluşacak sonuçlara güvenilebilir.

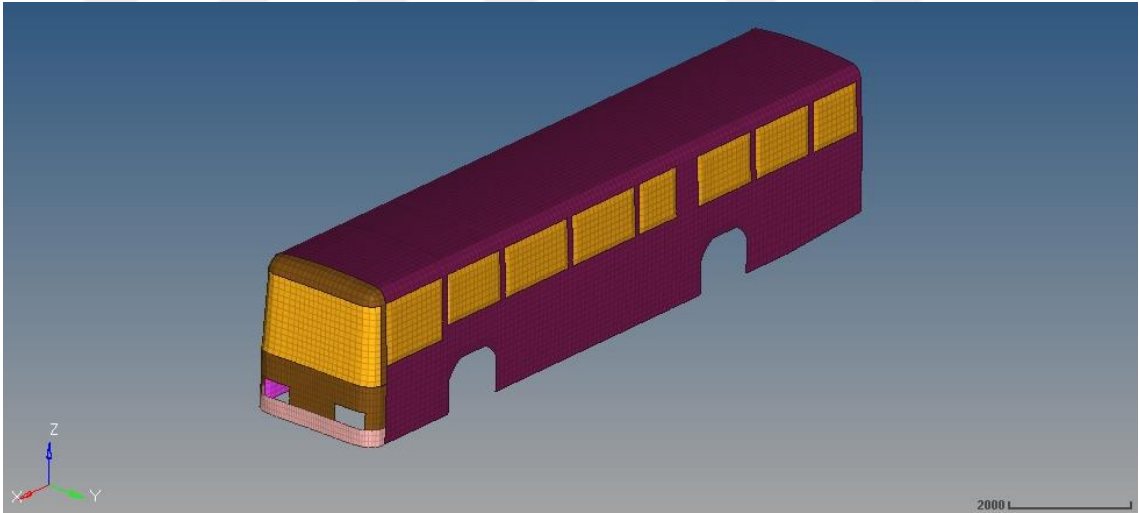
3.2.5 Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Hazırlıkları

Referans olarak ele alınan otobüs modeli devrilme analizlerine tabi tutulmadan önce; gerek RADIOSS çözücüsünün okuyabileceği “Block” formatına dönüştürülmesi, gerek sonlu elemanlar kalite kontrolü, gerek ise ECE-R66 yönetmeliğinde devrilme testleri için belirtilen şartlarda analize hazırlanması aşamalarından geçirilmiştir.

Öncelikle George Washington Üniversitesi (National Crash Analysis Center – NCAC) kaynağından (<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, 2015) alınan otobüs modeli,

başlık 3.1.2’de belirtildiği gibi Ls-Dyna formatından RADIOSS Block formatına dönüştürülmüştür. Dönüşüm işlemi sırasında Ls-Dyna çözücüsünün tanıyabileceği eleman tipleri, RADIOSS çözücüsünün tanıyabileceği eleman tipleri olan ve 2D kabuk (Shell) elemanları için; “SHELL3N” ve “SHELL4N”, 3D solid elemanları için; “HEXA8N” eleman tiplerine dönüştürülmüştür. Ls-Dyna formatında model üzerinde yer alan bir boyutlu rijit elemanlarının tamamı bazı bağlantı problemleri nedeniyle silinerek yeniden tanımlanmıştır. Bağlantı tipi elemanlar için RADIOSS Block formatında “RBODY” ve “SPRING2N” eleman tipleri kullanılmıştır.

Referans olarak alınacak otobüs modeli profillerinin üzerinde yer alan ve otobüsün dış sacını temsil eden kabuk (Shell) tipindeki elemanlar, analiz esnasında modele fazladan sertlik verebileceği ve malzeme yırtılması, kaynak kopması gibi deformasyon tanımlamaları yapabilmek adına fiziksel test verileri olmaması sebebiyle modelden silinmiştir. Bu şekilde yapılacak olan analizlerde sadece; superstructure olarak belirtilen ve devrilme esnasında enerjiyi sönmüleyecek olan profil yapısının kalması sağlanmıştır.

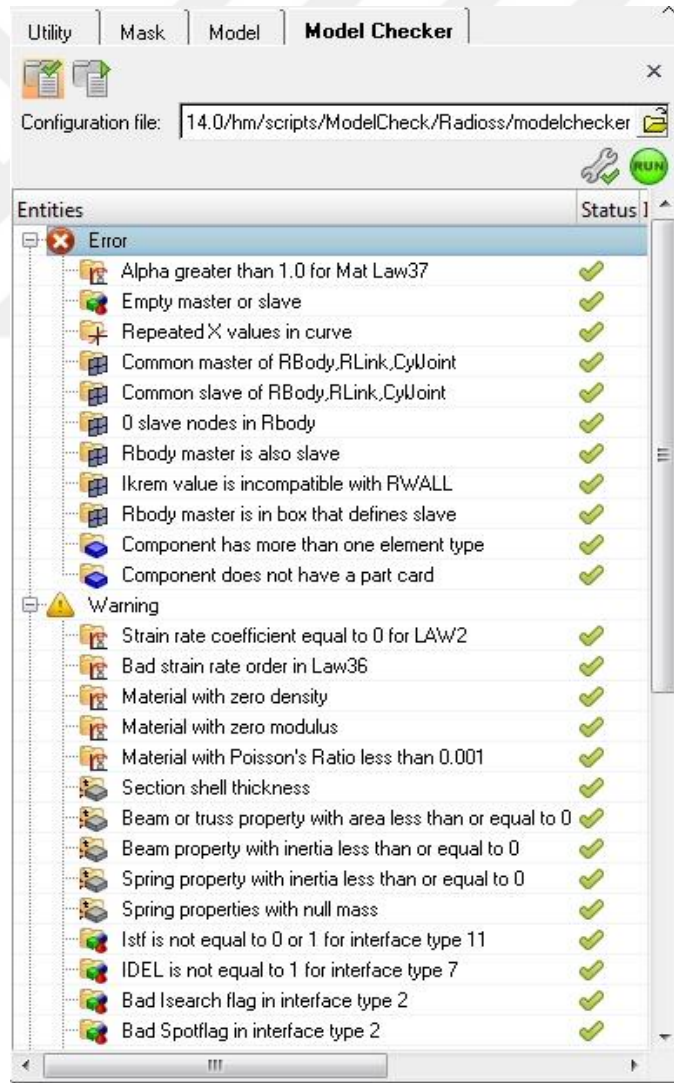


Şekil 3.25 Otobüs modelinden silinen dış sac yapısı

Modelleme aşaması tamamlanan otobüs modeli için gözle ve HyperMesh yazılımı kullanılarak eleman kalite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Başlık 3.1.3’te belirtilen kalite

kriterleri kullanılarak gerçekleştirilen eleman kalite kontrolü sırasında modelde bulunan çift (Duplicate) elemanlar temizlenmiş ve birbirleri ile bağlantı sıkıntısı olan elemanlar HyperMesh yazılımında bulunan “Free Edge” paneli ile bulunarak elemanların düğüm noktaları arasındaki öpüşme problemi ortadan kaldırılmıştır.

Bu işlemlerin ardından devrilme analizi tanımlamalarına geçilmeden önce; başlık 3.1.2’de belirtildiği gibi HyperMesh yazılımı bünyesinde yer alan “Model Checker” arayüzü kullanılarak olası modelleme, bağlantı, eleman tipi hataları veya eksik tanımlamaların olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu kontrol sonucunda Şekil 3.26’da yer aldığı üzere analizi etkileyecek bir hatanın olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.26 HyperMesh Model Checker arayüzü

Yapılan bu modelleme ve kontrol aşamalarının ardından devrilme analizinde yapılacak tanımlamalar için devrilme süreç yöneticisi ara yüzüne (Rollover Process Manager) geçilerek; devrilme platformu oluşturulması, otobüs modelinin kararsız denge konumuna gelinceye kadar döndürülmesi, zeminin tanımlanması ve devrilme platformunun yüksekliğinin ayarlanması gibi işlemler gerçekleştirilmiştir.

3.2.6 Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Tanımlamaları

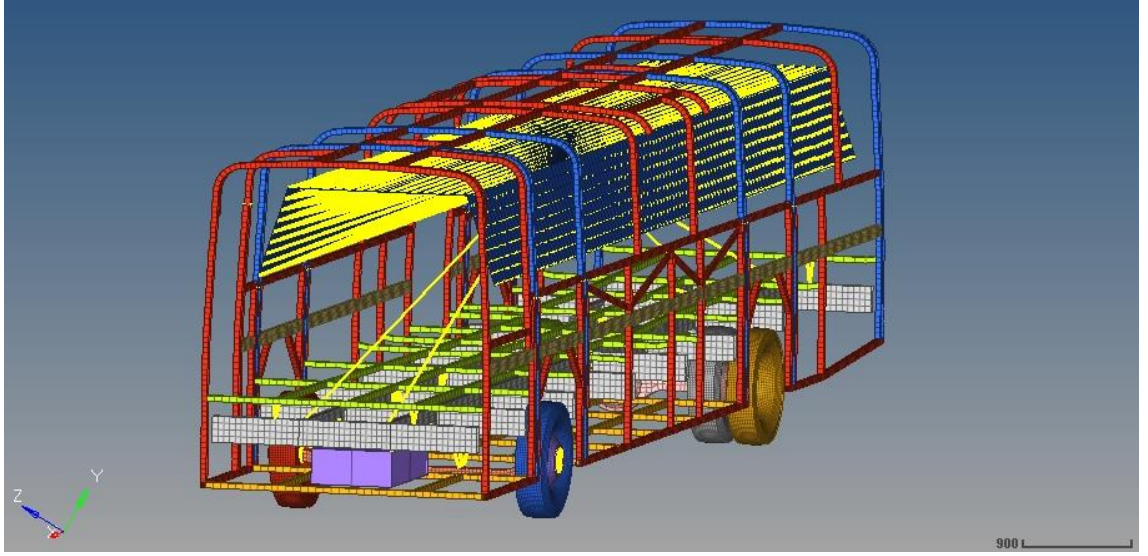
Otobüs modeline uygulanacak olan devrilme analizi tanımlamaları için başlık 3.1.4'te belirtilen adımlar, devrilme süreç yöneticisi ara yüzünde gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle otobüs modelinin, referans olarak kullanılacak koordinat sistemi, yani pozitif X ekseninde hangi yönünün olacağı belirlenmiştir. Bu işlem adımı; sonraki adımlarda belirlenecek olan şoför ve muavin koltuklarındaki S_R noktaları için kullanılmaktadır. Bu aşamada otobüsün ön kısmı, pozitif X ekseninin yönü olarak belirlenmiştir. Bu sayede devrilme, X ekseninde dönme ile gerçekleşecektir.

Bir sonraki aşamaya geçildiğinde otobüsün ağırlık merkezi koordinatları ve ağırlık bilgisi hesaplanarak aracın sahip olduğu referans enerjinin program tarafından analizlerde kullanmak üzere hesaplaması sağlanmıştır.

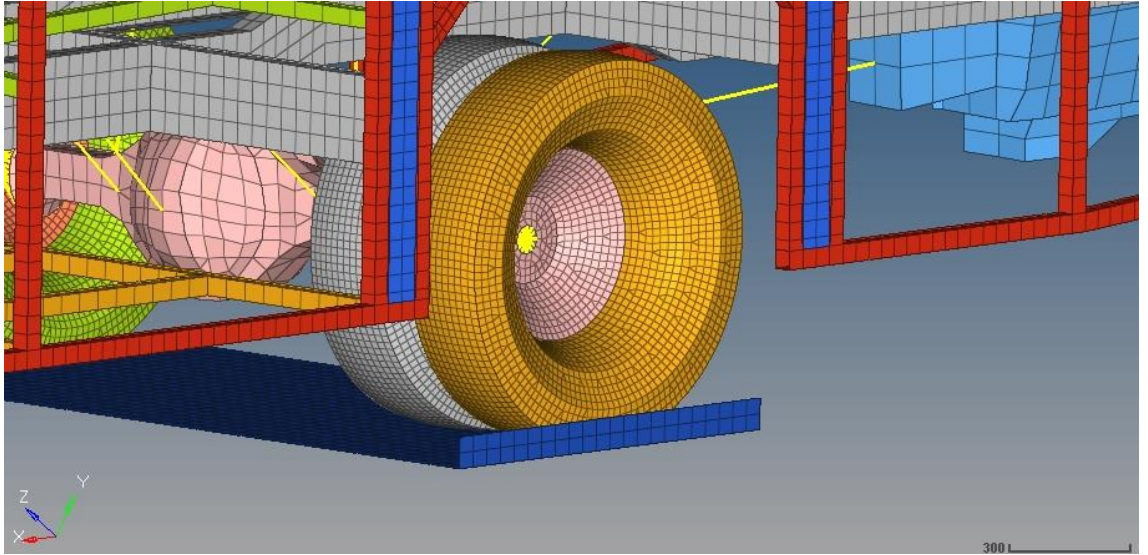
Analiz sonuçlarında görsel açıdan profillerin girişim yapıp yapmadığı incelenecek olan yaşam hacminin modellemesi devrilme süreç yöneticisi ara yüzünün 4. adımında gerçekleştirilmiştir. Hacmin tanımlanabilmesi için şoför, muavin ve arkada yer alan sağ ve sol koltukların S_R noktaları *csv formatındaki dosyaya yazılarak devrilme süreç yöneticisi ara yüzüne tanıtılmıştır.

Hacmin oluşturulması için gereken bu 4 nokta, ECE-R66 yönetmeliğinde belirtilen boyutların oluşturulması için yeterlidir. Bu 4 nokta referans alınarak yaşam hacmi program tarafından oluşturulmuştur. Yaşam hacminin devrilme esnasında deforme olmadan kalabilmesi ve otobüs içerisinde hareket etmemesi için rijit eleman kullanılarak otobüs zemin profillerine bağlanmıştır.



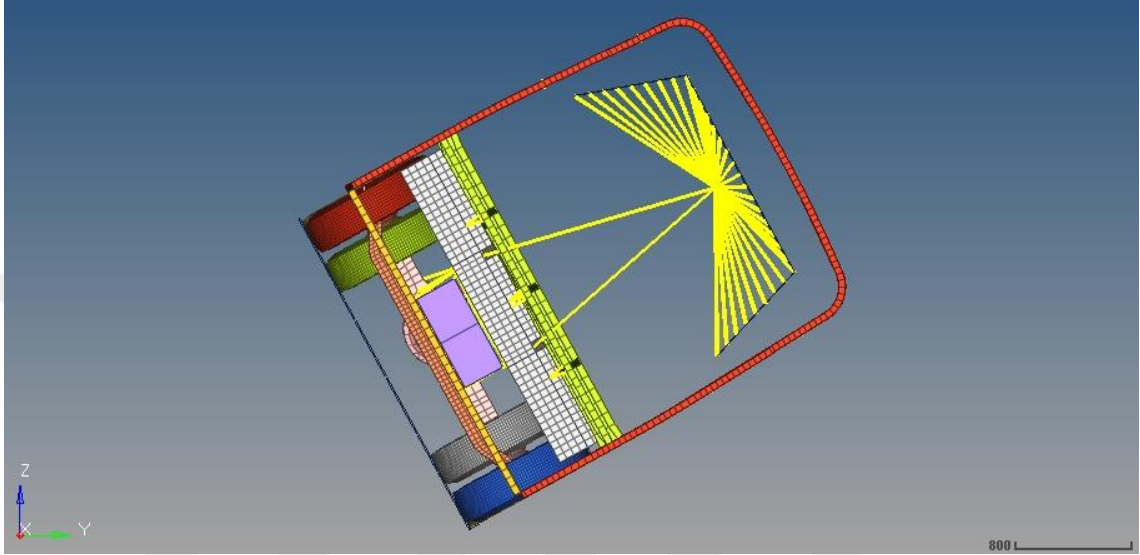
Şekil 3.27 Yaşam hacminin otobüs modeli içerisindeki yerleşimi

Devrilme platformunun oluşturulması ise bir sonraki aşamada gerçekleştirilmiştir. Platform ile temasta olacak olan ön ve arka tekerlekler seçilmiş ve devrilme yönü olarak şoförün olduğu otobüsün sol tarafı belirlenmiştir.



Şekil 3.28 Devrilme platformu arka tekerlek bölümü

Referans modelin devrileceği yönde kararsız denge konumuna kadar döndürülmesi işlemi için devrilme platformunun dönme eksenini temel alınmıştır. Yerçekimi ivmesi de negatif Z eksenini yönünde ve mm/sn^2 birim sisteminde tanımlanmıştır. Şekil 3.29'da modelin döndürülmesi işleminin sonucu ön görünümüyle yer almaktadır.

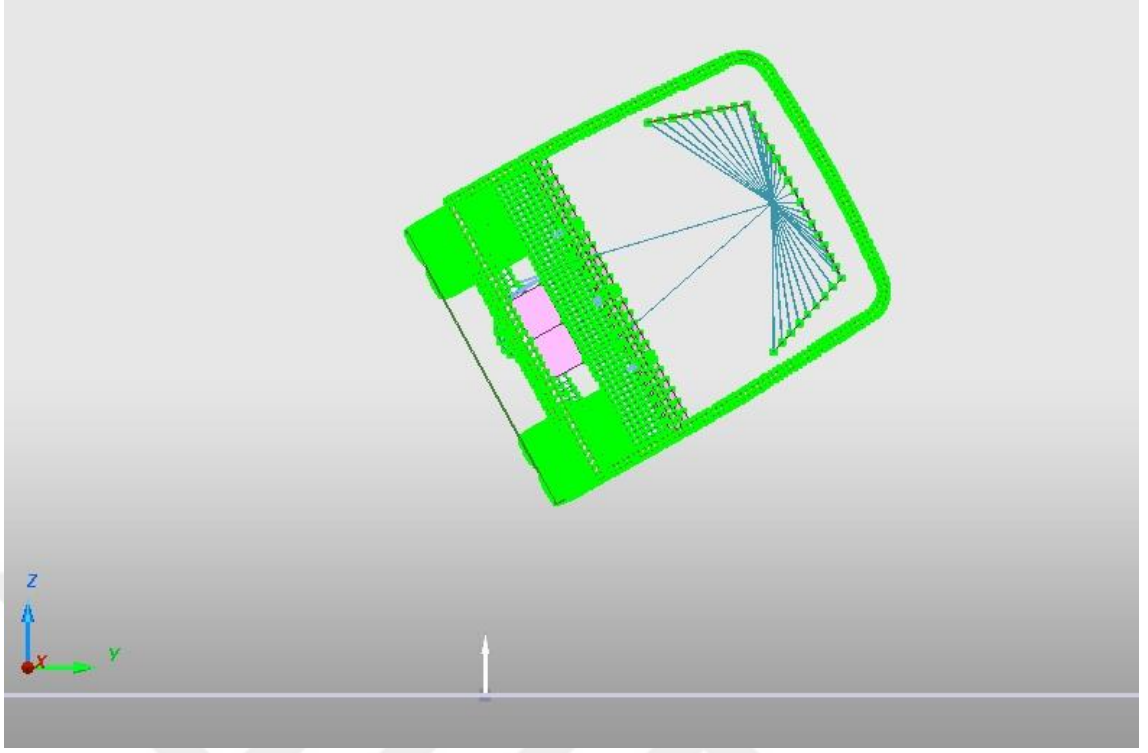


Şekil 3.29 Otobüs modelinin devrilme yönünde döndürülmesinin önden görünümü

Devrilme analizinin gerçekleştirilmesi için gerekli son adım; modelin devrileceği yüzeyin tanımlanması ve ECE-R66 yönetmeliğinde belirtilen platformla arasındaki 800 mm'lik yüksekliğin belirlenmesidir. Bu aşamada devrilme yüzeyinin sürtünme katsayısı da belirlenmektedir. Bu katsayı için metal ve kuru beton zemin arasında alınabilecek 0,4 katsayısı kullanılabilir. Otobüsün devrileceği zeminin belirlenmesinin ardından Şekil 3.30'da modelin son hali yer almaktadır.

Gerçekleştirilecek bu son işlemin ardından otobüs modeli çözüme koyulmak üzere çözüm yapılacak klasör içerisine kaydedilmiştir.

Yapılacak olan analizlerin sayısı, otobüs modelinde yer alan profil kalınlıklarının değişimine göre hesaplanmıştır. Bunun için de profillerin üretim kataloglarında yer alan üretim bilgilerine göre değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 3.30 Otobüs modelinin son halinin HyperCrash içerisinde önden görünümü

3.2.7 Referans Otobüs Modeli Devrilme Analizi Bilgileri

Referans olarak alınan otobüs modelinin devrilme analizleri, yaşam hacminin güvenli olduğu görülene kadar devam ettirilmiştir. Yapılan devrilme analizlerinde otobüs profillerinin enerjiyi sönmlemesi beklenen kısımlarda kalınlıkları artırılarak, yaşam hacmine herhangi bir profil bölgesinin girişim yapıp yapmadığı incelenmiştir. Ayrıca birden fazla yapılan bu çözümlerde otobüs ağırlığının optimum seviyede kalması açısından da çözümler birbirleri ile kıyaslanmıştır.

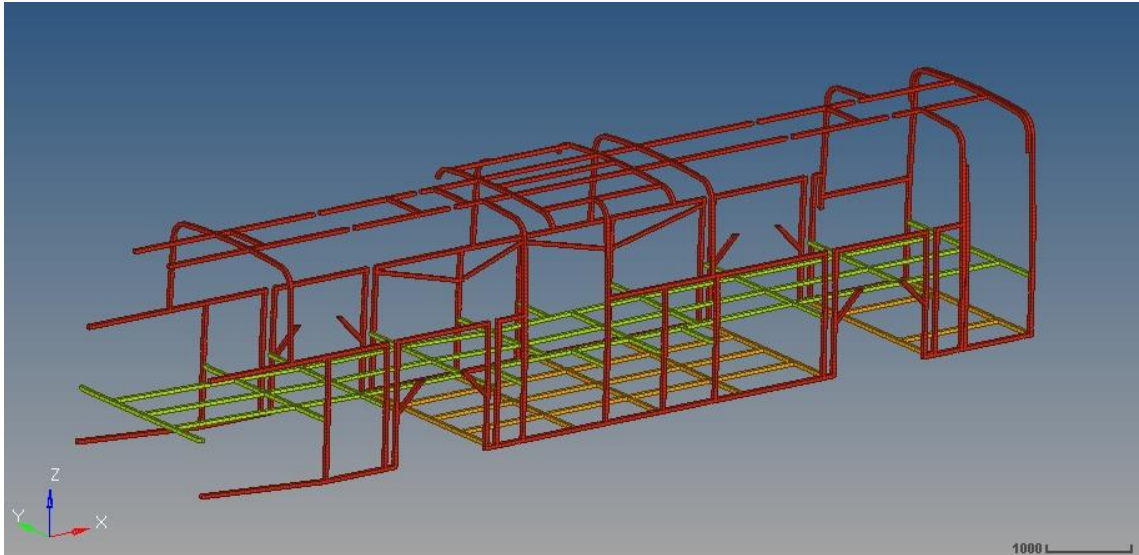
Yapılacak olan analizlerde kullanılacak profil kalınlıkları için; bu alanda üretim yapmakta olan Borusan Mannesmann firmasının profil üretim kataloglarından (<http://www.borusanmannesmann.com/pdf/kataloglar/genel-urun-katalogu.pdf>, 2016) faydalanılmıştır.

Başlık 3.1.2’de belirtildiği gibi otobüs karkasında 45x45 mm, 50x90 mm ve 50x100 mm ebatlarında profiller kullanılmıştır. Bu profillerin üretim kataloglarında yer alan üretilebilir et kalınlığı bilgileri incelendiğinde Çizelge 3.6’daki kalınlık aralıklarına ulaşılabilir.

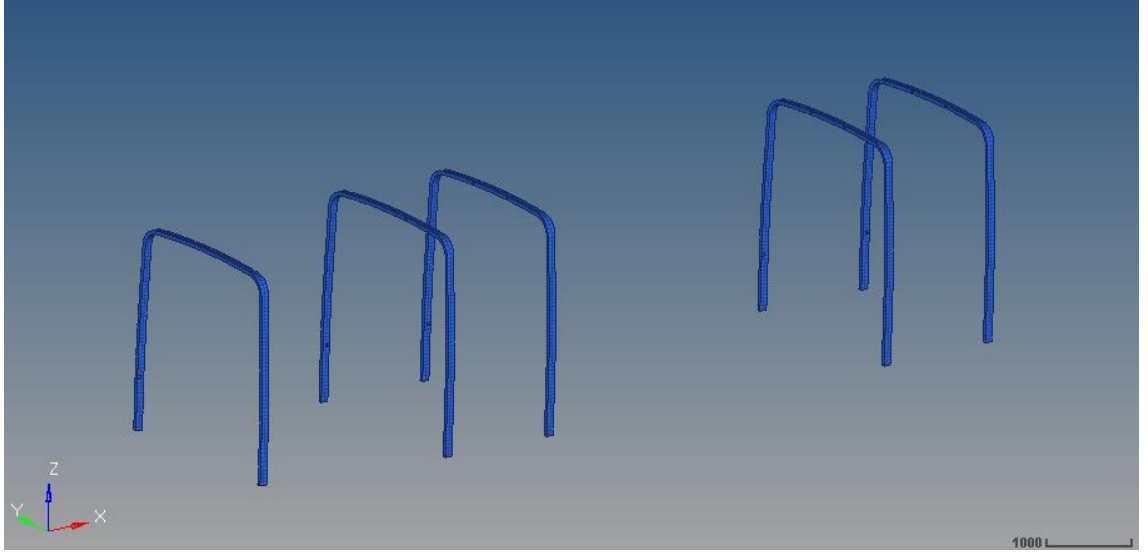
Çizelge 3.6 45x45, 50x90 ve 50x100 mm ebatlarındaki profillerin kalınlık bilgileri
(<http://www.borusanmannesmann.com/pdf/kataloglar/genel-urun-katalogu.pdf>, 2016)

Ebat	Et Kalınlığı (mm)											
	1,5	2,0	2,5	2,6	3,0	3,2	3,5	3,6	4,0	5,0	6,0	
axb (mm)												
45x45	•	•	•		•		•					
50x90		•	•	•	•	•		•	•	•	•	
50x100			•	•	•	•		•	•	•	•	

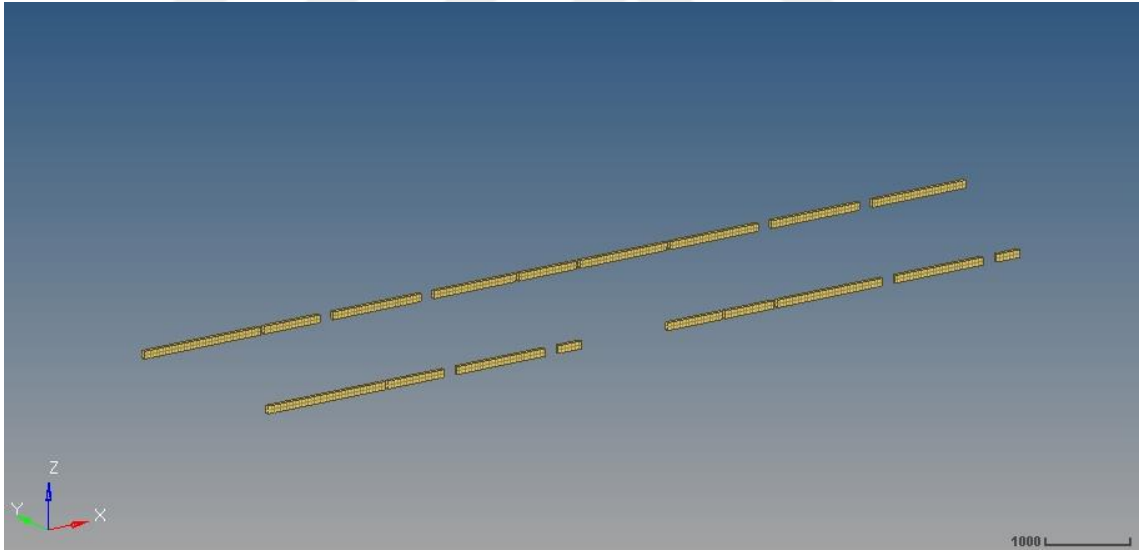
Referans olarak alınan otobüs modeli üzerinde 45x45 mm, 50x90 mm ve 50x100 mm ebatlarındaki profiller Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’te yer almaktadır.



Şekil 3.31 Referans otobüs modeli üzerindeki 45x45 mm ebadındaki profiller



Şekil 3.32 Referans otobüs modeli üzerindeki 50x90 mm ebadındaki profiller



Şekil 3.33 Referans otobüs modeli üzerindeki 50x100 mm ebadındaki profiller

Referans otobüs modeli üzerindeki profillerin ebatlarına göre model içerisindeki dağılımları incelendiğinde; 45x45 mm'lik profillerin model içerisinde çoğunlukta olduğu anlaşılabilmektedir. Yapılacak analizlerde de bu durum dikkate alınmış, daha

çok bu profillerin kalınlık değerleri değiştirilerek sonuçlar arasındaki farklar incelenmiştir. 45x45 mm'lik profiller için; 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm kalınlık değerleri, yapılan analizlerde kullanılmıştır.

50x90 mm ebadındaki profillerin otobüs karkasındaki konumları incelendiğinde; otobüs devrilmesi esnasında devrilme enerjisi sönümünde etkisinin olacağı anlaşılabilmektedir. Bu nedenle 50x90 mm'lik profil kalınlıkları için; 2 mm ve 2,5 mm değerleri kullanılmıştır.

Son olarak 50x100 mm ebadındaki profillerin otobüs karkasındaki konumları incelendiğinde; devrilme esnasında devrilme enerjisinin sönümlenmesine katkısının diğer ebattaki profillere oranla daha az olacağı tahmin edilmektedir. Bu sebeple 50x100 mm boyutlara sahip profillerde en küçük değer olan 2,5 mm kalınlığı kullanılmıştır.

Bu bilgilere dayanarak, referans olarak alınan otobüs modelinin profil kalınlıkları değiştirilerek yapılacak analizler için Çizelge 3.7 incelenebilir.

Çizelge 3.7 Yapılacak olan devrilme analizleri ve profil kalınlıkları

Analiz Sayısı	Karkas Profili (45x45)	Karkas Profili (50x90)	Karkas Profili (50x100)	Taban Profili (45x45)	Bagaj Profili (45x45)	Model Ağırlığı (Ton)
Analiz v1	1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	6,090
Analiz v2	2,0 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,0 mm	2,0 mm	6,218
Analiz v3	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,0 mm	2,0 mm	6,397
Analiz v4	3,0 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,0 mm	6,576

Çizelge 3.7'de belirtilen kalınlık bilgilerine göre gerçekleştirilen analiz sonuçları; "BULULAR VE TARTIşMA" başlığı altında incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

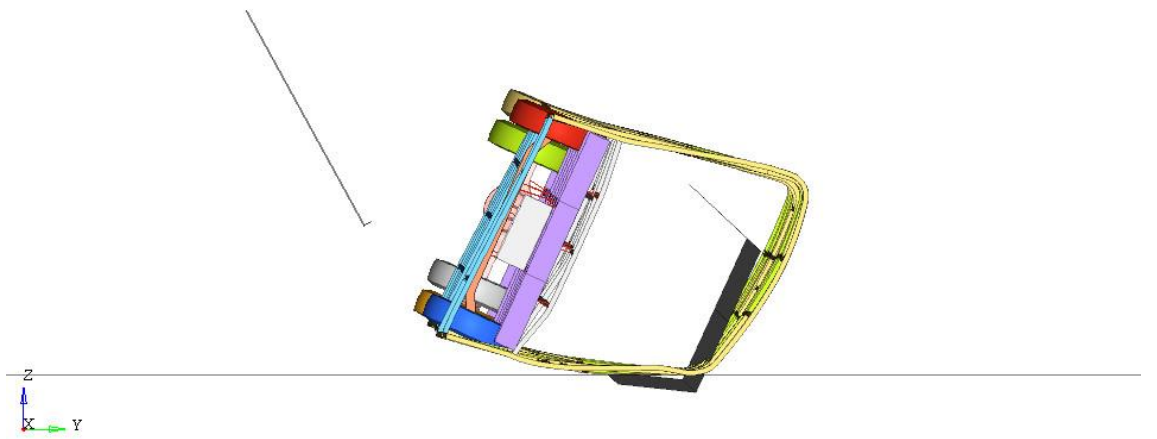
Otobüs modeli için farklı profil kalınlıkları ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları başlıklar halinde aşağıda verilmiştir. Analizler için toplam animasyon süresi 1,80 sn olmakla birlikte, animasyon dosyasının yazdırma sıklığı 0.0025 sn olacak biçimde ayarlanmıştır. Simülasyonlar, i5-3570K (3.40 GHz) işlemcili bir ev tipi bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir analiz toplamda ortalama 2 sa 15 dk sürmüştür.

Analiz sonuçlarında aracın deforme olmuş halinin yaşam hacmine en yakın olduğu an incelenmiş ve gerekli ekran görüntüleri bu anlarda alınmıştır.

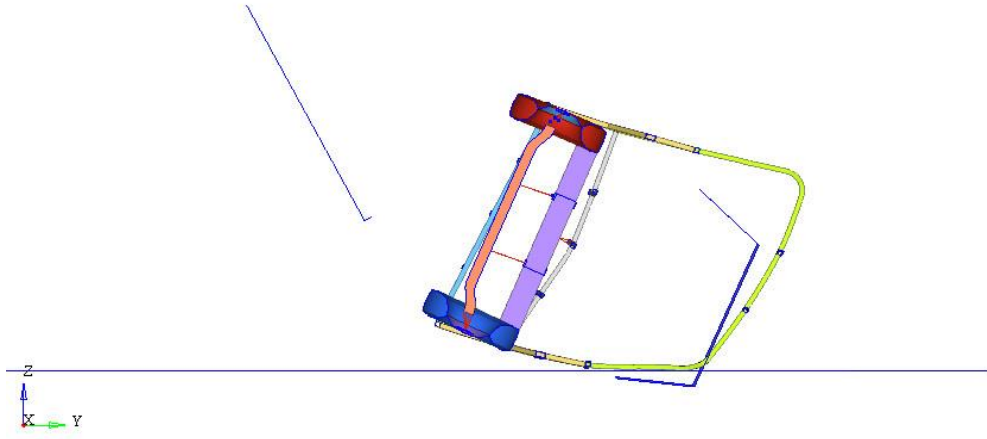
4.1 Birinci Versiyon Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen analizlerin ilkinde, otobüs modelinde yer alan profiller için; 45x45 mm'lik profiller 1,5 mm, 50x90 mm'lik profiller 2 mm, 50x100 mm'lik profiller 2,5 mm kalınlığında modellenmiştir. Bu halde modelin toplam ağırlığı 6090 kg'dır.

Gerçekleştirilen ilk analiz için otobüs modelinin deforme olmuş hali, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de yer almaktadır.

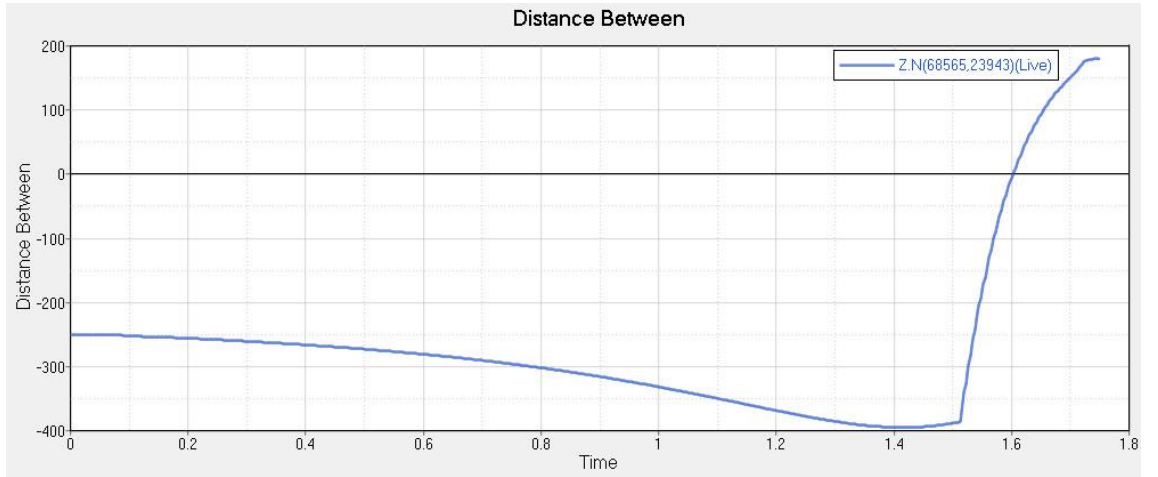


Şekil 4.1 Birinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi



Şekil 4.2 Birinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti

Ekran görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, araç profillerinde kullanılan kalınlıklar, yaşam hacminin korunabilmesi açısından yeterli gelmemektedir. Aracın profilleri ve yaşam hacmi arasındaki mesafenin zamana bağlı değişiminin yer aldığı Şekil 4.3 incelendiğinde, profiller ile yaşam hacminin girişim yaptığı ve bu analiz sonucunun yolcu ve mürettebatı tehdit ettiği değerlendirilebilir. Profiller, analizin 1,6'ncı sn'sinde yaşam hacmi ile girişim göstermektedir.

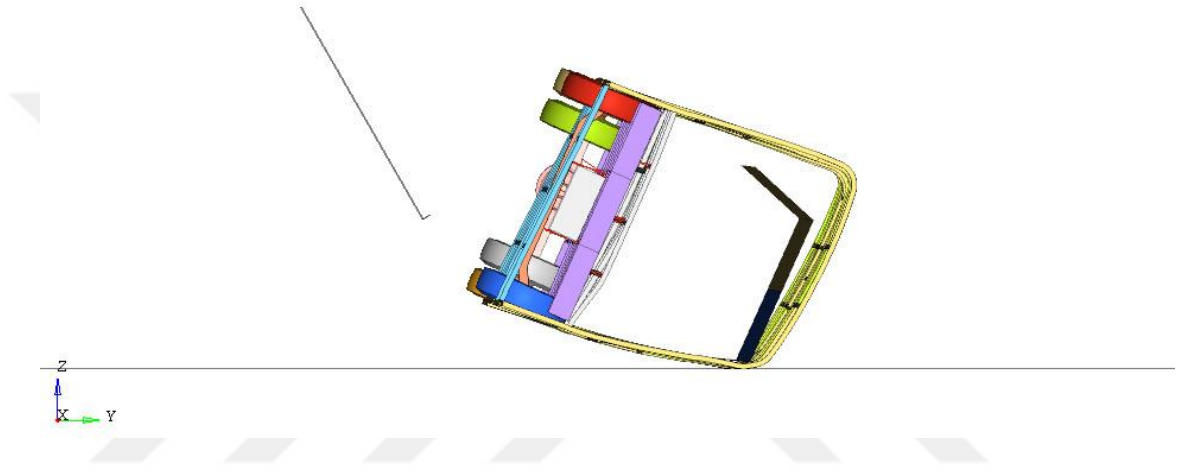


Şekil 4.3 Birinci versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi

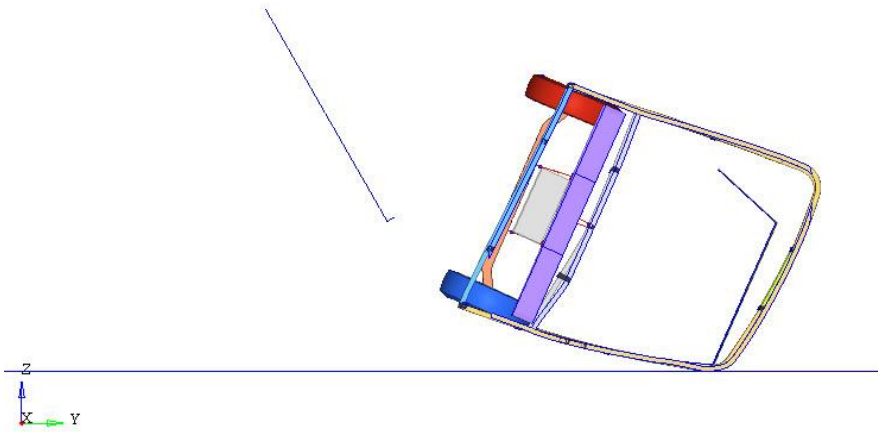
4.2 İkinci Versiyon Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen analizlerin ikincisinde, otobüs modelinde yer alan profiller için; 45x45 mm'lik profiller 2 mm, 50x90 mm'lik profiller 2,5 mm, 50x100 mm'lik profiller 2,5 mm kalınlığında modellenmiştir. Bu halde modelin toplam ağırlığı 6218 kg'dır.

Otobüs gövdesinin deforme olmuş hali Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te yer almaktadır.

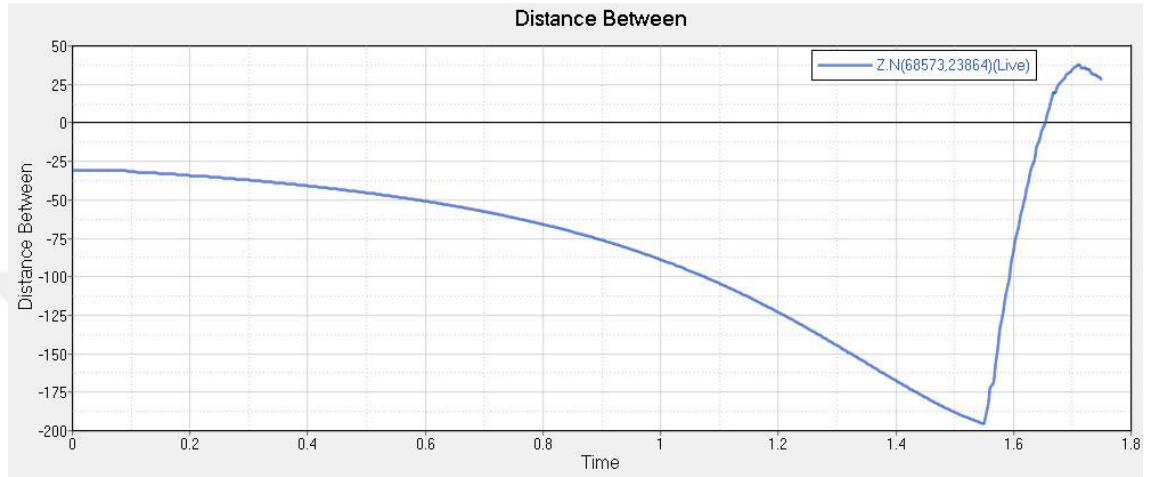


Şekil 4.4 İkinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi



Şekil 4.5 İkinci versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti

Animasyon sonuçlarının yanında Şekil 4.6’da yer alan profiller ve yaşam hacmi arasındaki mesafenin zamana bağlı değişimi incelendiğinde girişim miktarı daha net ortaya çıkmaktadır. Girişimin olduğu; negatifte bulunan mesafe değerlerinin pozitifte dönmesinden anlaşılabilmektedir.



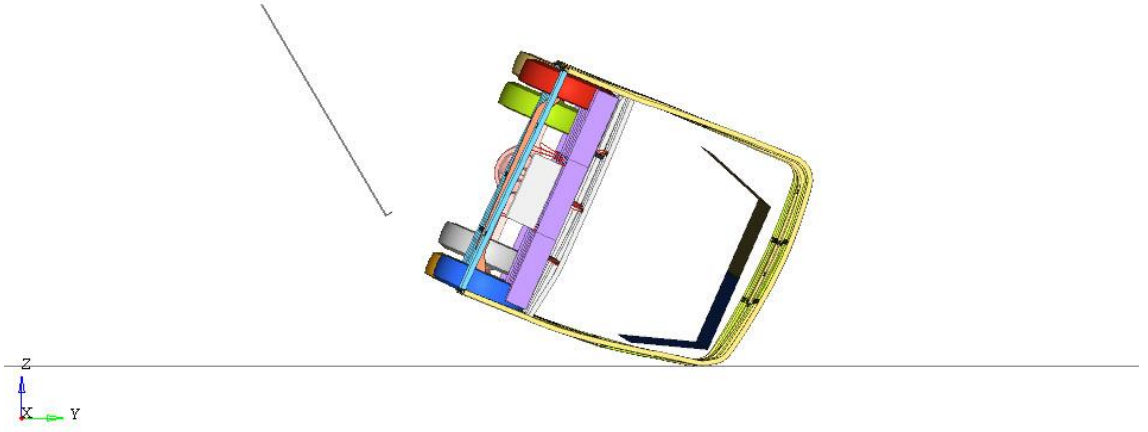
Şekil 4.6 İkinci versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere profillerde kullanılan kalınlık değerleri birinci versiyon analizde olduğu gibi yeterli gelmemektedir. Profillerde oluşan deformasyon miktarı, yolcu ve mürettebatı tehdit eder düzeydedir. Yapılan bu analiz sonucunda da profiller, analizin 1,65’inci sn’sinde yaşam hacmine girişim göstermektedir.

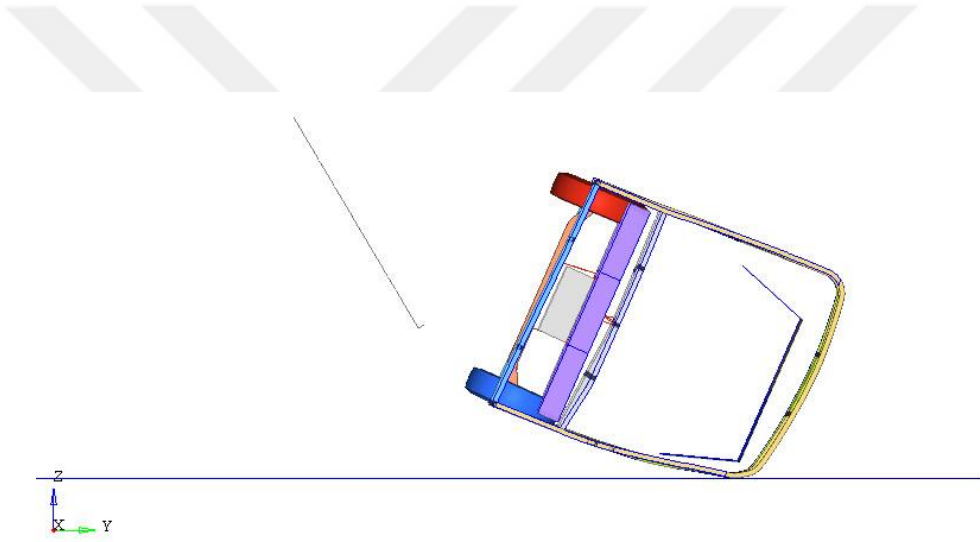
4.3 Üçüncü Versiyon Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen üçüncü analizlerde kullanılan otobüs modelinde yer alan profiller için; 45x45 mm’lik karkas profilleri 2,5 mm, 45x45 mm’lik taban ve bagaj profilleri 2mm, 50x90 mm’lik profiller 2,5 mm, 50x100 mm’lik profiller 2,5 mm kalınlığında modellenmiştir. Bu halde modelin toplam ağırlığı ise 6397 kg’dır.

Analizler sonucunda aracın deforme olmuş hali Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de yer almaktadır.



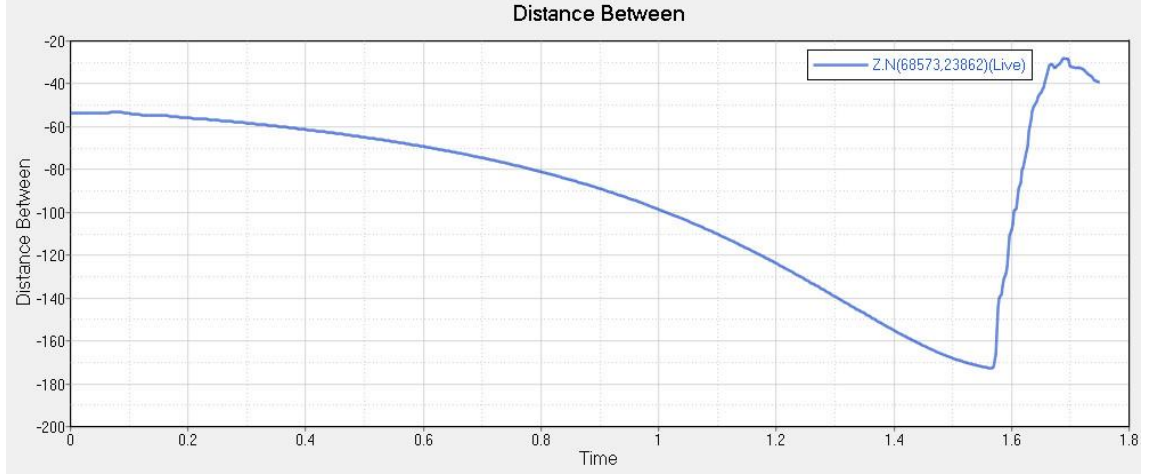
Şekil 4.7 Üçüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi



Şekil 4.8 Üçüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti

Simülasyon sonuçlarından açıkça anlaşılacağı üzere, otobüs profilleri yaşam hacmine herhangi bir şekilde girişim göstermemektedir. Yani profiller üzerinde oluşan deformasyon miktarı yolcu veya mürettebatı tehdit edecek düzeyde değildir.

Ancak bu analiz sonucunda deforme olan profillerin, yaşam hacmine ne kadar yaklaştıkları; profiller ile yaşam hacmi arasındaki mesafenin zamana bağlı ölçümüyle elde edilebilir.



Şekil 4.9 Üçüncü versiyon analiz için profiller ile yaşam hacmi arası mesafenin zamana bağlı değişimi

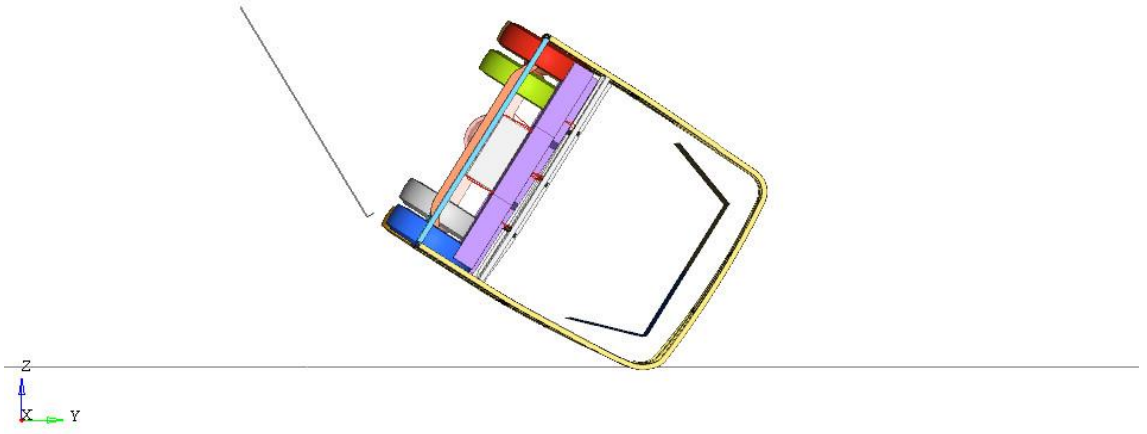
Şekil 4.9'da da yer aldığı üzere; profiller ve yaşam hacmi arasındaki mesafe negatif değerlerde kalmıştır. Animasyon süresince iki yapının birbirine en çok yaklaştığı an, analizin 1,69'uncu sn'sidir. Bu an için iki yapı arasındaki mesafe 29 mm'dir.

4.4 Dördüncü Versiyon Analiz Sonuçları

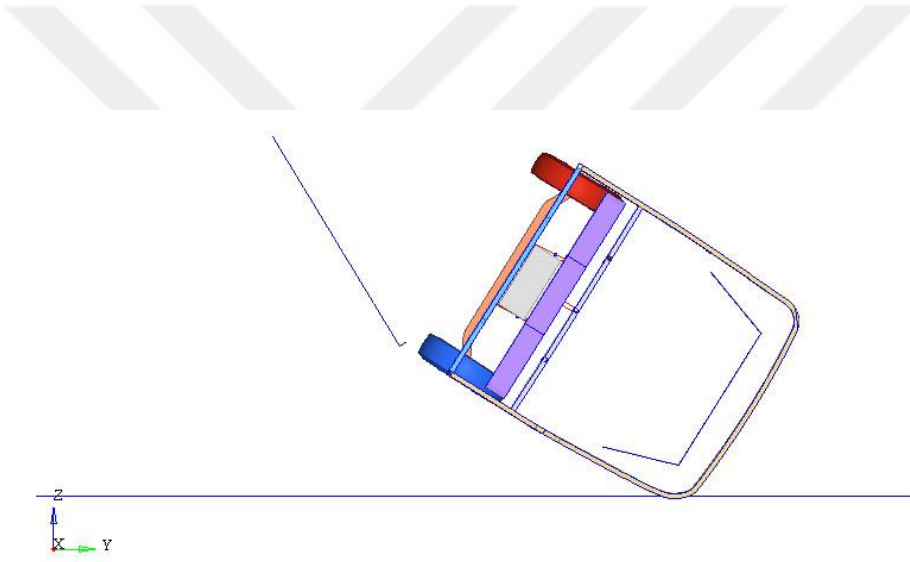
Gerçekleştirilen son analizlerde ise kullanılan otobüs modelinde yer alan profiller için; 45x45 mm'lik karkas profilleri 3 mm, 45x45 mm'lik taban profilleri 2,5 mm, bagaj profilleri 2mm, 50x90 mm'lik profiller 2,5 mm ve 50x100 mm'lik profiller 2,5 mm kalınlığında modellenmiştir. Bu halde modelin toplam ağırlığı 6576 kg'dır.

Araç profillerinin deforme olmuş hali ve yaşam hacmine olan mesafeleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de yer almaktadır. Görseller incelendiğinde, belirtilen profil kalınlıklarında araç gövdesinin oldukça mukavim olduğu söylenebilir. Ancak, üçüncü versiyon analizlerinde kullanılan profil kalınlıklarından daha fazla kalınlık değerinin kullanılması otobüsün ağırlığını % 2,72 oranında artırmıştır.

Otobüs profilleri ve yaşam hacmi arasındaki mesafenin zamana bağlı değişim görselinin verilmesine ise bu durumda gerek duyulmamıştır.



Şekil 4.10 Dördüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi



Şekil 4.11 Dördüncü versiyon analiz için deforme olmuş araç gövdesi kesiti

5. SONUÇ

Fiziksel test yöntemleri birçok durumda zaman alıcı ve maliyetli yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Prototip modellerin üretilmesi, bu modellerin teste tabi tutulması ve olası bir başarısızlık durumunda tüm işlemlerin baştan yapılması gereklidir. Bu durum, otobüs devrilmesi gibi bir test gereksiniminde daha karmaşık bir hal almaktadır.

Fiziksel testler ile sanal simülasyonların karşılaştırılması işlemi genellikle modelin belirli bir bölümünün malzeme ve dayanım testi yapılması ve bu test sonuçları ile doğrulanan sonlu elemanlar modelinden, tüm modelin yer aldığı sonlu elemanlar modeline geçiş yapılması ile gerçekleşmektedir.

Ancak fiziksel testlerin gerçekleştirilemediği durumlarda da, sonlu elemanlar modelinin çözücü vasıtası ile doğrulanma olanağı vardır. Bu şekilde yapılan bir doğrulamanın ardından sonlu elemanlar modeli sonuçlarına, herhangi bir malzeme tanımlaması hatası yoksa çoğu durumda güvenilebilir. Çıkan sonuçlar referans alınarak; sanal ortamda yapılan topolojik veya topografik değişikliklerin sonuçlara olan etkisi incelenebilir. Simülasyon çalışmalarında nihai değerlere ulaşıldığında da oluşan yeni geometri üretilerek, fiziksel test ile simülasyon çalışmasının doğrulaması gerçekleştirilebilir.

Yapılan bu tez çalışmasında, referans olarak ele alınan otobüs sonlu elemanlar modelinin çözücü aşamasında doğrulama çalışması yapılmıştır. Herhangi bir modelleme veya tanımlama hatası bulunmayan otobüs modelinin devrilme analizi, eksplisit dinamik analiz çözüm yöntemi kullanılarak ECE-R66 yönetmeliğinde belirtilen şartları karşılayıp karşılamadığı incelenmiştir.

Gerçekleştirilen dört analizin her birinde, devrilme enerjisini sönmüleyebilecek profil yapılarının kalınlık değerleri değiştirilmiş ve yönetmelik şartlarını sağlayan en hafif yapı bulunmaya çalışılmıştır.

45x45 mm'lik karkas profillerinin 3 mm, 50x90 mm'lik, 50x100 mm'lik profillerin ve 45x45 mm'lik taban profillerinin 2,5 mm, 45x45 mm'lik bagaj profillerinin ise 2mm

kalınlığa sahip olacak biçimde modellendiği dördüncü analiz sonuçlarında; deforme olan profillerin yaşam hacmine girişim yapmadığı ve oldukça mukavim bir davranış gösterdiği görülmüştür.

Ancak, 50x90 mm'lik, 50x100 mm'lik ve 45x45 mm'lik karkas profillerinin 2,5 mm, 45x45 mm'lik taban ve bagaj profillerinin ise 2 mm kalınlıkta alındığı üçüncü analiz sonuçlarında da deforme olan profillerin yaşam hacmine herhangi bir girişimde bulunmadığı ve yaşam hacminin güvende kaldığı anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen bu analizlerde otobüs modelinin tamamının ağırlıkları karşılaştırılırsa; dördüncü analiz için hazırlanan modelin, üçüncü analiz için hazırlanan modelden % 2,72 oranında daha ağır olduğu bilinmektedir. Bu nedenle güvenli otobüs karkas yapısını verebilen profil kalınlık değerleri olarak üçüncü analizlerde kullanılan değerler alınabilir.

Otobüs tasarım sürecinin hızlandırılmasına yönelik gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde; kullanılan analiz metodu ve analiz süreleri göz önüne alındığında, maliyetli ve zaman alıcı test işlemlerine alternatif olarak sonlu elemanlar doğrulama ve analiz yöntemlerinin kullanılabilereği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2015.** <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> (Erişim Tarihi: 27.10.2015)
- Anonim, 2016.** http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/RADIOSS_TechPaper.pdf (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** <http://www.borusanmannesmann.com/pdf/kataloglar/genel-urun-katalogu.pdf> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** <http://www.matweb.com> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair HyperMesh.
<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperMesh> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair HyperCrash.
<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperCrash> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair HyperView.
<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperView> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair HyperGraph.
<http://www.altairhyperworks.com/product/HyperGraph> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair RADIOSS.
<http://www.altairhyperworks.com/product/RADIOSS> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Anonim, 2016.** Altair Help.
<http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw14.0/index.aspx> (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Belsare, V., Pathak, C., Kulkarni, M., 2012.** Rollover Analysis of Passenger Bus as Per AIS 031. Univesity of Pune, India.
- Bobineau, J. P., Maurel, B., Morançay, L., 2013.** AMS and Multi-Domain Method in Radioss. CSMA, France.
- Deshmukh, P. S., 2002.** Rollover and Roof Crush Analysis of Low-Floor Mass Transit Bus. Wichita State University, USA.
- Elitok, K., Güler, M. A., Avcı, F. A., Stelzmann, U., 2013.** Ls-Dyna ile ECE-R66 Yönetmeliği'ne Uygun Otobüs Devrilme Analizi. http://www.fig.es.com.tr/ls-dyna/dokuman/LS-DYNA%20_ile_ECE-R66_Yonetmeligi.pdf (Erişim Tarihi: 29.06.2016)
- Hashemi, R., 2005.** UN-ECE Regulation 66: Strengh of Super-Structure During Rollover. APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety, Prague.
- Iskandar, A. H., Li, Q. M., 2013.** Ageing Effect on Crashworthiness of Bus Rollover. 9th European Ls-Dyna Conference, United Kingdom.
- Kara, C., Yılmaz, A. S., Ayaz, C., 2014.** ECE-R66 Simulation Accreditation Study with Radioss. Altair European Technology Conference, Germany.
- Kumar, D. S., 2012.** Rollover Analysis of Bus Body Structure as Per AIS 031/ECE R66. Altair India Tecnology Conference, India.

Sidhu, M. S., 2012. Rollover of Bus. Altair India Technology Conference, India.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2006. Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of Their Superstructure, Reg. 66-Rev. 1.

*Available: www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs61-80.html?expandable=0

Vincze, S., 1998. European Test Methods for SuperStructures of Buses and Coaches Related to ECE-R66, 98-S4-P-18. AUTOKUT, Hungary.

Wood, L., 2013. Automation of Coach Rollover Simulation. 8th Altair Tecnology Conference, United Kingdom.

Yılmaz, M., 2011. Different Type of Materials and Foam Application on Vehicle Rollover Analysis of Buses. Cukurova University, Adana.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İskender Önder Gümüş
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya, 28.03.1990
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Kurumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 2012
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2016

Çalıştığı Kurum ve Yıl : DTA Mühendislik, 2011 - ...
İletişim (e-posta) : iskender.gumus@dta.com.tr
iondergumus@gmail.com
iondergumus@outlook.com
Yayınları :

Gümüş, İ., Ö., Öztürk, F., 2016. Otobüs Tasarım Süreci Hızlandırılmasına Yönelik Devrilme Simülasyonu. 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.