İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESTETİK, HAFİF VE YENİ NESİL AĞIR HİZMET TİPİ ÇELİK KÖPRÜ OTOKORKULUK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Onur ÖZTEPE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESTETİK, HAFİF VE YENİ NESİL AĞIR HİZMET TİPİ ÇELİK KÖPRÜ OTOKORKULUK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Onur ÖZTEPE
(501141411)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501141411 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Onur ÖZTEPE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ESTETİK, HAFİF VE YENİ NESİL AĞIR HİZMET TİPİ ÇELİK KÖPRÜ OTOKORKULUK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Şenol ATAOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Murat Büyük Sabancı Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 10 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 13 Temmuz 2020

Başta Bu Çalışmanın Yapılabilmesinin Yegâne Kaynağı Olan O Güzel İnsana,
Aileme ve Üzerimde Emeği Olan Tüm Öğretmenlerime,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince değerli görüş ve önerileri ile bana destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali Osman Atahan'a, bana Yüksek Lisans olanağını sunan İstanbul Teknik Üniversitesi Ulaştırma Mühendisliği Birimine ve değerli akademisyen kadrosuna teşekkürü bir borç bilirim.

Beni bu süreçte yalnız bırakmayan ve koşulsuz destek veren anneme, babama, ablama ve tüm aileme, bana bu yolda örnek olan ve desteğini hiç esirgemeyen teyzem, Dr. Öğr. Üyesi Ayten KOÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2020

Mehmet Onur ÖZTEPE
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Otokorkuluk Sistemleri Tanım ve Özellikleri 3
1.3 Çarpışma Test Standartlarının İncelemesi 4
1.3.1 EN 1317-1 (Yol Güvenlik Sistemleri – Bölüm 1) 5
1.3.2 EN 1317-2 (Yol Güvenlik Sistemleri - Bölüm-2) 15
1.4 Literatür Araştırması 23
1.5 Otokorkuluk Sistemi Performans Seviyelerinin Belirlenmesi 25
1.6 Otokorkuluk Sistemi İçin Çarpışma Testlerinin Belirlenmesi 27
1.7 Ağır Hizmet Tipi Otokorkuluk Sistemi Tasarım Bilgileri 27
1.7.1 Normal açıklık tasarım bilgileri 27
1.7.2 Genleşme derzi tasarım bilgileri 38
2. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ **45**
2.1 Kullanılan Ticari Yazılımlar (LS-DYNA, LS-PrePost, SOLIDWORKS) 45
2.2 Otokorkuluk Sisteminin Geometrik Modelinin Oluşturulması 46
2.2.1 Normal açıklıklı otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modelleri 47
2.2.2 Genleşme derzi otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modelleri .. 49
2.3 Otokorkuluk Sistemlerinin Analizinde Sonlu Elemanlar Modeli (FEM/Finite Element Modeling) Kullanımı 51
2.4 Otokorkuluk Sistemi LS-PrePost Sonlu Elemanlar Nümerik Modelinin Oluşturulması 52
2.4.1 Geometrik modelin LS-DYNA yazılımına aktarılması 52
2.4.2 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması 53
2.4.3 Element formülasyonlarının tanımlanması 55
2.4.3.1 Belytschko – Tsay Shell kabuk eleman modeli 55
2.4.4 Malzeme özelliklerinin belirlenmesi 56
2.4.4.1 Yapısal sıcak hadde çelik 56
2.4.5 Sınır-Mesnet koşullarının belirlenmesi 59
2.4.6 Temas kabullerinin belirlenmesi 60
2.4.7 Analiz Seçeneklerinin Belirlenmesi 61
2.5 Taşıtların LS-PrePost Sonlu Elemanlar Nümerik Modeli 62

2.6 Çarpışma Testi İçin LS-DYNA Sonlu Elemanlar Nümerik Modelinin Oluşturulması 63
2.7 Otokorkuluk Sistemi Tasarımının Optimizasyonu 63
2.8 Çarpışma Noktasının Belirlenmesi 64
3. TAM ÖLÇEKLİ ÇARPIŞMA TEST SİMÜLASYONU SONUÇLARI 67
3.1 Normal Açıklıklı Otokorkuluk Tasarımı TB81 Çarpışma Testi Simülasyonu. 67
3.2 Normal Açıklıklı Otokorkuluk Tasarımı TB11 Çarpışma Testi Simülasyonu. 72
3.3 Genleşme Derzi Otokorkuluk Tasarımı TB81 Çarpışma Testi Simülasyonu .. 77
3.4 Otokorkuluk sisteminin ASI ve THIV indeksinin Hesaplanması 82
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 87
4.1 Sonuç 87
4.2 Öneriler 91
KAYNAKLAR 93
ÖZGEÇMİŞ 95

KISALTMALAR

AASHTO : American Association of State Highway Transportation Officals

ASI : Hayatta Kalma İndeksi (Accident Severity Index)

CE : Conformite European (Avrupaya Uygunluk)

FEM : Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Modeling)

FEA : Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analaysis)

HGV : Ağır Yük Taşıtları

IGES : Initial Graphics Exchange Specifications

THIV : Teorik Kafa Darbe Hızı (Theoretical Head Impact Velocity)

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

TS EN 1317 : Yol güvenliği sistemleri

TS EN 1317-1: Terminoloji ve Deney Yöntemleri İçin Genel Kriterler

TS EN 1317-2: Taşıt Parapetleri Dâhil Güvenlik Bariyerleri İçin Performans Sınıfları, Çarpma Deneyi Kabul Kriterleri ve Deney Yöntemleri

VCDI : Sürücü ve Yolcu Mahalli Şekil Değiştirme İndeksi

SEMBOLLER

a_{xQ}, a_{yQ}, a_{zQ}	: Taşıt kütle merkezinden okunan ivme bileşenleri
a_{xP}, a_{yP}, a_{zP}	: Taşıt kütle merkezine belirli bir mesafeden okunan ivme bileşenleri
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	: Açısal Hız Bileşenleri
$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$	: İvme bileşenleri için sınır değerler
$\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$	: İvme bileşenleri için filtrelenmiş sınır değerler
V_x, V_y, V_z	: Hız bileşenleri
ψ	: Yalpalama açısı
$\dot{\psi}$	: Yalpalama açısal hızı
$\ddot{X}_C, \ddot{Y}_C$	: Taşıtın yer koordinatındaki açısal ivme bileşenleri
x_b, y_b	: Teorik başın taşıta göre konumu bileşenleri
X_C, Y_C	: Teorik başın taşıta göre hızı bileşenleri
$\dot{x}_b, \dot{y}_b$	: Teorik başın referans koordinat sistemine göre hız bileşenleri
t	: Zaman
f_y	: Akma mukavemeti
f_u	: Kopma mukavemeti
ρ	: Yoğunluk
E	: Elastisite Modülü
VI_m	: Taşıt girme mesafesi
D_m	: Dinamik yer değiştirme
W_m	: Çalışma genişliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çarpışma test taşıtı özellikleri. **6**
Çizelge 1.2 : VCDI alt indeks değerlendirme kriterleri. **13**
Çizelge 1.3 : Yolda tutma performans seviyeleri. **16**
Çizelge 1.4 : Çarpışma test tipleri ve özellikleri. **17**
Çizelge 1.5 : Çarpma şiddeti performans seviyeleri. **17**
Çizelge 1.6 : Çalışma genişliği sınıfları ve seviyeleri. **19**
Çizelge 1.7 : Taşıt girme mesafesi sınıfları ve seviyeleri. **20**
Çizelge 1.8 : Otokorkuluk sistemi deney parametreleri. **21**
Çizelge 1.9 : Çarpışma sonrası hareket alanı boyutları. **21**
Çizelge 2.1 : Sonlu elemanlar modeli özeti. **55**
Çizelge 2.2 : Yapısal sıcak hadde çelik dayanımları. **56**
Çizelge 2.3 : Otokorkuluk sistem elemanları yapısal çelik kalite sınıfları. **58**
Çizelge 2.4 : Yapısal çelik sınıfları minimum dayanım özellikleri. **58**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Otokorkuluk sistemlerinin sınıflandırması. **4**
Şekil 1.2 : Yol kenarı güvenlik sistemleri. **5**
Şekil 1.3 : İvmeölçer konumu ve pozitif yön kabulü. **7**
Şekil 1.4 : Referans koordinat sistemi. **11**
Şekil 1.5 : Teorik başın sol yana çarpması. **11**
Şekil 1.6 : Şekil değiştirmelerin taşıta göre konumları. **14**
Şekil 1.7 : Yolcu mahalli iç boyutları. **15**
Şekil 1.8 : D_m (dinamik yer değiştirme), W_m (çalışma genişliği), VI_m (taşıt girme mesafesi) ölçüm değerleri. **18**
Şekil 1.9 : Taşıt çarpışma sonrası hareket sınır koşulları. **22**
Şekil 1.10 : Birleşim sapma sınır değer hesap abağı. **23**
Şekil 1.11 : Otokorkuluk sistemi projesi/Plan. **30**
Şekil 1.12 : Otokorkuluk sistemi projesi/A-A Kesiti. **31**
Şekil 1.13 : Otokorkuluk sistemi projesi/B-B Kesiti. **32**
Şekil 1.14 : Otokorkuluk sistemi projesi/C-C Kesiti. **32**
Şekil 1.15 : Otokorkuluk sistemi projesi/D-D Kesiti. **33**
Şekil 1.16 : Otokorkuluk sistemi üç boyutlu görseli (yol cephesi). **33**
Şekil 1.17 : Otokorkuluk sistemi üç boyutlu görseli (arka cephe). **34**
Şekil 1.18 : Takoz bağlantısı üç boyutlu görseli (üst). **35**
Şekil 1.19 : Takoz bağlantısı üç boyutlu görseli (alt). **36**
Şekil 1.20 : Dikme-orta ray bağlantısı üç boyutlu görseli. **37**
Şekil 1.21 : Dikme-üst ray bağlantısı üç boyutlu görseli. **37**
Şekil 1.22 : 10,5 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi. **38**
Şekil 1.23 : 6,5 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi. **39**
Şekil 1.24 : 3.8 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi. **39**
Şekil 1.25 : 10,5 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri. **40**
Şekil 1.26 : 6,5 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri. **40**
Şekil 1.27 : 3.8 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri. **40**
Şekil 1.28 : Genleşme derzi dikme tasarım bilgileri. **41**
Şekil 1.29 : Mafsallı ray bağlantıları üç boyutlu görseli. **42**
Şekil 1.30 : Kayıcı sistem bağlantıları üç boyutlu görseli. **43**
Şekil 1.31 : Rijit ray bağlantısı üç boyutlu görseli. **43**
Şekil 2.1 : Program kullanımı akış şeması. **46**
Şekil 2.2 : Norma açıklık dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli. **47**
Şekil 2.3 : Normal açıklık ray sistemi Solidworks katı eleman modeli. **48**
Şekil 2.4 : Takoz eleman Solidworks katı eleman modeli. **48**
Şekil 2.5 : Normal açıklıklı otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modeli. **49**
Şekil 2.6 : Genleşme derzi dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli. **50**
Şekil 2.7 : Genleşme derzi ray sistemi Solidworks katı eleman modeli. **50**
Şekil 2.8 : Mafsallı ve rijit bağlantı sistemleri Solidworks katı eleman modeli. **51**
Şekil 2.9 : Genleşme derzi otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modeli. **51**

Şekil 2.10 : Otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar ağı oluşturma işlemi. **54**
Şekil 2.11 : Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model örnek görsel-1. ..... **54**
Şekil 2.12 : Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model örnek görsel-2. ..... **54**
Şekil 2.13 : Yapısal çelik sınıflarına göre gerilme-şekil değiştirme grafiği. **57**
Şekil 2.14 : Ankraj plakaları mesnet tanımları (BOUNDARY_SPC). **59**
Şekil 2.15 : Element merge işlemi temsili görseli. **60**
Şekil 2.16 : LS-DYNA temas kabulü. **61**
Şekil 2.17 : 38 ton IVECO marka tır sonlu elemanlar modeli. **62**
Şekil 2.18 : 900 kg SUZUKI GEO METRO sonlu elemanlar modeli. **62**
Şekil 3.1 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli. **67**
Şekil 3.2 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe cephe görseli. **68**
Şekil 3.3 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli. **68**
Şekil 3.4 : Çalışma genişliği zaman grafiği. **69**
Şekil 3.5 : TB81 test simülasyonu 0.19'ncu saniye, plan görseli. **69**
Şekil 3.6 : TB81 test simülasyonu 0.19'ncu saniye, ön cephe cephe görseli. **70**
Şekil 3.7 : TB81 test simülasyonu 0.19'ncu saniye, perspektif görseli. **70**
Şekil 3.8 : TB81 test simülasyonu 0.95'ncı saniye, plan görseli. **71**
Şekil 3.9 : TB81 test simülasyonu 0.95'ncı saniye, ön cephe cephe görseli. **72**
Şekil 3.10 : TB81 test simülasyonu 0.95'ncı saniye, perspektif görseli. **72**
Şekil 3.11 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli. **73**
Şekil 3.12 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe görseli. **73**
Şekil 3.13 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli. **73**
Şekil 3.14 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye plan görseli. **74**
Şekil 3.15 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye ön cephe görseli. **74**
Şekil 3.16 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye perspektif görseli. **75**
Şekil 3.17 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye plan görseli. **76**
Şekil 3.18 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye ön cephe görseli. **76**
Şekil 3.19 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye perspektif görseli. **77**
Şekil 3.20 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli. **77**
Şekil 3.21 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe cephe görseli. **78**
Şekil 3.22 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli. **78**
Şekil 3.23 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, plan görseli. **79**
Şekil 3.24 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, ön cephe cephe görseli. **80**
Şekil 3.25 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, perspektif görseli. **80**
Şekil 3.26 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, plan görseli. **81**
Şekil 3.27 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, ön cephe cephe görseli. **81**
Şekil 3.28 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, perspektif görseli. **82**
Şekil 3.29 : İvme grafiği (*x* ekseni) **83**
Şekil 3.30 : İvme grafiği (*y* ekseni) **83**
Şekil 3.31 : İvme grafiği (*z* ekseni). **84**
Şekil 3.32 : ASI indeksinin zamana göre değişimi. **84**
Şekil 3.33 : TRAP yazılımı hesap raporu. **85**

ESTETİK, HAFİF VE YENİ NESİL AĞIR HİZMET TİPİ ÇELİK KÖPRÜ OTOKORKULUK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Otokorkuluk sistemleri, karayollarında herhangi bir sebep ile kontrolden çıkan taşıtın yol kenar bölgesine geçmesini önlemek ve taşıtı güvenli bir şekilde yola döndürmek için kullanılan yol kenarı güvenlik elemanlarıdır. Otokorkuluk sistemi yol kenar bölgesindeki yaya ve diğer yol kenarı tesislerini korumanın yanında, çarpan taşıtın içinde bulunan yolcuları da çarpma etkisinden korumak adına tasarlanan yol kenarı güvenlik elemanlarıdır. Otokorkuluk sistemleri kullanım amacına göre değişik tiplerde üretilmektedir. Yüksek düşü mesafesine ve yoğun ağır vasıta trafiğine sahip yol bölgelerinde kullanılan otokorkuluk sistemleri ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi olarak adlandırılırlar. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemleri ağırlıklı olarak köprü gibi karayolu yatırımlarında kullanılmaktadır. Köprüler yapıları gereği hareketli sistemlerdir. Bu sebeple genleşme derzi yapılarına sahiptirler. Otokorkuluk sistemlerinin köprülerde kullanımında genleşme derzi bölgelerine özel tasımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında, ülkemizde hâlihazırda devam eden ve yapılması planlanan karayolu yatırımları kapsamında gerçekleştirilecek; köprü, viyadük gibi projelerde kullanılmak üzere normal açıklıklı bölge ve genleşme derzi bölgesi olmak üzere iki farklı tasarıma sahip ağır hizmet tipi bir çelik otokorkuluk sistemi tasarımı geliştirilmiştir.

Tez kapsamında, tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sisteminin analizleri karmaşık dinamik çözümler yapabilen sonlu elemanlar simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, dinamik çarpışma senaryosunun ekspilisit sonlu elemanlar analizlerini yapabilen ve analizler sonucunda çarpışma anını simüle edebilen bir yazılımdır. Bu yazılımda, çarpışma senaryosunun elemanları olan otokorkuluk sistemi ve taşıtın üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri oluşturulan otokorkuluk sistemi ve taşıt elemanlarının mekanik özellikleri programa tanımlanmıştır. Oluşturulan taşıt ve otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modelleri standartların ön gördüğü çarpışma test kriterlerine göre sanal ortamda çarpışma testine tabi tutulmuştur. LS-DYNA yazılımının oluşturduğu dinamik çarpışma simülasyonu üzerinden otokorkuluk sistemlerinin performans değerlendirmeleri ve yapısal optimizasyonları yapılmıştır.

Ağır hizmet tipi (AHT) otokorkuluk sistemleri köprü, viyadük gibi yamaçlarda ve yüksek kotta bulunan karayolu bölgelerinde kullanılan otokorkuluk sistemleridir. Aracın karayolunu terk etmesi halinde yüksek mesafelerden düşmesiyle sonuçlanabilecek kazaları önlemek adına geliştirilmiştir. Bu sebeple AHT otokorkuluk sistemleri ağırlıklı olarak yol kenarı banket bölgelerinde kullanılmaktadır. Bu otokorkuluk sistemleri, ağır vasıta trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde, yüksek ağırlıklı taşıtları karayolu sınırlarında tutma amacı ile kullanılırlar. Taşıtın otokorkuluk sistemine çarpması sonucu doğan dinamik ve statik yüklemelere karşı basit otokorkuluk sistemlerine oranla çok daha yüksek mukavemete sahip otokorkuluk

sistemleridir. Çarpışma etkilerine karşı otokorkuluk sisteminde oluşan yanal yer değiştirme hareketlerinin sınırlandırıldığı otokorkuluk sistemleridir.

AHT otokorkuluk sisteminin tasarımında, otokorkuk sistemlerine dair ülkemizde ve Avrupa'da kullanılan standartlar incelenmiştir. İlgili TS EN 1317 standardında ortaya konulan gereklilikleri sağlayacak bir tasarım oluşturulması prensibi üzerinden hareket edilmiştir. İlgili standartlarda otokorkuluk sistemleri için tam ölçekli çarpışma testi gerekliliği ortaya konulmuştur. Tam ölçekli çarpışma testinde amaç, otokorkuluk sisteminin taşıtı güvenli bir şekilde karayoluna döndürme işlevini başarıyla gerçekleştirdiğini deneysel yöntemlerle kanıtlamaktır. İlgili standartta tam ölçekli çarpışma testi verilerinin değerlendirmesinde üç temel kıstas ve bu temel kıstaslara ait performans seviyeleri belirlenmiştir. Bunlardan ilki olan yolda tutma performans seviyesi, otokorkuluk sisteminin çarpma etkilerine karşı taşıtı yolda tutma potansiyelini ifade etmektedir. Ağır hizmet tipi bir otokorkuluk sistemleri yüksek yolda tutma gerekliliklerini sağlaması gereken otokorkuluk sistemleridir. Bu sebeple tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı için yolda tutma performans seviyesi H4b olarak belirlenmiştir. Belirlenen H4b seviyesi için ilgili TS EN 1317 standardı, otokorkuluk sisteminin TB11 ve TB81 testlerine tabi tutulmasını öngörmüştür. İkinci kıstas olan çarpma şiddeti performans seviyesinin belirlenmesinde ASI ve THIV indeksleri kullanılmaktadır. Bu indeksler TS EN 1317'de paylaşılan bir sıra formülün kullanılması ile hesaplanmaktadır. ASI indeksi, çarpışmanın yolcu için şiddetini ifade eder. ASI indeksinin değerine göre çarpma şiddeti performans seviyesi "A", "B" ve "C" olmak üzere üç sınıf olarak belirlenmiştir. "A" en düşük çarpma şiddet seviyesini ifade ederken "C" en yüksek çarpma şiddet seviyesini ifade eder. THIV (Teorik Baş Çarpma Hızı) indeksi, çarpışma esnasında aracın içinde olan yolcunun kafa bölgesinde, çarpışma etkileri ile oluşan ani hareketin hızını, dolayısı ile yolcunun kafa bölgesinde oluşan çarpma şiddetini ifade eder. THIV indeksi için ilgi standartta belirtilen azami değer 33 km/saat olarak ifade edilmiştir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımında çarpma şiddeti performans seviyesinin minimum "B" sınıfı olmasına karar verilmiştir. Üçüncü kıstas olan çalışma genişliği performans seviyesi, çarpışma sonrası yol dış tarafına bakan yüzeylerinin en uç bölgesi ile çarpışma öncesi otokorkuluk sisteminin yola bakan yüzeylerinin en uç bölgesi arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemleri, kullanım amaçları gereği çalışma genişliğinin düşük olması gereken sistemlerdir. Bu sebeple ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı için çalışma genişliği performans seviyesi konservatif bir yaklaşımla W3 olarak belirlenmiştir. W3 çalışma genişliği performans seviyesi, maksimum yanal yer değiştirme hareketinin 1000 mm olabileceğini ifade etmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen yeni nesil ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımının, işlevsel olmasının yanı sıra hafif ve estetik bir tasarıma sahip olmasına da özen gösterilmiştir. Köprü geçişlerinde geniş bir görüş açısı sağlaması ve ekonomik olması adına 4200 mm gibi geniş bir dikme açıklığı seçilmiştir. Otokorkuluk sistemi tasarımında, standart 2N ve 3N ray sistemlerinden farklı olarak kutu profil ray sistemleri kullanılmıştır. Dikme sistemleri de çelik kutu profil elemanlardan oluşturulmuştur. Oluşturulan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımının Solidworks yazılımı ile üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analiz dosyalarının oluşturulmasında LS-PrePost yazılımı kullanılmıştır. Solidworks yazılımında oluşturulan üç boyutlu model LS-PrePost yazılımına aktarılmıştır. LS-PrePost yazılımında, analiz için gerekli sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş ve otokorkuluk sistemi tasarımını oluşturan her bir eleman için ayrı ayrı element ve

malzeme özellikleri tanımlanmıştır. LS-PrePost yazılımda, son olarak otokorkuluk sisteminin sınır ve mesnet koşulları tanımlanmış ve otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modeli tamamlanmıştır. Oluşturulan otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar model dosyası ve test laboratuvarlarından temin edilen taşıt sonlu elemanlar model dosyası TB11 ve TB81 test biçimlerinde bir araya getirilmiş ve LS-DYNA yazılımı için analiz dosyası oluşturulmuştur. Tez kapsamında geliştirilen otokorkuluk sisteminin sonlu elemanlar analizleri LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve çarpışma testleri sanal ortamda simüle edilmiştir.

LS-DYNA yazılımında oluşturulan analiz simülasyonları değerlendirilmiş ve test verilerinin ilgili standartta belirtilen gereklilikleri sağlayıp sağlamadığı irdelenmiştir. Otokorkuluk sistemi nihai tasarımı oluşturulurken çok sayıda simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve simülasyon çalışmaları sonucunda otokorkuluk sistemini oluşturan elemanlarını konumlar, geometrik tasarımları, et kalınlıkları ve profil tipi özellikleri ilgili standartlarda belirtilen çarpışma performansı gerekliliklerini sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Tez kapsamında tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sisteminin çarpışma davranışları TB11 ve TB81 test simülasyonları üzerinden incelenmiştir. Otokorkuluk sistemi çarpışma testi simülasyonlarında, taşıtın otokorkuluk sisteminin herhangi bir parçasına takılması gibi çarpışma testini başarısız kılacak bir durum görülmemiştir. Otokorkuluk sisteminin, taşıtın otokorkuluk sistemini aşarak yolu terk etmesini önlediği ve taşıtı ilgili standartlarda belirtilen sınırlar çerisinde tutma konusunda başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Tasarım aşamasında seçilen H4b yolda tutma performans seviyesi için gerekli test tipleri olan TB81 ve TB11 testleri sonucunda çarpma şiddeti performans seviyesi ön görüldüğü gibi ”B” sınıfı olarak elde edilmiştir. Çarpışma testleri için ilgili standartlarda belirtilen bir diğer performans seviyesi olan çalışma genişliği performans seviyesi tasarım aşamasında belirlenen hedef çalışma genişliği değeri olan W3 olarak elde edilmiştir. Yapılan çok sayıda simülasyon ve analiz sonucunda; estetik, hafif ve yeni nesil bir ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı ortaya konulmuştur.

DEVELOPMENT OF LIGHT, NEW GENERATION, AESTHETIC, HEAVY CONTAINMENT LEVEL BRIDGE RAIL

SUMMARY

Guardrail systems are one of the roadside safety hardware that are used to prevent vehicles from running off the road by containing and redirecting errant vehicles safely back to the road platform. A guardrail system is a roadside safety element designed to protect pedestrians and other roadside facilities in the roadside zone, as well as to protect passengers inside the crashed vehicle from impact. The guardrail systems produce in different types according to the purpose of use. The bridge rails are a type of guardrail that are used on bridge decks with excessive fall distance. It is well known that bridges can expand or contract under environmental influences due to their structural characteristics. For this reason, they incorporate expansion joints to mitigate undesired loads. Bridge rails used at expansion joint require special details. Within the scope of the thesis, two different designs of bridge rails developed to use in projects that will be realized within the scope of highway investments that are already underway and planned to be made, in our country such as bridges and viaducts.

Within the scope of the thesis, the analysis of the bridge rail designs were carried out by using finite element simulation software LS-DYNA that can make complex explicit dynamic calculations and simulations. In this software, three-dimensional finite element models of the bridge rail and the vehicle were created. The mechanical characteristics of the guardrail and vehicle elements are described in the software. These models were subjected to a crash test in the virtual environment according to the crash test criteria stipulated by the European Crash Testing Standard, TS EN 1317. Performance evaluations and structural optimizations of guardrails were made using the crash simulation created by the software.

Heavy containment level barriers are the kind of guardrail that used to contain and redirect heavy vehicles, such as 30 ton or heavier trucks. These barriers are used in areas with heavy vehicle traffic to keep heavy vehicles at the borders of the highway. These are the guardrails that have a much higher strength compared to ordinary guardrails against dynamic and static loads caused by the vehicle crashing the guardrail. It is the guardrails where the lateral displacement movements occurring in the guardrail against the crashing effects are limited.

The full-scale crash test requirement for the guardrails have been introduced in the relevant norms. The aim of the full-scale crash test is to prove by experimental methods that the guardrail successfully accomplished the function of guiding the vehicle safely to the road. In the evaluation of the full-scale crash test data in the standards, three basic criteria and the several levels of these basic criteria are determined. The first criterion specified in the relevant norm is the containment level. The containment level refers to the potential of the road guard to keep the vehicle on the road against the dynamic effects it will have cause when the vehicle hits the guardrail.

In this thesis, the containment level was selected as H4b for the design of the bridge rail. Thus, bridge rail designs should be subjected to TB11 and TB81 tests according to the relevant TS EN 1317 norm.

The second criterion specified in the relevant norm is the impact severity level. ASI (Accident Severity Index) and THIV (Theoretical Head İmpact Velocity) indices are used to determine the level of impact severity. ASI and THIV indices are used to determine the level of impact severity. ASI and THIV indices are calculated using a series of formulas. The ASI index indicates the severity of the crash for the passenger. According to the value of the ASI index, the level of impact severity is determined in three classes: "A", "B" and "C". Class "A" indicates the lowest impact severity, while class "C" indicates the highest impact severity. The THIV (Theoretical Head Impact Velocity) index refers to the speed of sudden movement caused by crash effects in the passenger head inside the vehicle during the crash. In the relevant standard, the maximum value that the THIV index can take as a result of the crash test is specified as 33 km/h. It was decided that the collision safety level of the bridge rail designed within the scope of the thesis should be minimum class “B”.

The third criterion specified in the relevant norm is the working width level. The working width level is the maximum lateral displacement caused by the impact of an accident between the undeformed tip of the guardrail on the road side and the deformed tip of the guardrail on the outside of the road. Bridge rail is the kind of guardrail that have to have a low working width for their intended use. For this reason, the working width level of the bridge rail was determined as W3 or 1000 mm with a conservative approach.

The design of the new generation bridge rail developed within the scope of the thesis has been paid attention to have a light and aesthetic design as well as being functional. In the design of the bridge rail developed within the scope of the thesis, the distance between posts was chosen as 4200 millimeters, which is a wider value compared to standard designs. Rectangular hollow section steel profile rail elements were used in the design. The posts were also created from rectangular hollow section steel profile elements. The three-dimensional model of the bridge rail design was created with Solidworks software. LS-PrePost software was used to create finite element analysis files. Three-dimensional model created in Solidworks software was imported to LS-PrePost software. In the LS-PrePost software, the finite element model (FEM) required for analysis were created and the element and material properties were defined separately for each part that constitutes the bridge rail design. In the creation of the finite element model (FEM), the boundary and support properties were defined for each part. The finite element model file of both vehicle and bridge rail were combined in the test composition TB11 and TB81.

In the scope of the thesis, crash test analysis simulations created in LS-DYNA software were evaluated. Whether the analysis simulation data fulfill the crash test requirements specified in the relevant norm was examined. Numerous simulations were carried out while creating the final design of the bridge rail. As a result of the analysis and simulation studies, the features of the guardrail system components such as locations, geometric designs and wall thicknesses are optimized to meet the collision performance requirements specified in the relevant norms. The dynamic impact behavior of the bridge rail design was examined through the TB11 and TB81 crash test simulations. In these simulations, vehicles were successfully contained and redirected by the barrier with minimal barrier damage. It was observed that the bridge

rail performed as intended and showed a successful performance in keeping the vehicle within the borders of the highway as specified in TS EN 1317 standard.

It has been observed that the vehicle continues its post-collision trajectory within the post-collision movement area, or exit box, specified in the relevant TS EN 1317-2 norm. In addition, in crash test simulations, no barrier override or underride behavior was observed. In TB11 and TB81 simulations there was not an observation that would result in test failure, such as longitudinal element seperation or vehicle rollover. Furthermore, in TB11 simulation Barrier damage was fairly small and redirection of passenger car is acceptable. All the occupant risk factors calculated are well withinn the acceptability limit specified in TS EN1317 standard part 2. On the other hand, for the TB81 impact tractor trailer created a moderate damage to barrier and repair of posts and rail elements are necessary. Post impact trajectory of the tractor trailer is also within the exit box criteria specified in TS EN1317 standard part 2.

The crash performance of each element constituting the bridge rail system was evaluated separately using the TB11 and TB81 crash test simulations. As a result of the evaluation, it has been observed that each element forming the guardrail system acts in the integrity of the guardrail system. It has been observed that the strengths of each element constituting the guardrail system are sufficient during the crash event.

ASI index was calculated as 1,4 based on the formulation provided in TS EN1317 standard part 1. All the acceleration data needed was obtained from the accelerometer placed in 900 kg car during the TB11 crash test simulation. According to the 1,4 ASI index value, the impact severity level was obtained as "class B". The THIV index was calculated as 32,4 km/h with the data obtained from the TB11 crash test simulations. The value of 32,4 km/h THIV index remains within the acceptable limits described in TS EN1317 standard part 2.

The working width value was calculated as 0,901 meters from the TB81 test simulations. Thus, working width class is determined as W3. Vehicle intrusion distance (VIm) and dynamic displacement (Dm) parameters, which are not considered as acceptance criteria in the relevant TS EN 1317-2 standard, help to predict potential problems that may arise due to the change of application areas of the guardrail systems. Vehicle intrusion distance (VI_m) and dynamic displacement (D_m) parameters were evaluated using crash test simulations. The vehicle entry distance (VI_m) value for the guardrail system design was found to be negligibly low. Furthermore, it is concluded that the dynamic displacement distance is not important for the AHT guardrail system designed within the scope of the thesis.

As a result of the TB81 and TB11 test simulations, which are the test types required for the H4b containment level selected during the design phase, the impact severity level was obtained as the " class B" as predicted. The working width level, which is the other security level specified in the relevant norm, was obtained as the target value determined as W3 at the design stage. As a result of numerous simulations and analyzes carried out within the scope of the thesis, an aesthetic, light and new generation bridge rail design was introduced.

1. GİRİŞ

Otokorkuluk sistemleri; taşıt, yaya ve yol kenarı unsurların etkileşimde olduğu ve "affeden yol kenarı" ilkesine göre yeterli nitelikte tasarlanamadığı yol kenar bölgelerinin güvenlik durumunun iyileştirilmesinde aktif olarak kullanılır. Otokorkuluk sistemlerinin yegâne amacı herhangi bir sebeple taşıtın yol sınırları dışına çıkarak diğer araçların ve yayaların güvenliğini tehlikeye atacak bir duruma sebebiyet vermesini önlemek ve taşıtın tekrar karayoluna güvenli bir şekilde dönmesini sağlamaktır.

Çelik otokorkuluk sistemleri, hem çelik yapı elemanının süneklik özelliği ile darbe sönümleme kapasitesinin yüksek olması, hem de gelişen teknoloji sayesinde üretim, montaj ve tamiratının hızlı ve kolay olması sebebi ile ülkemizde en yaygın kullanılan otokorkuluk sistemlerinden biridir.

Otokorkuluk sistemlerinin tasarımı, dinamik çarpışma etkileri altında davranışlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu sebeple yapısal malzemelerin non-linear yükleme davranışları önem kazanmaktadır. Günümüzde karmaşık non-linear hesaplamaların yapılmasında LS-DYNA, ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, PATRAN gibi birçok farklı ticari bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır. Bu yazılımlar karmaşık non-linear hesaplamaların yanı sıra taşıtın çarpışma anı ve sonrasındaki hareketini de simüle edebilmektedir. Bilgisayar yazılımları ile çarpışma testlerinin önceden simüle edilebilmesi, tasarım aşamasında hedeflenen çarpışma davranışını gerçek hayatta yakalayabilmek adına tasarımcıya potansiyel bir tasarım hatasını önceden görüp düzeltebilme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca ilgili yazılımlar otokorkuluk sistemi üzerinde çarpışma etkisiyle oluşan kuvvet dağılımlarını hassas bir şekilde ölçebildiği için otokorkuluk sistemi tasarımı bölgesel optimizasyonları kolayca yapılabilmektedir.

Tasarımı tamamlanmış bir otokorkuluk sisteminin uygulanabilmesi için ülkemizde ve Avrupa'da kullanılan TS EN 1317 standardına uygun olması gerekmektedir. Otokorkuluk sistemlerinin uygunluğu yine ilgili standartta koşula bağlanmış olan tam ölçekli bir çarpışma testi ile kanıtlanmalıdır. Bilgisayar yazılımları ile dinamik

çarpışma hareketini önceden analiz ve simüle edebilme olanağı, oluşacak potansiyel zaman ve test tekrarlama maliyetlerinin önüne geçme konuşunda büyük önem kazanmaktadır. Otokorkuluk için yapılacak tam ölçekli çarpışma testinde; bilgisayar yazılımları farklı çarpışma noktaları için, çarpışma anı ve sonrası davranış farklarının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Ülkemizde hâlihazırda devam eden ve yapılması planlanan birçok ulaştırma yatırımı bulunmaktadır. Bu yatırımlara; Çanakkale 1915 köprüsü, İzmir Otoyolu Körfez Geçiş Köprüsü ve Kanal İstanbul Projesi kapsamında yapılacak birçok köprüyü örnek gösterebiliriz. Bu yatırımlar kapsamında gerçekleştirilmekte ve gerçekleştirilecek olan bu otoyol köprü projelerinde, yapıları gereği ağır hizmet tipi çelik otokorkuluk sistemleri kullanılacaktır. Bu çalışmada, ülkemizde gerçekleştirilen köprü ve viyadük gibi projelerde kullanmak üzere hafif, estetik ve yeni nesil ağır hizmet tipi çelik bir otokorkuluk sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ağır hizmet tipi çelik otokorkuluk sisteminin yolda tutma performans seviyenin H4b, çalışma genişliği performans seviyesinin minimum W3 ve çarpma şiddeti performans seviyesinin minimum “B” sınıfı olması amaçlanmıştır.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemlerinin karayolu köprü sistemlerinde kullanılmaktadır. Köprüler yapıları gereği hareketli sistemler olması sebebi mesnet bölgelerinde genleşme derzi tasarımlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Bu sebeple bu çalışmada tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi için köprü genleşme derz bölgelerinde kullanılacak alternatif işlevsel bir tasarım geliştirilmesi de amaçlardan bir tanesidir.

Bu amaç doğrultusunda, teze konu olan tasarım, TS EN 1317’de belirtilen Avrupa’ya uygunluk kıstasları çerçevesinde belirtilen gereklilikler doğrultusunda değerlendirilecektir. TS 1317’de belirtilen tam ölçekli çarpışma testleri, karmaşık eksplisit sonlu elemanlar problemlerini çözebilen bilgisayarlı simülasyon yazılımları kullanarak sanal ortamda gerçekleştirilecektir.

Gerçekleştirilen tam ölçekli çarpışma test simülasyonlarından alınan matematiksel veriler ışığında tasarımın optimize edilmesi ve otokorkuluk sisteminin işlevselliğinin matematiksel olarak kanıtlanması amaçlardan bir tanesidir.

1.2 Otokorkuluk Sistemleri Tanım ve Özellikleri

Otokorkuluk sistemlerinin temel kullanım amacı, yoldan bir sebeple çıkan aracın yayalara ve diğer araçlara zarar vermeden tekrardan kara yoluna güvenli bir şekilde döndürülmesidir. Bu amaçla tasarlanan otokorkuluk sistemlerinin çalışma prensibi yoldan çıkan aracın enerjisinin bir kısmının çarpma esnasında otokorkuluk sistemleri tarafından emilmesine ve momentumun azaltılarak taşıtın yönlendirilmesi mantığına dayanmaktadır.

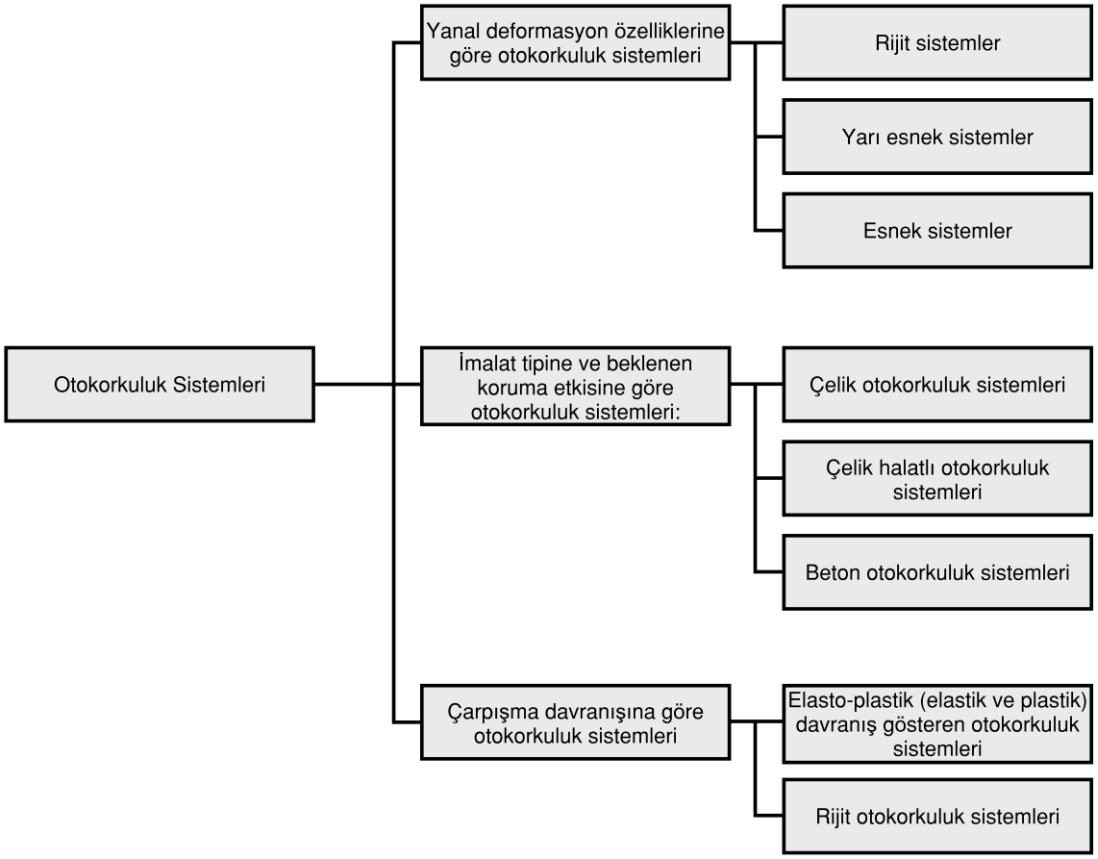
Otokorkuluk sistemleri beton, çelik ve kompozit malzemelerden üretilebilmektedir. Ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan otokorkuluk sistemleri çelik otokorkuluk sistemleridir. Çelik otokorkuluk sistemleri, çeliğin sünek bir malzeme olması sebebi ile darbe yutma kapasitesi yüksek otokorkuluk sistemleridir. Hafif sistemler olması ve demonte halde nakliye edilebilmesi maliyetleri düşürdüğü için ekonomik açıdan bir avantaj sağlar. Ayrıca hafif ve demonte edilebilir sistemler olması sebebi ile kazada hasar gören bölge hızlıca değiştirilebilir. Tamirat esnasında karayolunu kapatma süreleri kısa olduğundan zaman değeri (value of time) açısından karayoluna işletme maliyetlerini düşürme konusunda bir avantaj sağlamaktadır.

Çelik otokorkuluk sistemleri betonarme gibi diğer otokorkuluk sistemlerine oranla malzeme birim fiyatı olarak daha pahalı sistemlerdir. Yüksek süneklikte olmaları ufak kazalarda bile otokorkuluk sistemlerinin zarar görmesine neden olmaktadır. Bu da sürdürülebilirlik açısından ek maliyetler yaratmaktadır.

Temel olarak otokorkuluk sistemleri araç ve yol sınırı arasında engel teşkil edilen yapısal elemanlardır. Otokorkuluk sistemlerinin özellikleri kullanılacak yolun ve yola ait trafiğin gereklilikleri üzerine şekillenmektedir. Bu sebeple beklenen amaca hizmet eden bir nitelikte olmalıdır. Otokorkuluk sistemlerinin çarpışma durumundaki performanslarının öngörülebilir nitelikte olması kaza ölüm ve yaralanma oranlarının düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Otokorkuluk sistemlerinin davranış ve performanslarının belirlenmesinde, tam ölçekli çarpışma testleri ve bilgisayar simülasyonları yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaman içerisinde yapılan tam ölçekli çarpışma testleri, sonlu elemanlar metodu ile çalışan bilgisayarlı simülasyon programlarının otokorkuluk sistemlerinin performans ve çarpışma davranışlarının analizine dair yeterliliğini kanıtlamıştır.

Yol kenarı otokorkuluk sistemleri, yanal deformasyon değerlerine göre rijit, yarı rijit ve esnek olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmıştır. İlgili otokorkuluk sistemleri sınıflandırması Şekil 1.1'de paylaşılmıştır. Bu yol kenarı otokorkuluk sistemlerinin kullanıma alınabilmesi, çarpışma davranışları, araç cinsi, hızı ve çarpışma açısı kıstaslarına uygunluğun ilgili standartlara göre değerlendirilmesi ile mümkündür.



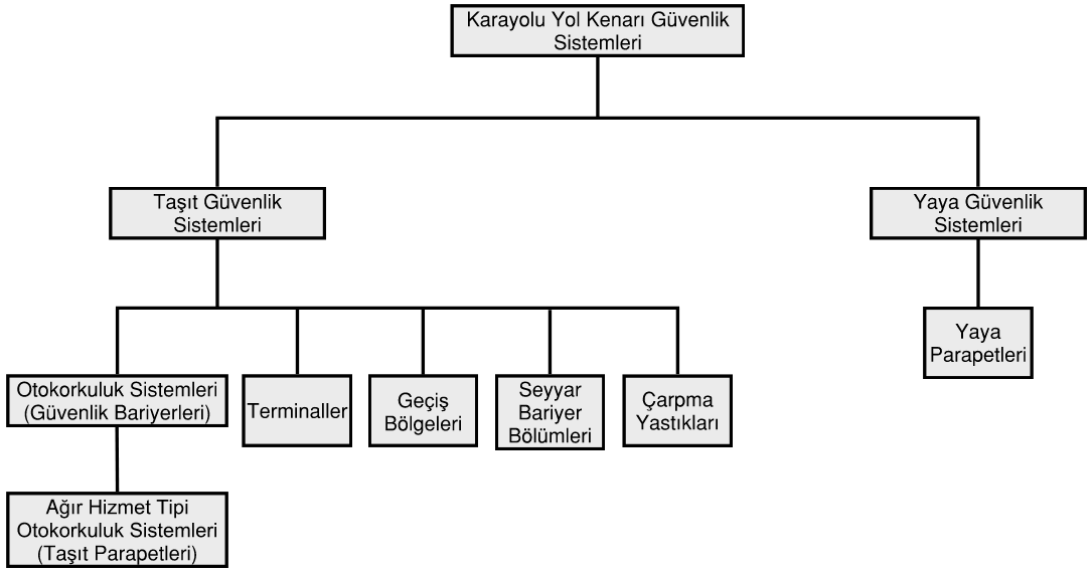
Şekil 1.1 : Otokorkuluk sistemlerinin sınıflandırması.

1.3 Çarpışma Test Standartlarının İncelemesi

Ülkemizde ve Avrupa ülkelerinde otokorkuluk sistemlerinin kullanılabilmesi için CE (Conformite European) sertifikasına sahip olması gerekmektedir. Otokorkuluk sistemlerinin ilgili sertifikayı alabilmesi için TS EN 1317'de belirtilmiş şartları ve teknik parametreleri sağlamaları gerekmektedir. Otokorkuluk sistemleri için test metotları ve gereklilikleri, "TS EN 1317-Bölüm 1: Terminoloji ve Deney Yöntemleri İçin Genel Kriterler" ve "TS-EN 1317-Bölüm-2: Taşıt Parapetleri Dahil Güvenlik Bariyerleri İçin Performans Sınıfları, Çarpma Deneyi Kabul Kriterleri ve Deney Yöntemleri" standartlarında yer almaktadır.

1.3.1 EN 1317-1 (Yol Güvenlik Sistemleri – Bölüm 1)

Karayolunda güvenliği artırmak ve tesis edilen bu güvenliğin devamlılığını sağlamak adına yol güvenliği sistemlerinin kullanılması daha güvenli yolların tasarımı için gereklidir. Yol kenarı güvelik sistemlerinin amacı yoldan çıkan araçları yol sınırları içerisinde tutmak ve tasarım esaslarında öngörülen dinamik performans değerleri dâhilinde karayoluna güvenli bir şekilde geri yönlendirmektir. İlgili standartta, yol kenarı güvenlik sistemlerine dair paylaşılan sınıflandırılma Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2 : Yol kenarı güvenlik sistemleri (TS EN 1317-1, 2011, s.2).

İlgili standarda göre otokorkuluk sistemlerini dinamik çarpışma performansının belirlenebilmesi için tam ölçekli çarpışma testine tabi tutulması gerekmektedir. Bu testin uygulamasında önemli parametrelerden birisi bariyere çarptırılacak taşıtın özellikleridir. Çarpışma testlerinin sağlıklı sonuçlar vermesi için test araçlarının belirli ölçütleri sağlaması gerekmektedir. İlgili standardın çarpışma testinde kullanılacak taşıtlara dair öngördüğü ölçütler Çizelge 1.1'de verilmiştir. Testte kullanılacak taşıtın lastikleri, imalatçının tavsiye ettiği basınçlarda şişirilmiş olmalıdır. Taşıtların; lastikler, karoser, süspansiyon, tekerlerin rot-balans ayarları gibi özellikleri, yola elverişlilik belgesi gerekliliklerini sağlamalıdır. Testte kullanılacak 1500kg ve altı taşıtların imalat modellerinin mevcutta bulunması gerekmektedir. Testte kullanılacak taşıtların, hâlihazırda Avrupa'da trafikte kullanılan araçlardan seçilmesi gerekmektedir. Taşıtta fabrika çıkış özelliklerini değiştirecek herhangi bir tamir, güçlendirme veya herhangi bir değişiklik olmamalıdır.

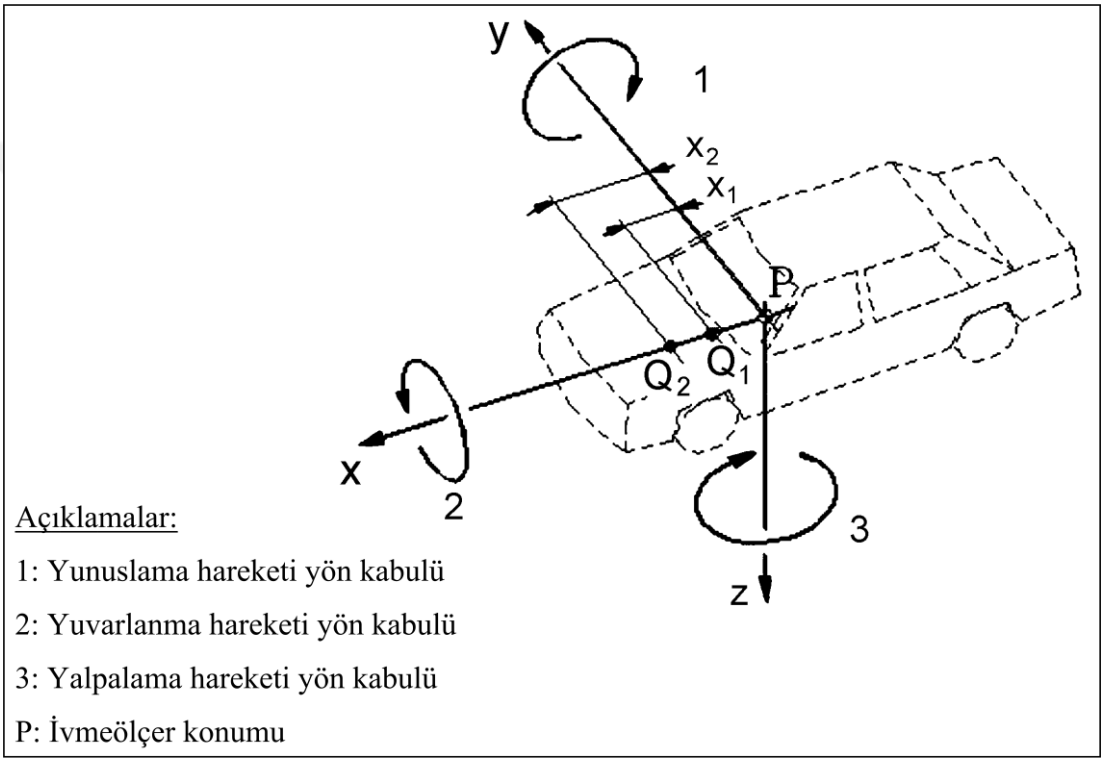
Çizelge 1.1 : Çarpışma test taşıtı özellikleri (TS EN 1317-1, 2011, s.7).

KÜTLE kg ±								
Toplam kütle	900 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Deney atalet kütlesi [a]	825 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Kullanılan azami dengeleyici kütle [b]	100	160	180	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz
Yerleştirilen ATD'nin kütlesi	78 ± 4	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil	Gerekli değil
BOYUTLAR m (sapma sınırı ± %15)								
Aks aralığı (ön ve arka)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Tekerlek yarıçapı (yüksüz)	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Aks açıklığı (en dış akslar arası)	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
KÜTLE MERKEZİNİN KONUMU [c d] m								
Ön akstan itibaren boyuna doğrultudaki mesafe (CGX) ± %10	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Taşıt merkez ekseninden itibaren enine doğrultudaki mesafe (CGY)	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
Yerden yükseklik (CGZ):								
– Taşıt kütlesi (± % 10)	0,49	0,53	0,53	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz
– Yük (+ % 15, - % 5)	Uygulanmaz	Uygulanmaz	Uygulanmaz	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90
TAŞIT TİPİ	Otomobil	Otomobil	Otomobil	Rijit HGV	Otobüs	Rijit HGV	Rijit HGV	Römorklu HGV
Aks adedi [e]	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1/2	2S+2	1S+3/4

[a] Ağır yük taşıtlarında (HGV) taşıt içindeki yük de dâhil edilmiştir.
[b] Ölçme ve kayıt donanımının kütlesi dâhil edilmiştir.
[c] Taşıtın kütle merkezi, taşıt içerisinde ATD yok iken belirlenmelidir.
[d] Çift akslı taşıtların kütle merkezi, ISO 10392'ye uygun şekilde tayin edilmelidir.
[e] *S*: Direksiyonun bağlı bulunduğu aks.

Çarpışma testinin gerçekleştireceği alan düz bir yüzeye sahip olmalıdır. Taşıtın yaklaşma alanı ve otokorkuluğa çarptıktan sonra yöneleceği alanda maksimum eğim %2,5'i geçmemelidir. Test alanının yüzeyi, sert yüzey kaplama olmalıdır. Test esnasında zeminde durgun su, buz, kar, toz ve herhangi bir kalıntı olmamalıdır. Test alanı taşıtın otokorkuluk sistemine çarpma hızına ulaşana kadar ivmelenmesine ve çarpma sonrası taşıtın güvenli bir şekilde yola dönmesinin gözlemlenebileceği kadar geniş olmalıdır.

Taşıta, boyuna doğrultuda (ileriye doğru), enine doğrultuda (yanlara doğru) ve düşey doğrultuda (aşağı yönde), ölçüm yapmak için minimum üç adet ivmeölçer yerleştirilmedir. Tercihen en az bir adet hız sensörü monte edilmelidir. İvmeölçerler kaza sonrası deforme olmuş taşıtın kütle merkezinin düşey iz düşümüne yakın konumda, içi boş kısımda bir "P" noktasına yerleştirilmelidir. "P" noktasının, deforme olmuş taşıt kütle merkez iz düşümü ile arasında yatayda azami 40 mm, boyuna doğrultuda ise azami 70 mm olmalıdır. İvmeölçerin konumu ve hesaplarda kullanılacak pozitif işaret düzeni yön kabulünün gösterimi Şekil 1.3'de paylaşılmıştır.



Açıklamalar:

1: Yunuslama hareketi yön kabulü

2: Yuvarlanma hareketi yön kabulü

3: Yalpalama hareketi yön kabulü

P: İvmeölçer konumu

Şekil 1.3 : İvmeölçer konumu ve pozitif yön kabulü (TS EN 1317-1, 2011, s.9).

Yunuslama ekseni; "1" numara ile gösterilen taşıt ilerleme doğrultusuna dik olan eksendir. Yuvarlanma ekseni; "2" numara ile gösterilen taşıt ilerleme doğrultusuna paralel olan eksendir. Yalpalama ekseni; "3" numara ile gösterilen yerçekimi doğrultusunda uzanan eksendir. Bu eksenel sistemin orijin noktası, ivmeölçerin yerleştirildiği nokta olan "P" noktasıdır.

Taşıt ivmeleri, ASI (Hayatta Kalma İndeksi), THIV (Teorik Baş Çarpma Hızı), baş çarpma mesafesi ve deney sonuç parametrelerinin değerlendirilmesinde kullanılır. Taşıt ivmeleri, ilgili standartta paylaşılan bir dizi bağıntı kullanılarak elde edilir. Taşıt ivme hesapları için kullanılan formüller denklem 1.1'de verilmiştir.

$$
\begin{aligned}
a_{xQ} &= a_{xP} - x(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\
a_{yQ} &= a_{yP} + x(\omega_z + \omega_x\omega_y) \\
a_{zQ} &= a_{zP} - x(\omega_y + \omega_x\omega_z)
\end{aligned} \tag{1.1}
$$

a_{xQ}, a_{yQ}, a_{zQ} : "Q" noktası için; boyuna, enine ve düşey doğrultudaki ivme değerleri.

a_{xP}, a_{yP}, a_{zP} : "P" noktası (koordinat sistemi merkezi) için; boyuna, enine ve düşey doğrultudaki ivme değerleri.

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: Çarpma etkisi ile yunuslama, yalpalama ve yuvarlanma eksenleri etrafında oluşan açısal hız değerleri (denklem 1.1, "Q" noktasının *x* ekseni üzerinde olması, "P" ve "Q" noktalarının rijit kütlenin noktaları olması durumunda geçerlidir).

Farklı konumlarda olmak üzere *x* ekseni üzerinde iki farklı "Q_1" ve "Q_2" tanımlanması ve bu noktalarda alınan ölçümlerin de "1" ve "2" alt indeksleri ile gösterilmesi halinde denklem 1.2'de verilen bir dizi bağıntı kullanılarak hesap yapılır.

$$
\begin{aligned}
a_{x1} &= a_{xP} - x_1(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\
a_{x2} &= a_{xP} - x_2(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\
a_{y1} &= a_{yP} + x_1(\omega_z + \omega_x\omega_y) \\
a_{y2} &= a_{yP} + x_2(\omega_z + \omega_x\omega_y) \\
a_{z1} &= a_{zP} - x_1(\omega_y - \omega_x\omega_z) \\
a_{z2} &= a_{zP} - x_2(\omega_y - \omega_x\omega_z)
\end{aligned} \tag{1.2}
$$

Bu durumda *x* ekseni doğrultusunda belirlenen "Q1" ve "Q2" noktalarına göre "P" noktasındaki ivme denklem 1.3'de verilen bir dizi bağıntıya göre hesaplanmalıdır.

$$
\begin{aligned}
a_{xP} &= \frac{x_1 a_{x2} - x_2 a_{x1}}{x_1 - x_2} \\
a_{yP} &= \frac{x_1 a_{y2} - x_2 a_{y1}}{x_1 - x_2} \\
a_{zP} &= \frac{x_1 a_{z2} - x_2 a_{z1}}{x_1 - x_2}
\end{aligned} \tag{1.3}
$$

Denklem 1.1, *x* ekseni doğrultusundaki konumlar için geçerlidir. Bu sebeple denklem 1.3 sadece "P", "Q1" ve "Q2" noktalarının üçünün de aynı doğrultu üzerinde düz bir şekilde konumlandığı durum için geçerlidir.

ASI (Hayatta Kalma İndeksi), taşıtın bariyere çarptığı anda, taşıt içerisindeki kişinin maruz kaldığı momentum değerinin yaşamsal sınırlarda ölçütlendirilmesi adına oluşturulmuştur bir indekstir. ASI indeksi denklem 1.4'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$ASI(t) = \left[(\bar{a}_x / \hat{a}_x)^2 + (\bar{a}_y / \hat{a}_y)^2 + (\bar{a}_z / \hat{a}_z)^2 \right]^{0,5} \tag{1.4}$$

$\hat{a}_x$,$\hat{a}_y$,$\hat{a}_z$: *x*, *y* ve *z* eksenleri buyunca oluşan ivme bileşenleri için belirlenen sınır değerler.

$\bar{a}_x$,$\bar{a}_y$,$\bar{a}_z$: Fazsız dört kutuplu düşük geçirgenlikli dijital Butterworth filtresi ile filtrelenmiş bileşenler (Dijital Butterword filtresinin kesim frekansının 13Hz olması gerekmektedir.

Sınır ivme değerleri, emniyet kemerini takmış yolcular için x, y ve z doğrultularında; âx=12g, ây=9g, âz=10g olarak belirlenmiştir. Burada referans ivme değeri olan "g" yerçekimi ivmesidir ve değeri g=9.81 ms^{-2}'dir. Sınır ivmeleri, çarpma etkisinde taşıt içindeki insanların yaralanma ve zarar görme riskinin oldukça düşük olduğu (en fazla hafif yaralanmalar) değerleri ifade eder.

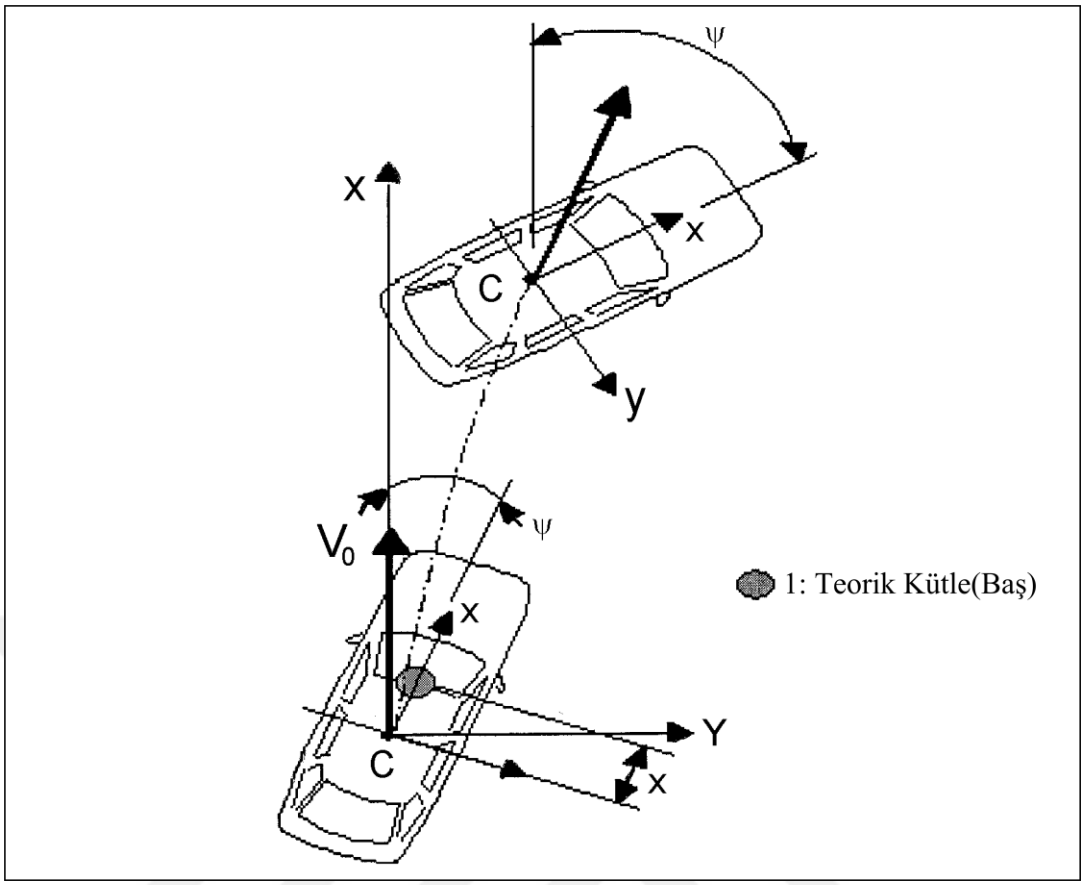
Denklem 1.4'de verilen ASI indeksi hesaplama denkleminde ASI indeksi, taşıt ivmesinin herhangi iki bileşeninin sıfır olması ve diğer üçüncü bileşenin sınır ivme değerine ulaşması durumunda sınır değer olan "1" olarak hesaplanır. İvmenin en az iki bileşeni sıfır olmadığında, ancak tekli ivme bileşenlerinin (a_x, a_y, a_z) tamamı ilgili sınır değerlerin oldukça altında olması durumunda ASI indeksi "1" değerini alabilir. Denklem 1.4, zamanın ve taşıt noktasının skaler fonksiyonu olan sadece pozitif değerler alabilen ASI indeksini vermektedir. ASI boyutsuz ve sadece pozitif değerler alabilen bir niceliktir. ASI değeri "1" değerini ne kadar aşarsa çarpışma anında yolcu için oluşacak potansiyel risk de o kadar artacaktır. Bir çarpışma durum simülasyonunda ivme şiddetinin tek ölçüsü olarak ASI değeri kabul edilir. ASI değeri denklem 1.5'deki denklem ile ifade edilir. ASI indeksi hesabı, virgülden sonra iki haneli bir değer elde edilecek şekilde yapılır ve virgülden sonra bir hane kalacak şekilde yuvarlama işlemi uygulanarak kaydedilir.

$$ASI = \max\left[ASI(t)\right] \tag{1.5}$$

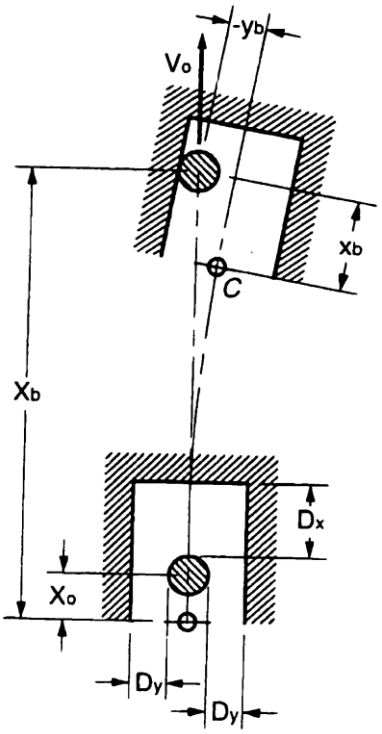
THIV (Theoretical Head Impact Velocity), otokorkuluk sistemine çarpan arabadaki yolcunun çarpışma şiddetinden nasıl etkilendiğini değerlendirmek için oluşturulmuş bir parametredir. Taşıtın, otokorkuluk sistemine çarpması sonucu taşıt içindeki yolcuya bir momentum aktarımı olur. Bu momentumun etkisi ile yaya, bir yüzeye çarpana kadar hareketini devam ettiren, üç boyutlu uzayda serbest hareket edebilen bir kütle (baş) olarak kabul edilir. THIV indeksi değerinin büyüklüğü, taşıtın otokorkuluk sistemine çarpma şiddetini değerlendirmede sağlanması gereken bir ölçüttür. THIV hesaplanmasında, taşıtın otokorkuluk sistemine temas ettiği anda, taşıtın ve taşıt içindeki teorik kütlenin (baş) hızlarının (V_0) aynı olduğu ve taşıt hareketinin "tam ötelenme" olduğu kabul edilir. THIV değeri taşıtın devrilmediği senaryo için geçerlidir. Taşıtın sadece yatay hareket ettiği düşünülür. Yunuslanma, yuvarlanma ve düşey hareket ihmal edilir.

Taşıtın içerisindeki, taşıt kütle merkezine yakın bir "C" noktasına yerleştirilen açısal hız sensöründen ölçümler alınır. Belirlenen referans koordinat sisteminde (Şekil 1.4) taşıtın *x* (yuvarlanma) ve *y* (yunuslama) eksenlerinde dönmediği fakat *z* (yalpalama) ekseni etrafında bir "ψ" açısı kadar serbestçe dönebildiği kabul edilir. Bunu sebebi *x* ve *y* eksenlerindeki dönüşlerin ihmal edilebilecek düzeyde olması ve etkin dönmenin *z* ekseni etrafında olmasıdır. "C" noktasında *x* ve *y* doğrultularında α_x ve α_y değerleri ölçülür. İlgili standartta paylaşılan taşıt ve yere ait referans koordinat sistemini açıklar görsel Şekil 1.4'de verilmiştir.

Taşıt içerisindeki teorik başın çarpacağı düşünülen yüzeylerin düz olduğu kabul edilmektedir. İlgili yüzeylerin, *x* ve *y* eksenlerine dik olduğu kabul edilmektedir. Teorik başın başlangıç konumundaki *x* ve *y* eksenlerine uzaklıkları sırası ile "D_x" ve "D_y" olarak ifade edilir. Çarpma mesafelerinin standart değerleri; D_x=0,6 m, D_y=0,3 m olarak kabul edilir. İlgili "D_x" ve "D_y" değerlerinin açıklamalı gösterimi Şekil 1.5'de paylaşılmıştır. Teorik baş çarpma meafesini değerleri olan "D_x" ve "D_y" değerleri THIV (Teorik Baş Çarpma Hızı) indeksinin hesaplanmasında kullanılcaktır. Teorik kütlenin (baş) uçuş süresi, teorik başın varsayılan üç yüzeyden (Şekil 1.5) birine çarpma anına kadar geçen bir "*t*" süredir. Teorik baş uçuş süresi değerleri olan "*t*" değeri THIV indeksinin hesaplanmasında kullanılcaktır. İlgili baş çarpma süresi değeri ve THIV indeksinin hesaplanmasına dair detaylı bilgiler takip eden kısımlarda paylaşılacaktır.



Şekil 1.4 : Referans koordinat sistemi (TS EN 1317-1, 2011, s.14).



Şekil 1.5 : Teorik başın sol yana çarpması (TS EN 1317-1, 2011, s.16).

THIV değerinin hesaplanmasında kullanılan sıralı bir dizi formül aşağıda açıklamaları ile birlikte verilmiştir. THIV değerinin hesaplanmasında kullanılan yalpalama açısı değeri denklem 1.6'da verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\psi = \int \dot{\psi}\ dt \tag{1.6}$$

THIV değerinin hesaplanmasında kullanılan, yer koordinatındaki ivmesi, sırası ile denklem 1.7, denklem 1.8 ve denklem 1.9'da verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \ddot{X}_C &= a_x \cos\psi - a_y \sin\psi \\ \ddot{Y}_C &= a_x \sin\psi - a_y \cos\psi \end{aligned} \tag{1.7}$$

Denklem 1.8'de, denklem 1.7'deki bağıntılar ile hesaplanan ivme değerlerinin integralleri alınır. Bu işlem sırasında yerçekimi ivmesinin biriminin "m/s^2" olması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{X}_C &= \int_0^t \ddot{X}_C dt \\ \dot{Y}_C &= \int_0^t \ddot{Y}_C dt \\ X_C &= \int_0^t \dot{X}_C dt \\ Y_C &= \int_0^t \dot{Y}_C dt \end{aligned} \tag{1.8}$$

Teorik başın, taşıt koordinatlarına göre konumu ve hızı, denklem 1.9'da verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} x_b(t) &= (x_0 - X_C)\cos\psi + (y_0 - Y_C)\sin\psi \\ y_b(t) &= (x_0 - X_C)\sin\psi + (y_0 - Y_C)\cos\psi \end{aligned} \tag{1.9}$$

Teorik başın taşıt referans koordinat sistemine göre hız koordinatları, denklem 1.10'da verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x}_b(t) &= -X_C \cos\psi - Y_C \sin\psi + y_b(t)\dot{\psi} \\ \dot{y}_b(t) &= X_C \sin\psi - Y_C \cos\psi + x_b(t)\dot{\psi} \end{aligned} \tag{1.10}$$

Denklem 1.11'deki bağıntıları sağlayan en küçük "*t*" değeri bulunur.

$$Minimum = \begin{cases} x_b(t) = D_x + x_0, \\ y_b(t) = D_y, \\ y_b(t) = -D_y \end{cases} \tag{1.11}$$

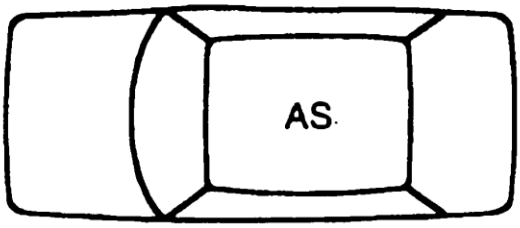
THIV değeri denklem 1.12'de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır. THIV indeksi değeri virgülden sonra en az iki hane olacak şekilde "km/saat" biriminde hesaplanır. Tam sayı olacak şekilde yuvarlanarak nihai THIV indeksi değeri elde edilir.

$$THIV = \left[x_b^2(t) + y_b^2(t)\right]^{0,5} \tag{1.12}$$

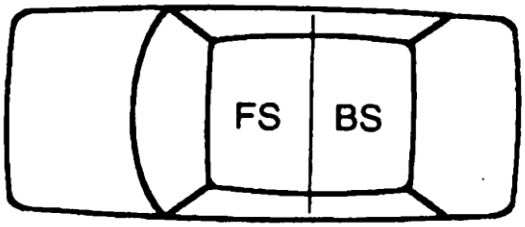
Sürücü ve Yolcu Mahalli Şekil Değiştirme İndeksi (VCDI/Vehicle Cockpit Deformation Index), taşıtın otokorkuluk sistemine çarpması ile oluşan hasarı tanımlayabilmek adına oluşturulmuş, taşıt içi deformasyonların standartlaştırılmış tarifini veren bir indekstir. VCDI, iki alfabetik ve yedi sayısal karakterden oluşan bir indekstir. VCDI indeksi sadece otomobillerin kullanıldığı çarpışma test tipleri için kullanılır. Bu indeks, taşıt iç mahallinde çarpışma etkisiyle gerçekleşen deformasyonun konumunu ve büyüklüğünü ifade etmekte kullanılır. Taşıta göre şekil değiştirmelerin konumu iki alfabetik karakter ile belirtilir. Şekil değiştirmelerin taşıta göre bölgesel konumlarını belirtir görsel Şekil 1.6'da paylaşılmıştır. Şekil değiştirmelerin büyüklüğü, yedi adet alt indeks (a, b, c, d, e, f, g) ile ifade edilir. Bu indeksler, sürücü ve yolcu mahallinde, çarpışma sonrası gerçekleşen belirlenmiş yedi adet iç boyuttaki azalmaları yüzde olarak ifade eder. İlgili alt indeksler Şekil 1,7'deki açıklamalı görsel ile paylaşılmıştır. Şekil 1.7'de belirtilen indeksler, en büyük şekil değiştirmeyi veren konuma göre ölçülmelidir. Belirlenen alt indeks değerleri boyutsal azalma yüzdelerine göre; 0, 1, 2 ve 3 rakamlarından biri ile ifade edilir. Alt indekslere ait değerlendirme kriterleri Çizelge 1.2'de paylaşılmıştır.

Çizelge 1.2 : VCDI alt indeks değerlendirme kriterleri (TS EN 1317-1, 2011, s.20).

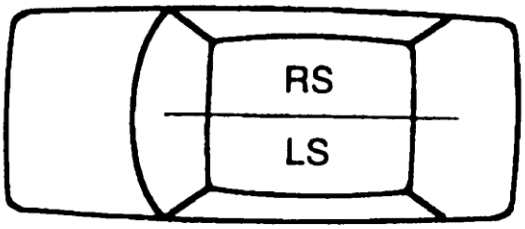
Boyutsal azalma miktarı oranları	VCDI alt indeks değeri
Boyutsal azalma≤ %3	0
%3 < Boyutsal azalma ≤ %10	1
%10 < Boyutsal azalma ≤ %20	2
Boyutsal azalma > %20	3
Boyutsal artış olması durumunda	0
Ölçüm yapılamayacak derecede büyük boyutsal azalma	3



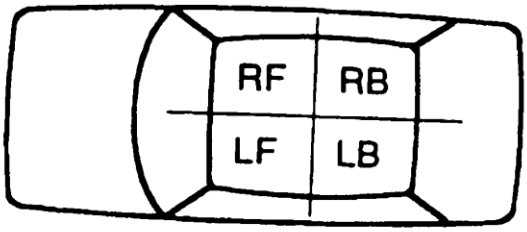
a) Bütün koltuklar: XX = AS



b) Ön koltuklar: XX = FS; Arka koltuklar: XX = BS

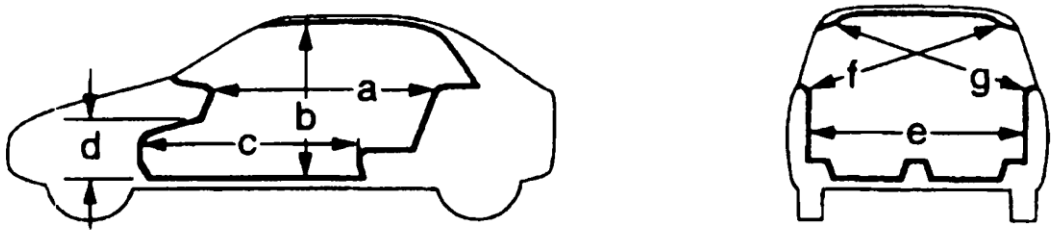


c) Sağ koltuklar: XX = RS; Sol koltuklar: XX = LS



d) Sağ ön: XX = RF; Sağ arka: XX = RB
Sol ön: XX = LF; Sol arka: XX = LB

Şekil 1.6 : Şekil değiştirmelerin taşıta göre konumları (TS EN 1317-1, 2011, s.19).



Açıklamalar:

a: Taşıtın arka koltuğu ile ön göğüs bölgesi arasındaki minimum mesafe,

b: Taşıt tavan paneli ile taban paneli arasındaki minimum mesafe,

c: Motor paneli ile arka koltuk ön bölgesi arasındaki minimum mesafe,

d: Taban paneli ile taşıt alt göğüs bölgesi arasındaki minimum mesafe,

e: Yan camların alt bölgeleri arasındaki minimum iç mesafe,

f: Sol camın üst köşesi ile sağ camın alt köşesi arasındaki minimum mesafe,

g: Sağ camın üst köşesi ile sol camın alt köşesi arasındaki minimum mesafe,

Şekil 1.7 : Yolcu mahalli iç boyutları (TS EN 1317-1, 2011, s.20).

1.3.2 EN 1317-2 (Yol Güvenlik Sistemleri - Bölüm-2)

Otokorkuluk sistemlerinin deneysel metotlarla incelenmesi adına gerekli standart ve koşullar TS EN 1317-2 standardında belirtilmiştir. Standart otokorkuluk sistemlerini değerlendirmek için temel kriterleri belirlemektedir. İlgili standartta, otokorkuluk sistemleri için üç temel kritere ait performans seviyeleri belirlenmiştir. Bu performans seviyeleri; yolda tutma performans seviyesi, çarpma şiddeti performans seviyesi, çalışma genişliği performans seviyesi ve taşıt girme mesafesidir. Standarda göre, taşıt girme mesafesi (VCDI) kabul kriteri değildir.

Otokorkuluk sistemlerinin tasarımında öncelikle yolda tutma performans kriteri belirlenmelidir. Otokorkuluk sisteminin kullanılacağı karayolu bölgesine göre yolda tutma performans seviyesi de değişmektedir. Yolda tutma performans seviyesi kriterleri otokorkuluk sistemlerinin kullanım amacına göre şekillenen gereklilikler doğrultusunda oluşturulmuştur. Karayolunda, taşıtın yoldan çıkması durumunda oluşacak risk değerlendirmesi sonucu otokorkuluk sistemlerinin yolda tutma seviyeleri şekillenmektedir. Risk faktörünün büyüklüğüne göre daha yüksek yolda tutma performans seviyesine sahip bir otokorkuluk sistemi tasarlamak gerekmektedir. Yolda tutma performans seviyeleri Çizelge 1.3'de paylaşılmıştır.

Çizelge 1.3 : Yolda tutma performans seviyeleri (TS EN 1317-2, 2011, s.3).

Yolda tutma seviyeleri		Kabul deneyi
Düşük açıyla yolda tutma	T1	TB 21
	T2	TB 22
	T3	TB 41 ve TB 21
Normal seviyede yolda tutma	N1	TB 31
	N2	TB 32 ve TB 11
Yüksek seviyede yolda tutma	H1	TB 42 ve TB 11
	L1	TB 42 ve TB 32 ve TB 11
	H2	TB 51 ve TB 11
	L2	TB 51 ve TB 32 ve TB 11
	H3	TB 61 ve TB 11
	L3	TB 61 ve TB 32 ve TB 11
Çok yüksek seviyede yolda tutma	H4a H4b	TB 71 ve TB 11 TB 81 ve TB 11
	L4a L4b	TB 71 ve TB 32 ve TB 11 TB 81 ve TB 32 ve TB 11

Not 1 - Düşük açıyla yolda tutma seviyeleri, sadece geçici güvenlik bariyerleri için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Geçici güvenlik bariyerleri, daha yüksek yolda tutma seviyeleri bakımından da deneye tabi tutulabilir.

Not 2 - Verilen bir yolda tutma seviyesi için yapılan deneyde geçerli bulunmuş bir bariyerin, N1 ve N2 seviyelerinin T3 seviyesini, H seviyelerinin L seviyelerini ve H1,…, H4b seviyelerinin de N2 seviyesini kapsamaması haricinde, herhangi bir alt seviyeye ait gerekleri karşıladığı kabul edilmelidir.

Not 3 - Çok yüksek seviyede yolda tutma sağlayan güvenlik bariyerleri, farklı ülkelerde deneye tabi tutulurken ve geliştirilirken oldukça farklı tipte ağır taşıtlar kullanıldığından, TB 71 ve TB 81 deneylerinin her ikisi de standardın bu baskısına dâhil edilmiştir. Yolda tutma seviyeleri H4a ve H4b birbirine eşdeğer kabul edilmediği gibi, aralarında da hiyerarşik bir düzen bulunmamaktadır. Aynı durum yolda tutma seviyeleri L4a ve L4b için de geçerlidir.

Not 4 - Yolda tutma L sınıfları, kendilerine karşılık gelen H sınıfları için belirlenen deneylere, TB 32 deneyi ilave edilerek geliştirilmiş sınıflardır.

Otokorkuluk sistemleri EN-1317-2'de belirtilen test tiplerine göre tam ölçekli çarpışma testlerine tabi tutulmaktadır. Bu test tipleri yolda tutma performans seviyesi kriterine göre seçilerek uygulanmaktadır. Test tipleri farklı çarpma açıları, çarpma hızları, taşıt tip ve kütlelerine göre sınıflandırılmaktadır. Otokorkuluk sistemleri

çarpışma testi tipleri Çizelge 1.4'de paylaşılmıştır. Çizelge 1.4'e göre seçilen test tipleri, Çizelge 1.3'de paylaşılan çarpışma test tipi özelliklerine göre uygulanmalıdır.

Çizelge 1.4 : Çarpışma test tipleri ve özellikleri (TS EN 1317-2, 2011, s.2).

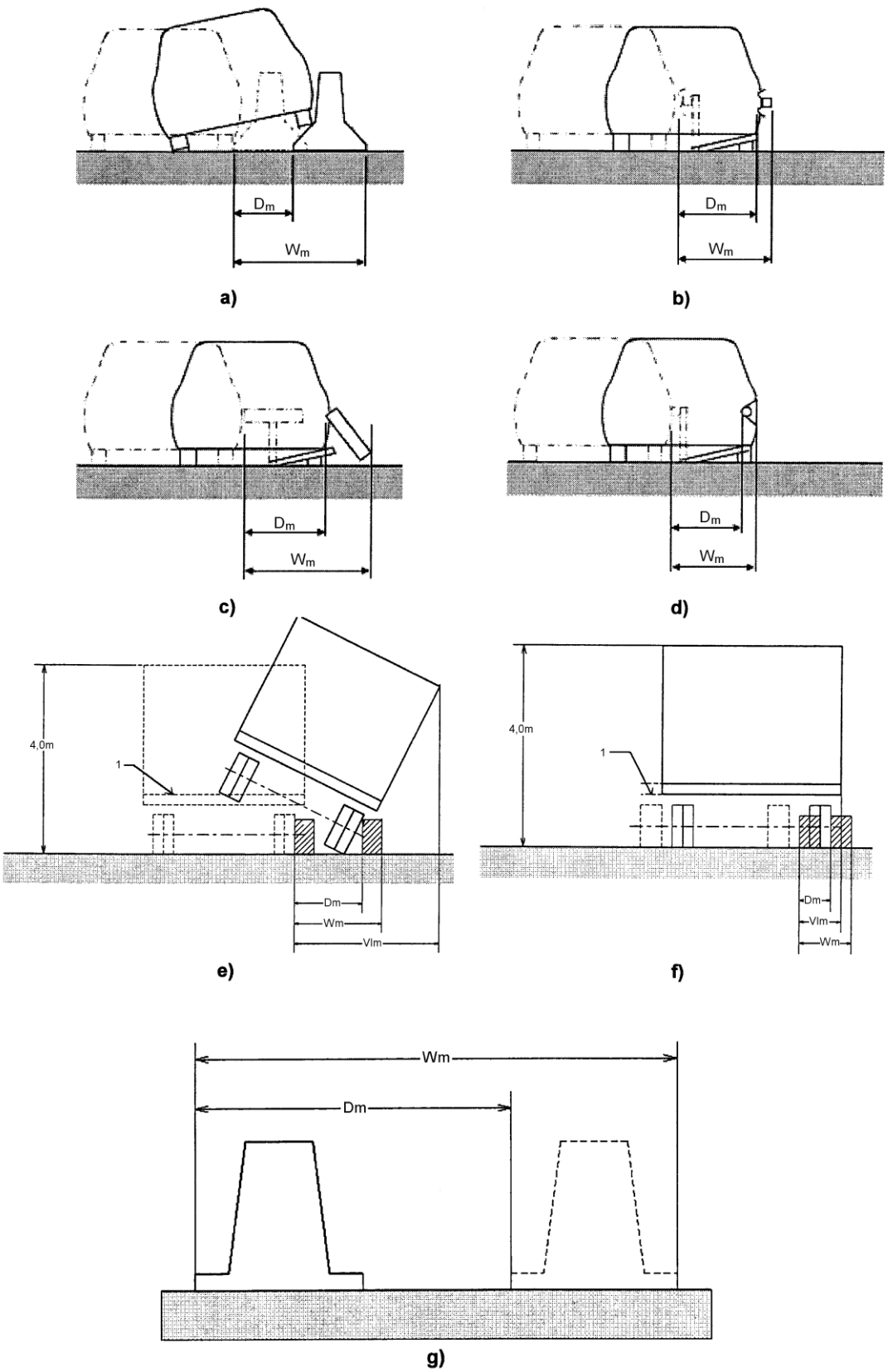
Deney	Çarpma hızı km/h	Çarpma açısı °	Toplam kütle kg	Taşıt tipi
TB11	100	20	900	Otomobil
TB21	80	8	1 300	Otomobil
TB22	80	15	1 300	Otomobil
TB31	80	20	1 500	Otomobil
TB32	110	20	1 500	Otomobil
TB41	70	8	10 000	Rijit HGV
TB42	70	15	10 000	Rijit HGV
TB51	70	20	13 000	Otobüs
TB61	80	20	16 000	Rijit HGV
TB71	65	20	30 000	Rijit HGV
TB81	65	20	38 000	Römorklu HGV

Çarpma şiddet performans seviyesini değerlendirmede ASI ve THIV indeksleri kullanılmaktadır. ASI indeksi "0" ile "1,9" arasında değerler alabilen boyutsuz bir indekstir. ASI indeksinin "1,9" değerinin üzerinde bir değer alması durumunda çarpışma testi başarısız sayılmaktadır. İlgili standartta, ASI indeksi değerine göre "A", "B", ve "C" olmak üzere üç adet çarpışma şiddet sınıfı vardır. Çarpma şiddeti sınıfları ve sınır ASI değerleri, Çizelge 1.5'de paylaşılmıştır. Bu çarpma şiddet seviyeleri içerisinde, "A" değerinden "C" değerine doğru gidildiğinde çarpma şiddet seviyesi azalmaktadır. "A" en güvenli çarpma şiddet seviyesini ifade etmektedir.

Çizelge 1.5 : Çarpma şiddeti performans seviyeleri (TS EN 1317-2, 2011, s.2).

Çarpma şiddeti seviyesi	İndeks değerleri		
A	ASI ≤ 1,0	ve	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI ≤ 1,4		
C	ASI ≤ 1,9		

Çarpışma testi esnasında, çarpışma etkisinden dolayı otokorkuluk sisteminde şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu şekil değiştirmeler dinamik yer değiştirme (D_m), çalışma genişliği (W_m) ve taşıt girme mesafesi (VI_m) olarak ifade edilir. Dinamik yer değiştirme (D_m), çalışma genişliği (W_m) ve taşıt girme mesafesi (VI_m) şematik gösterimleri Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8 : D_m (dinamik yer değiştirme), W_m (çalışma genişliği), VI_m (taşıt girme mesafesi) ölçüm değerleri (TS EN 1317-2, 2011, s.7).

1: Platform

Dinamik yer değiştirme (D_m), otokorkuluk sisteminin karayolu tarafındaki en uç noktasında çarpışma etkisi ile oluşan maksimum yatay yer değiştirmeyi ifade eder. Çalışma genişliği (W_m), otokorkuluk sisteminin çarpışma öncesi karayolu tarafındaki en uç noktası ile çarpışma sonrası otokorkuluk sisteminin yolun dış tarafına bakan yüzeyindeki en uç noktası arasındaki maksimum mesafeyi ifade eder. Standartlaştırılmış çalışma genişliği performans seviyesi, otokorkuluk sistemlerine ait çarpışma test verilerinin değerlendirilmesi için belirlenen performans seviyelerinden bir tanesidir. Çalışma genişliği performans seviyeleri, gerçekleştirilen çarpışma testi sonucunda otokorkuluk sisteminde görülen maksimum yatay der değiştirme değerine göre sınıflandırılır. Standartlaştırılmış çalışma genişliği performans seviyesi sınıfları ve değerlendirme kriterleri Çizelge 1.6'de paylaşılmıştır.

Çizelge 1.6 : Çalışma genişliği sınıfları ve seviyeleri (TS EN 1317-2, 2011, s.6).

Standardlaştırılmış çalışma genişliği seviyelerine ait sınıflar	Standardlaştırılmış çalışma genişliği seviyeleri m
*W*1	$W_N \leq 0,6$
*W*2	$W_N \leq 0,8$
*W*3	$W_N \leq 1,0$
*W*4	$W_N \leq 1,3$
*W*5	$W_N \leq 1,7$
*W*6	$W_N \leq 2,1$
*W*7	$W_N \leq 2,5$
*W*8	$W_N \leq 3,5$

Not 1 - Özel durumlarda, çalışma genişliği seviye sınıfı *W*1'den daha küçük bir sınıf belirlenebilir.

Not 2 - Dinamik yer değiştirme, çalışma genişliği ve taşıt girme mesafesi, her bir güvenlik bariyerinin kurulum şartlarının belirlenmesine ve aynı zamanda sistemin tatmin edici şekilde çalışmasını sağlamak için engeller önünde bırakılması gereken mesafelerin tarif edilmesine imkân verir.

Not 3 - Oluşan şekil değiştirme, sistemin tipi ve çarpma deneyi özelliklerinin her ikisine de bağlıdır.

Taşıt girme mesafesi (VI_m), otokorkuluk sisteminin çarpışma öncesi karayolu tarafındaki en uç noktası ile çarpışma sonrası test taşıtının yolun dış tarafına bakan yüzeyindeki en uç noktası arasındaki maksimum mesafeyi ifade eder. Taşıt girme mesafesi seviyesi sadece ağır yük taşıtlarında (HGV) uygulanan bir parametredir. Standartlaştırılmış taşıt girme mesafesi performans seviyesi sınıfları ve değerlendirme kriterleri Çizelge 1.7'de paylaşılmıştır.

Çizelge 1.7 : Taşıt girme mesafesi sınıfları ve seviyeleri (TS EN 1317-2, 2011, s.6).

Standardlaştırılmış taşıt girme mesafesi seviyelerine ait sınıflar	Standardlaştırılmış taşıt girme mesafesi seviyeleri m
*VI*1	$VI_N \leq 0,6$
*VI*2	$VI_N \leq 0,8$
*VI*3	$VI_N \leq 1,0$
*VI*4	$VI_N \leq 1,3$
*VI*5	$VI_N \leq 1,7$
*VI*6	$VI_N \leq 2,1$
*VI*7	$VI_N \leq 2,5$
*VI*8	$VI_N \leq 3,5$
*VI*9	$VI_N > 3,5$
Not 1 - Özel durumlarda, taşıt girme mesafesi seviye sınıfı *VI*1'den daha küçük bir sınıf belirlenebilir.	
Not 2 - Dinamik yer değiştirme, çalışma genişliği ve taşıt girme mesafesi, her bir güvenlik bariyerinin kurulum şartlarının belirlenmesine ve aynı zamanda engeller önünde bırakılması gereken mesafelerin tarif edilmesine imkân verir.	

Otokorkuluk sistemlerinin performans değerlendirmesinde ilk adım, yolda tutma performans seviyelerinin belirlenmesidir. İkinci olarak, seçilen yolda tutma performans seviyesine göre Çizelge 1.3'den çarpışma test tipleri belirlenmeli ve testler Çizelge 1.4'de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilmelidir. Gerçekleştirilen çarpışma testleri sonucunda; çarpma şiddeti performans seviyesi ve çalışma genişliği performans seviyesi, Taşıt girme mesafesi ve otokorkuluk sisteminin çarpışma davranışı parametreleri değerlendirmeye tabi tutulur. Otokorkuluk sistemleri için ilgili standartta paylaşılan performans değerlendirmesin parametreler Çizelge 1.8'de paylaşılmıştır. Çizelge 1.8'e göre yapılan değerlendirmeler sonucunda en elverişsiz verilere göre otokorkuluk sistemi sınıflandırılır.

Otokorkuluk sistemlerinin, taşıtın çarpması ile oluşacak momentum etkisinde, boyuna doğrultuda uzanan ana elemanlarında (dikme, ray vb.) tam kopma olmaksızın çarpışmaya dayanması ve aracı karayoluna döndürebilecek nitelikte olması gerekmektedir. Otokorkuluk sistemi elemanları çarpışma etkisi ile taşıt iç mahalline girmemelidir. Otokorkuluk sistemleri taşıt yolcu kabininde yolcuya zarar verebilecek nitelikte bir deformasyona sebep olmamalıdır. Çarpışma esnasında ve sonrasında, otokorkuluk sistemine çarpan test aracının en fazla bir adet tekerleğinin otokorkuluk sisteminin altından veya üstünden bariyerin diğer tarafına geçmesine izin verilebilir.

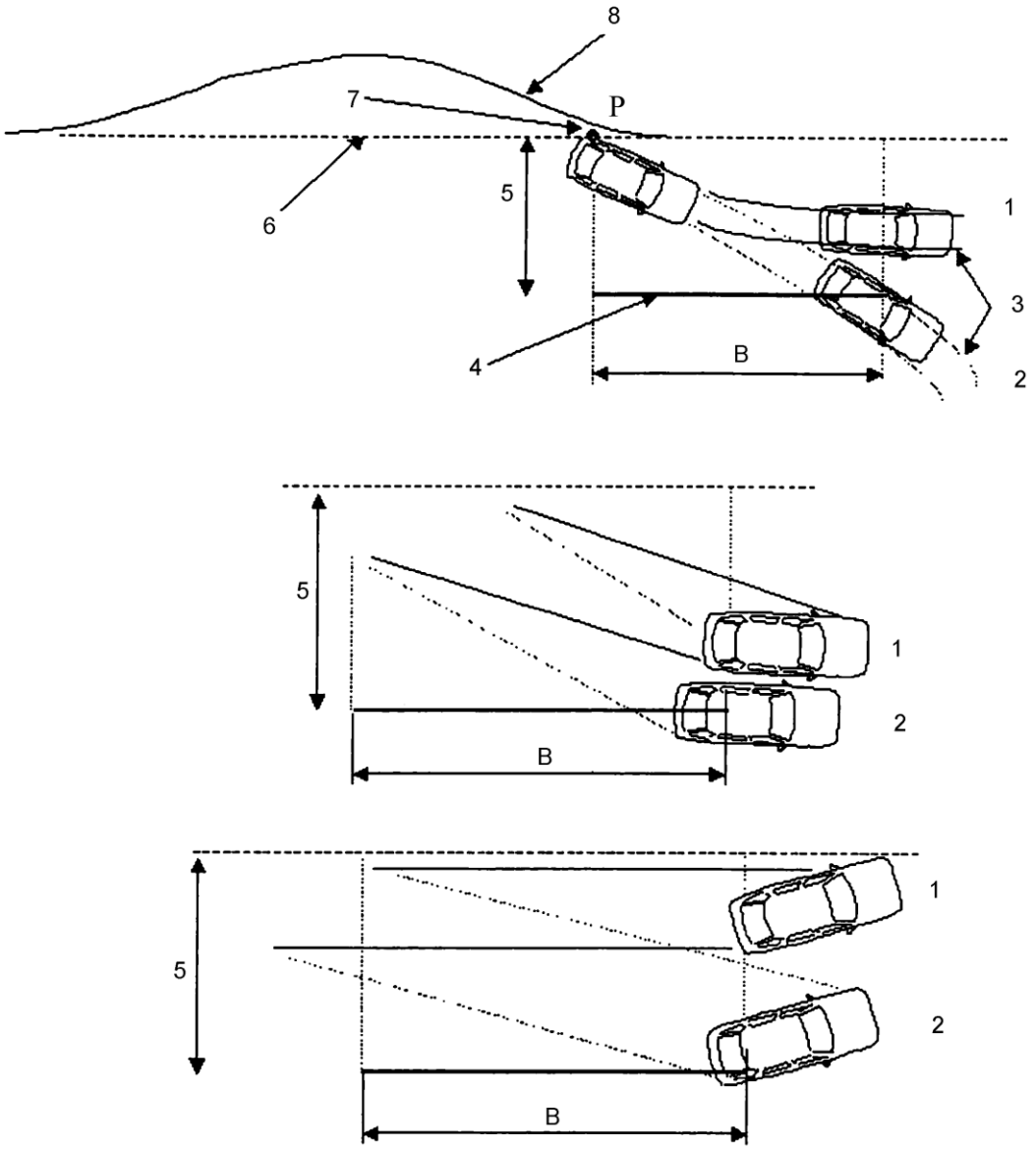
Çizelge 1.8 : Otokorkuluk sistemi deney parametreleri (TS EN 1317-2, 2011, s.8).

Yolda tutma seviyesi	PARAMETRELER			
	Taşıt parapeti dâhil güvenlik bariyerinin ve taşıtın davranışı	Çarpma şiddeti seviyesi ASI-THIV	Taşıtta oluşan şekil değiştirme (VCDI)	Taşıt parapeti dâhil güvenlik bariyerinde oluşan şekil değiştirme
T1	TB 21	TB 21	TB 21	TB 21
T2	TB 22	TB 22	TB 22	TB 22
T3	TB 41 + TB 21	TB 21	TB 21	TB 41 + TB 21
N1	TB 31	TB 31	TB 31	TB 31
N2	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 32 +TB 11
H1	TB 42 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 42 + TB 11
H2	TB 51 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 51 + TB 11
H3	TB 61 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 61 + TB 11
H4a	TB 71 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 71 + TB 11
H4b	TB 81 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 81 + TB 11
L1	TB 42 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 42 + TB 32 + TB 11
L2	TB 51 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 51 + TB 32 + TB 11
L3	TB 61 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 61 + TB 32 + TB 11
L4a	TB 71 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 71 + TB 32 + TB 11
L4b	TB 81 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11 [a]	TB 32 + TB 11	TB 81 + TB 32 + TB 11
Not - VCDI bir kabul kriteri değildir.				
[a] Şiddet seviyesi, deneylerden elde edilen en büyük değerler vasıtasıyla belirlenir. Deney raporunda bulunacak tüm sonuçlar, Ek A'da ayrıntılı şekilde verilmiştir.				

İlgili standartta, çarpışma sonrası taşıtın içerisinde kalması gerekli dikdörtgen bir alan belirtilmiştir. Bu dörtgen alanın oluşturulması için "A" ve "B" olmak üzere iki adet teorik mesafe belirlenmiştir. Taşıtın içinde kalması gereken alanın otokorkuluk sistem hattı boyunca uzanan boyutu "B" mesafesidir. Diğer otokorkuluk sistemine dik boyutu ise "A" mesafesi, araç genişliği ve taşıt uzunluğunun yüzde 16'sının toplanmından oluşur. Standartlaştırılmış teorik "A" ve "B" mesafeleri Çizelge 1.9'da verilmiştir. Taşıtın otokorkuluk sistemine çarpması sonrasındaki hareketini boyutları standartta belirtilmiş bu dörtgen alanda devam ettirmesi gerekmektedir. Bu alanın dışına çıkması durumunda çarpışma testi başarısız sayılmaktadır. Ayrıca taşıtın otokorkuluk sistemine takılması durumunda da çarpışma testi başarısız sayılmaktadır. Taşıt için çarpışma sonrası hareketi gösterir şematik çizim Şekil 1.9'da paylaşılmıştır.

Çizelge 1.9 : Çarpışma sonrası hareket alanı boyutları (TS EN 1317-2, 2011, s.9).

Taşıt tipi	A m	B M
Otomobil	2,2	10
Diğer taşıtlar	4,4	20



Açıklamalar:

1: “Test Kabul”

2: “Test Ret”

3: Tekerlek izleri

4: Çarpışma sonrası hareket alanı sınırı

5: “A” mesafesi+taşıt genişliği+taşıt uzunluğunun %16’sı

6: Otokorkuluk sisteminin trafiğin aktığı tarafa bakan başlangıç yüzü

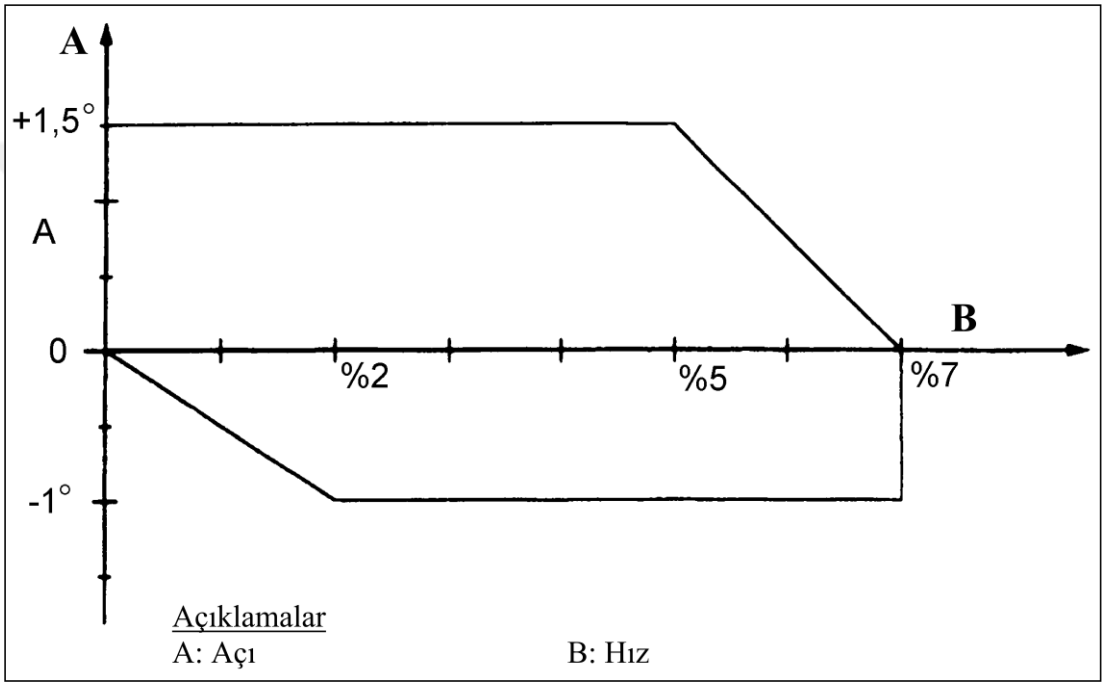
7: P noktası.

8: Otokorkuluk sisteminin, otokorkuluk genişliği dahil yanal yer değiştirmesi

B: Otokorkuluk sisteminin aşağı ucuna en yakın noktadan(son “P” noktasına) olan mesafe

Şekil 1.9 : Taşıt çarpışma sonrası hareket sınır koşulları (TS EN 1317-2, 2011, s.10).

Otokorkuluk sistemlerinin çarpışma test düzeneklerinde çarpışma açısı ve çarpışma hızı için standartta tolerans değerler belirtilmiştir. Çarpışma testinde aracın otokorkuluk sistemine çarpma açısındaki değişim, Çizelge 1.4'de verilen deney açısına göre en fazla +1,5/-1 derece kadar olabilir. Çarpışma testinde, aracın otokorkuluk sistemine çarpma hızı, Çizelge 1.4'de verilen çarpma hızının en fazla %7'si kadar üzerine çıkabilir. Çizelge 1.4'de verilen çarpışma hızının altında bir çarpışma hızı kabul edilmez. Çarpışma açısı ve hızında birleşik bir sapma olması durumunda sapma değerleri Şekil 1.10'da verilen abağa göre değerlendirilmelidir.



Şekil 1.10 : Birleşim sapma sınır değer hesap abağı (TS EN 1317-2, 2011, s.13).

1.4 Literatür Araştırması

Bu çalışmada, yolda tutma seviyesi H1 (yüksek seviyede yolda tutma) olan bir otokorkuluk sisteminin durumu TS EN 1317 standardına göre incelenmiştir. Çarpışma anı otokorkuluk sistem davranışı non-linear dinamik analizi, tam ölçekli LS DYNA sonlu elemanlar modeli ile irdelenmiştir. Bu modellerde H1 yolda tutma performans seviyesi için TS EN 1317 standardında gerekli görülen TB11 ve TB42 çarpışma testleri sanal ortamda simüle edilmiştir. Aynı zamanda bu çarpışma testleri tam ölçekte de gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA modelinden elde edilen sanal simülasyon verileri gerçek hayatta gerçekleştiren tam ölçekli test verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda bilgisayar simülasyonları ve tam ölçekli çarpışma testi karşılaştırmalı

sonuçları, sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen simülasyon sonuçlarının doğruluğunu kanıtlamıştır. Sonlu elemanlar analiz simülasyonlarının, tam ölçekli test maliyetlerini azaltmada kolaylıkla kullanabileceği sonucuna varılmıştır (Vesenjak ve diğ, 2007).

Jersey tipi beton otokorkuluk sistem yüksekliklerinin araç stabilizasyonuna etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada LS-DYNA paket programı ile oluşturulmuş sonlu elemanlar analiz simülasyonları kullanılmıştır. On tonluk ve 38 tonluk ağır vasıtalarla yapılan simülasyon çalışmaları sonucu, optimum beton otokorkuluk sistem yüksekliği 1050 mm olarak bulunmuştur. Daha düşük yükseklikte tasarlanmış otokorkuluk sistemlerinin 38 tonluk ağır vasıtaları tutma konusunda yetersiz kalacağı belirtilmiştir (Atahan, 2009).

Rijit köprü korumalı otokorkuluk sisteminden daha esnek bir standart otokorkuluk sistemine geçiş otokorkuluğunun, non-linear davranışı, LS-DYNA paket programı ile oluşturulan sonlu elemanlar analiz simülasyonları ve tam ölçekli çarpışma testleri ile incelenmiştir. Bu çalışma, Amerika'da, aracın takla atmasıyla başarısız sonuçlanan bir geçiş otokorkuluk sisteminin tam ölçekli çarpışma test verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA paket programı ile bu çarpışma sanal ortamda modellenmiş ve sonlu elemanlar analiz simülasyonları tam ölçekli çarpışma test verileri ile karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmiştir. Bu çalışmada ray yüksekliğinin, ilgili çarpışma testi özelinde araca takla attıran ana unsur olduğu ortaya koyulmuştur. 685 mm olan otokorkuluk ray yüksekliği artırılarak LS-DYNA simülasyonları yenilenmiş ve 810 mm ray yüksekliğinde müspet sonuçlar elde edilmiştir. Araştırma sonucu yeni otokorkuluk sistemi tasarımının kullanıma uygun olduğu görüşü belirtilmiştir (Atahan ve Cansız 2004).

Bu konu ile ilgili başka bir çalışma, tam ölçekli çarpışma testlerinin otokorkuluk sistem bileşenlerinin; yükler, ivmeler, gerilmeler ve zorlanma hakkında yeterli bilgi sağlamadığı görüşü ve bu konuda analitik yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliği üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma G2 zayıf dikmeli w putrelli otokorkuluk (G2 weak post w-beam guardrail) sistemi üzerinden yapılan çalışma ile gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada, Chevrolet marka 1994 model kamyonetin 25 derece çarpışma açısı ile otokorkuluğa çarptığı senaryo üzerinden modellemeler yapılmıştır. Bu çarpışma senaryosu, LS-DYNA3D üzerinden gerçekleştirilen non-linear eksplisit dinamik (explicit dynamic) sonlu eleman kodları üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar gerçekleştirilen tam ölçekli çarpışma testleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen ortalama sonuç değerleri, sonuçların standart sapması, simülasyon üzerinden yapılan t-istatistik değerleri ve karşılaştırmalı test eğrileri yayınlanmıştır (Marten ve diğ, 1998).

Başka bir çalışmada zayıf dikmeli otokorkuluk sistemlerinin, çarpışma etkileri altında yaptığı dinamik eğilme davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile çalışan bilgisayar programları ile oluşturulan simülasyonlar ve tam ölçekli çarpışma testleri sonucunda, zayıf dikmeli otokorkuluk sistemlerinin kuvvetli dikmeli otokorkuluk sistemlerine göre çarpışma etkisi altında dinamik eğilme ile daha fazla kuvvet sönümlediği görülmüştür. Bu sebeple zayıf dikmeli otokorkuluk sistemlerinin kuvvetlilere oranla daha toleranslı (affeden) olduğu ortaya koyulmuştur. Bu tip zayıf dikmeli otokorkuluk sistemlerinin, bariyer arkasında yeterli mesafe bırakıldığında iyi performans sergilendiği görülmüştür. Bu çalışma için gerçekleştirilen çarpışma testleri NCHRP 350 (National Cooperative Highway Research Program Report 350)'ye göre gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çarpışma testinde iki ton ağırlıklı pikap araç kullanılmıştır. Testler sonucunda, bariyere takılma ve bariyerden atlama gibi olumsuz sonuçlar gözlenmiştir. Sonuçlar bilgisayarlı sonlu elemanlar simülasyon yazılımları yardımıyla irdelenmiştir. Bilgisayarlı simülasyon programlarının da yardımı ile mevcut otokorkuluk sistemi tasarımının hataları tespit edilmiş ve düzeltilmiştir. İlgili çalışmayla, zayıf dikmeli otokorkuluk sistemleri üzerine yeni düzenlemeler literatüre kazandırılmıştır (Ray ve diğ, 2001).

1.5 Otokorkuluk Sistemi Performans Seviyelerinin Belirlenmesi

Ülkemizde otokorkuluk sistemlerinin kullanımlarında Avrupa'ya Uygunluk (CE) sertifikası şart koşulmaktadır. Otokorkuluk sistemlerinin Avrupa'ya uygunluk sertifikasyon işlemleri ilgili TS EN 1317-1 ve TS EN 1317-2 standartlarında belirtilen gerekliliklerin sağlanması ile gerçekleşmektedir. İlgili standartlarda, otokorkuluk sistemlerinin değerlendirilmesinde tam ölçekli çarpışma testi şart koşulmaktadır. Bu çalışmada, tam ölçekli çarpışma testleri karmaşık eksplisit sonlu elemanlar çözümleri yapabilen bilgisayarlı simülasyon yazılımları kullanılarak sanal ortamda gerçekleştirilecektir. İlgili standartlarda, tam ölçekli çarpışma testlerinde sağlanması gereken üç temel kriter belirtilmiştir. Bu üç kriter performans seviyeleri olarak adlandırılmaktadır. Bu performans seviyeleri; Yolda tutma performans seviyesi,

çarpma şiddet performans seviyesi ve çalışma genişliği performans seviyesidir. Bu üç temel kriterin yanı sıra standartta "Taşıt Girme Mesafesi (VCDI)" adında bir diğer değerlendirme kriteri bulunmaktadır. Fakat ilgili standartlarda, VCDI otokorkuluk sistemlerinin değerlendirmesinde bir kabul kriteri olarak değerlendirilmemiştir. Otokorkuluk sistemlerinin tasarımında, ilgili performans seviyelerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Performans seviyeleri tasarımı doğrudan etkileyen etmenlerdir.

Bu çalışmada geliştirilmesi amaçlanan otokorkuluk sisteminin ağır hizmet tipi bir otokorkuluk sistemi olması yüksek yolda tutma seviyesini gerekli kılmaktadır. Bu sebeple otokorkuluk sistemi tasarımında, Yüksek yolda tutma performans seviyesi olan H4b yolda tutma seviyesi uygun görülmüştür. Yolda tutma performans seviyesi, otokorkuluk sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılacak tam ölçekli çarpışma test tiplerinin belirlenmesinde kullanılan bir parametredir.

Çalışma genişliği performans seviyesi, çarpışma öncesi otokorkuluk sisteminin yola bakan yüzeylerinin en uç bölgesi ile çarpışma sonrası yol dış tarafına bakan yüzeylerinin en uç bölgesi arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Köprü korumalı ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemleri, köprülerin yapıları gereği çalışma genişliğinin (maksimum yanal yer değiştirme) düşük olması gereken sistemlerdir. Bu sebeple otokorkuluk sistemimi için çalışma genişliği performans seviyesinin belirlenmesinde konservatif bir yaklaşım benimsenmiştir. Geliştirilmesi amaçlanan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi çalışma genişliği performans seviyesi minimum W3 olarak belirlenmiştir. W3 çalışma genişliği performans seviyesi, çarpışma öncesi otokorkuluk sisteminin yola bakan yüzeylerinin en uç bölgesi ile çarpışma sonrası yol dış tarafına bakan yüzeylerinin en uç bölgesi arasındaki mesafenin maksimum 1,3 m olabileceğini ifade etmektedir.

Çarpma şiddeti performans seviyesinin belirlenmesinde ASI ve THIV indeksleri kullanılmaktadır. ASI ve THIV indeksleri ilgili standartta paylaşılan bir sıra formülün kullanılması ile hesaplanmaktadır. ASI indeksi, çarpışmanın yolcu için şiddetini ifade etmektedir. ASI indeks "0" ile "1,9" arasında değerler alabilen nümerik bir değerdir. "1,9" değerinin üzerinde bir ASI indeksi olan otokorkuluk sistemi başarısız kabul edilir. ASI indeksinin değerine göre çarpma şiddet seviyeleri; "A", "B" ve "C" olmak üzere üç sınıf olarak belirlenmiştir. "A" en düşük çarpma şiddet seviyesini ifade ederken "C" en yüksek çarpma şiddet seviyesini ifade eder. Tasarlanan otokorkuluk

sistemi için çarpma şiddeti performans seviyesinin düşük olması amaçlanmıştır. Bu sebeple çarpışma şiddet seviyesi minimum "B" sınıfı olarak belirlenmiştir. Çarpışma şiddet seviyesinin belirlenmesinde kullanılan kriterlerinden bir diğeri THIV (Teorik Baş Çarpma Hızı) indeksidir. Çarpışma esnasında aracın içinde olan yolcunun, çarpışma etkileri ile oluşan ani hareketin hızını, dolayısı ile yolcunun çarpma şiddetini ifade eder. THIV indeksi için Standartta belirtilen azami değer 33 km/saat olarak ifade edilmiştir. Otokorkuluk sistem tasarımı THIV azami değerini aşmayacak şekilde tasarlanması amaçlanmıştır.

1.6 Otokorkuluk Sistemi İçin Çarpışma Testlerinin Belirlenmesi

İlgili standartlarda, otokorkuluk sistemleri için şart koşulan çarpışma test tipleri yolda tutma performans seviyesine göre belirlenmektedir. Teze konu ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemine uygulanacak çarpışma testi tipleri, Çizelge 1.5'e göre TB81 ve TB11 olarak belirlenmiştir. TB81 testi, Çizelge 1.4'e göre; 65 km/saat hızla seyreden, 38 tonluk römorklu HGV taşıtının otokorkuluk sistemi eksenine yirmi derece açıyla çarpması ile gerçekleştirilmektedir. Çizelge 1.5'e göre belirlenen bir diğer test olan TB11 testi, Çizelge 1.4'e göre; 100 km/saat hızla seyreden, dokuz yüz kilogramlık otomobilin, otokorkuluk sistemi eksenine yirmi derece açıyla çarpması ile gerçekleştirilmektedir.

1.7 Ağır Hizmet Tipi Otokorkuluk Sistemi Tasarım Bilgileri

1.7.1 Normal açıklık tasarım bilgileri

Yeni nesil ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımında, işlevsel bir otokorkuluk sistemi geliştirmenin yanı sıra otokorkuluk sistemin estetik kaygıları da giderecek nitelikte olması gerekliliği üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda otokorkuluk sistemi dikme aralıkları oldukça yüksek bir açıklık değeri olan 4200 mm olarak belirlenmiştir. Böylelikle köprü geçişlerinde geniş bir görüş aralığı elde edilmiştir.

Geliştirilen otokorkuluk sistemi tasarımının, düşük maliyetli bir tasarım olması ana yönelimlerden birisi olarak belirlenmiştir. Seçilen geniş dikme aralığı, hem çelik malzeme miktarını hem de montaj işçiliğini azaltarak maliyete pozitif katkı yapan etmenlerden birisidir. Bunun yanı sıra tasarlanan takoz sistemi, çarpışma anındaki

momentumun bir kısmını emerek mafsallaşan bir bağlantı şeklinde tasarlanmıştır. İlgili sistem, çarpışma etkilerini emerek daha az yapısal çelik kullanma konusunda maliyet azaltımı yapan bir diğer etmendir. Tüm tasarım optimizasyon çalışmaları sonucunda, otokorkuluk tasarımında kullanılan yapısal çelik eleman miktarı minimuma indirilmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen işlevsel ağır hizmet tipi otokorkuluk tasarımının ağırlığı 107,39 kg/metre olarak elde edilmiştir.

TB81 testine tabi tutulacak teze konu otokorkuluk sistemi için otokorkuluk sistemi yüksekliği önemli bir parametredir. Taşıtın otokorkuluk sistemini aşıp yol bölgesini terk etmesini önlemek adına yüksek bir sistem yüksekliği seçilmiştir. Otokorkuluk sistemi tasarım bilgileri Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'de paylaşılmıştır.

Dikmelerin ana görevi raylardan aktarılan kuvvetlerin etkisine karşı koyarak rayların konumlarını korumasını sağlamaktadır. Otokorkuluk sistemi dikme elemanları, çarpışma etkilerini ilk olarak karşılayan yol doğrultusunda uzanan ray elemanlardan gelen kuvvetleri karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Teze konu olan otokorkuluk sistemi tasarımı 38 tonluk bir aracın çarpmasına maruz kalacağı için eğilme mukavemeti yüksek olan dikme elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Dikme aralıkları 4200 mm gibi geniş bir açıklık olarak belirlendiği için standart tasarımların daha üstünde bir eğilme mukavemetine sahip elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca tasarım aşamasında belirlenen W3 gibi düşük bir çalışma genişliği performans seviyesinin elde edilebilmesi için güçlü bir dikme eleman tasarımı elzemdir. Çalışmaya konu otokorkuluk sistemi dikme tasarımında, üç boyutlu uzayda x ve y düzlemlerinde mukavemet momentleri eşit olan SHS 200x200x3.5 kutu profil elemanlar seçilmiştir. Daha geniş çapta ve düşük et kalınlıklı bir dikme profili seçerek düşük ağırlıkta profiller ile yüksek eğilme dayanımı elde etmek amaçlanmıştır. TB11 testi sonucu belirlenecek olan çarpma şiddet seviyesinin amaçlanan derecede düşük olması için et kalınlığı düşük bir kutu profil eleman seçilmiştir. Bu şekilde dikme elemanların plastik deformasyon ile yük emme kapasitesinin yüksek olması amaçlanmıştır. Dikme profillerinin üst kısmında, dikme iç bölgesini dış etkilerden korumak için 4 mm kalınlıklı bir kapama plakası bulunmaktadır. Otokorkuluk sistemi dikme tasarım detayları Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje detay çizimleri ile paylaşılmıştır.

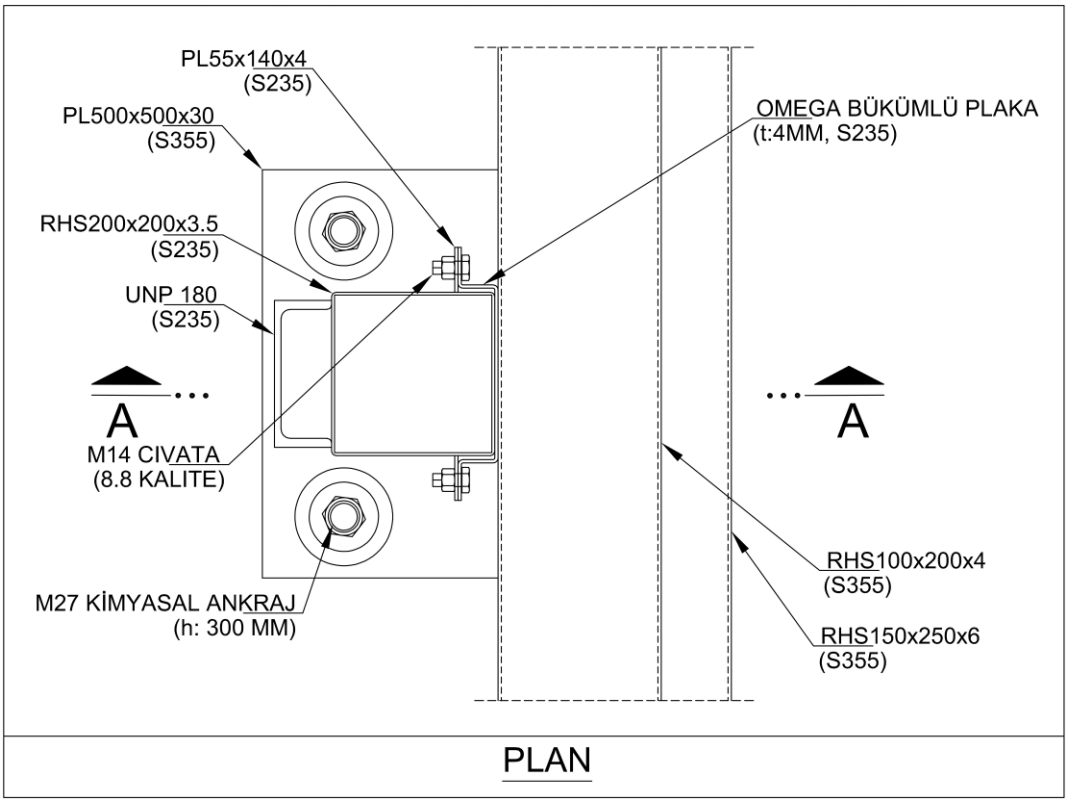
Dikmelerin bağlanacağı ankraj plakaları, dikmelerden gelen eğilme etkilerini zemine aktaracak ana elemanlardır. Yüksek eğilme momenti etkileri altında yükleri düzgün bir şekilde zemine aktarabilmesi gerekmektedir. Otokorkuluk sisteminde, 38 tonluk taşıtın çarpması esnasında dikmeden iletilen kuvvetin etkisi ile ankrajda büyük bir eğilme momenti oluşturacaktır. Bu eğilme momentine dayanabilecek nitelikte bir eleman seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde dikmeden iletilen kuvvetin etkisiyle eğilen ankraj plakası dikmelerin yatmasına sebep olacaktır. Bu durumda taşıt otokorkuluk sistemini aşarak yol dışına çıkacaktır. Böyle bir durumda test başarısızlık ile sonuçlanacaktır. Bu sebeple ankraj plakaları tasarımı için 30 mm gibi yüksek bir et kalınlığına sahip çelik plakalar uygun görülmüştür. Ankraj plakaları dört adet M27 kimyasal ankraj ile zemine bağlanmaktadır. Dikmelerin ankraj plakasına aktardığı kuvvetler kimyasal ankrajlı tij elemanlar yardımıyla zemine aktarılmaktadır. Çarpışma etkileri altında ankraj plakasının zeminden ayrılması, oluşacak kuvvetlerin otokorkuluk sistemi içerisinde orantısız bir şekilde dağılmasına sebep olacaktır. Bu sebeple ankraj tijlerinin çarpışma etkileri ile oluşan ve dikmeler tarafından aktarılan kuvvetlere elastik şekil değiştirme bölgesi içinde karşı koyması beklenmektedir. Ankraj tijleri çarpma etkisi ile oluşacak kuvvetlerin çok daha üstünde kuvvetleri dahi karşılayacak nitelikte tasarlanmıştır. Otokorkuluk sistemi ankraj tasarımı detayları Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje detay çizimleri ile paylaşılmıştır.

Dikmeler, PL500x500x30 ankraj plakalarına çepeçevre köşe kaynak ile bağlanmaktadır. Kaynak kalınlıkları, analizler sonucunda sonlu eleman element gerilmelerinden alınan veriler ışığında boyutlandırılmıştır. Kaynaklar, çarpma etkileri altında çelik elemanlarda plastik deformasyon oluşturacak kuvvetlerin üzerinde bir kuvvete dayanacak nitelikte tasarlanmıştır. Otokorkuluk sistemi kaynaklı birleşimleri Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje detay çizimleri ile paylaşılmıştır

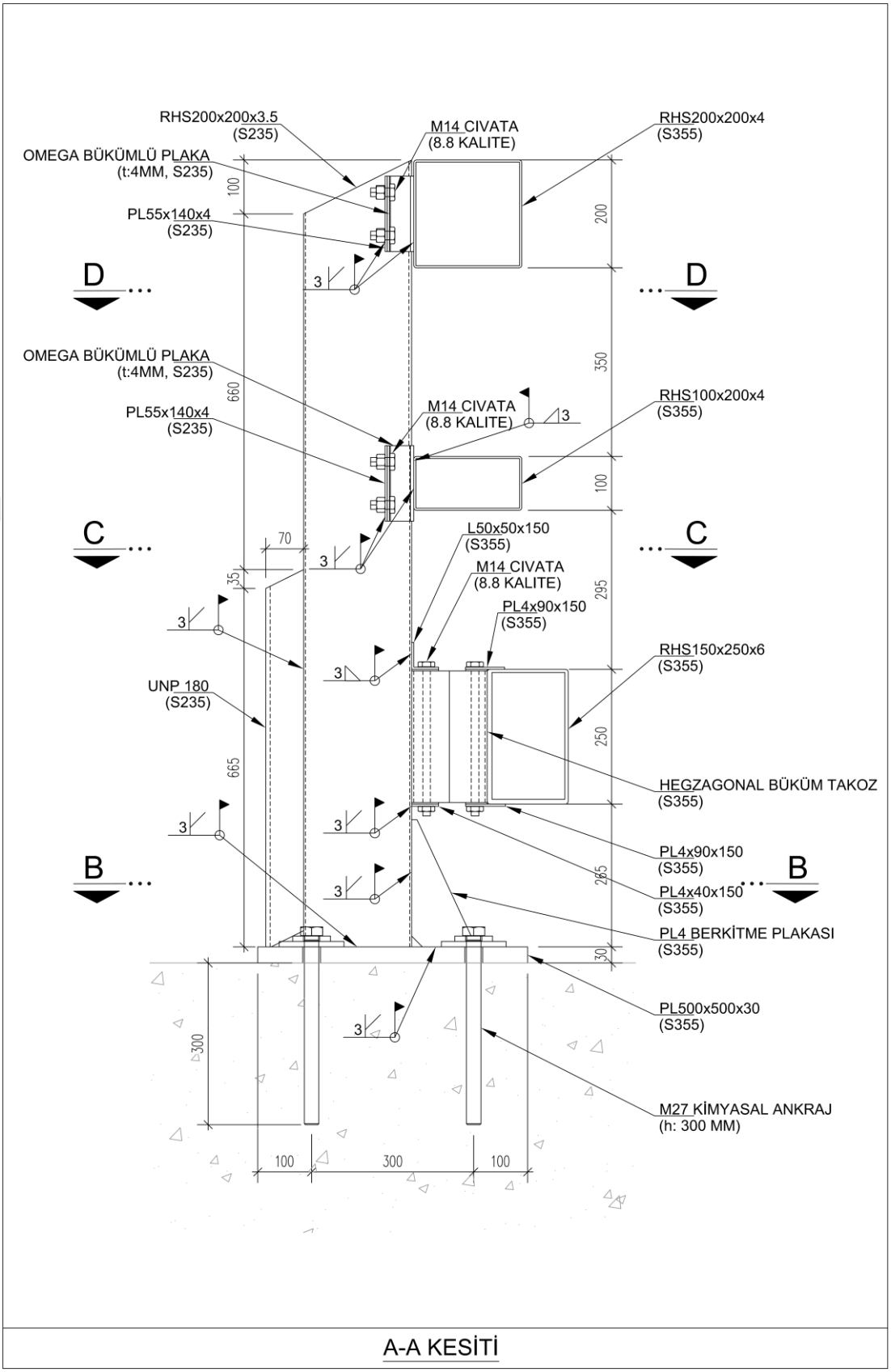
TB81 testinde kullanılan 38 tonluk taşıtın çarpma etkisi, dikme elemanlarda büyük bir ankastrelik momenti oluşturacaktır. Ayrıca raya çarpan taşıtın rayda oluşturacağı çekme kuvveti, dikmeye bir burulma etkisi vermektedir. Bu ankastrelik momentinin ve burulma momentinin karşılanabilmesi için dikme elemanlar, ankraj plakası birleşim noktasından güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme dikmenin yol dışına bakan yüzeyine, flanşları yol eksenine dik olacak şekilde yerleştiren UNP180 çelik profil eleman ve

yola bakan yüzüne eklenen iki adet 4 mm kalınlıklı üçgen berkitme plakası ile yapılmıştır. UNP180 çelik profil elemanlar ve berkitme eleman kaynakları, analizler sonucunda sonlu eleman element gerilmelerinden alınan veriler ışığında boyutlandırılmıştır. Kaynaklar, çarpma etkileri altında çelik elemanlarda plastik deformasyon oluşturacak kuvvetlerin üzerinde bir kuvvete dayanacak nitelikte tasarlanmıştır. Otokorkuluk sistemi dikme eleman güçlendirme detayları Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje çizimleri ile paylaşılmıştır.

Raylar, 38 tonluk taşıtın çarpma etkisini plastik deformasyon ile sönümleyecek ana elemanlardır. Bu çalışmada, çelik otokorkuluk sistemlerinde yaygın olarak kullanılan W ve 3N ray sistemlerini aksine kutu profil kullanılmıştır. Otokorkuluk ray sistemi üç farklı tip kutu profilin, farklı kotlarda yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Alt ray RHS150x250x6, orta ray RHS100x200x4ve üst ray SHS200x4 kutu profilden oluşmaktadır. Alt, orta ve üst ray elemanların her biri farklı görevler üstlenmektedir. Her bir ray eleman çarpışma anında farklı yüklere maruz kalmakta ve farklı çarpışma davranışları göstermektedir. Ray profilleri seçilirken bu kıstaslar göz önüne alınarak hareket edilmiştir. Otokorkuluk sistemi ray eleman tasarım detayları Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje detay çizimleri ile paylaşılmıştır.

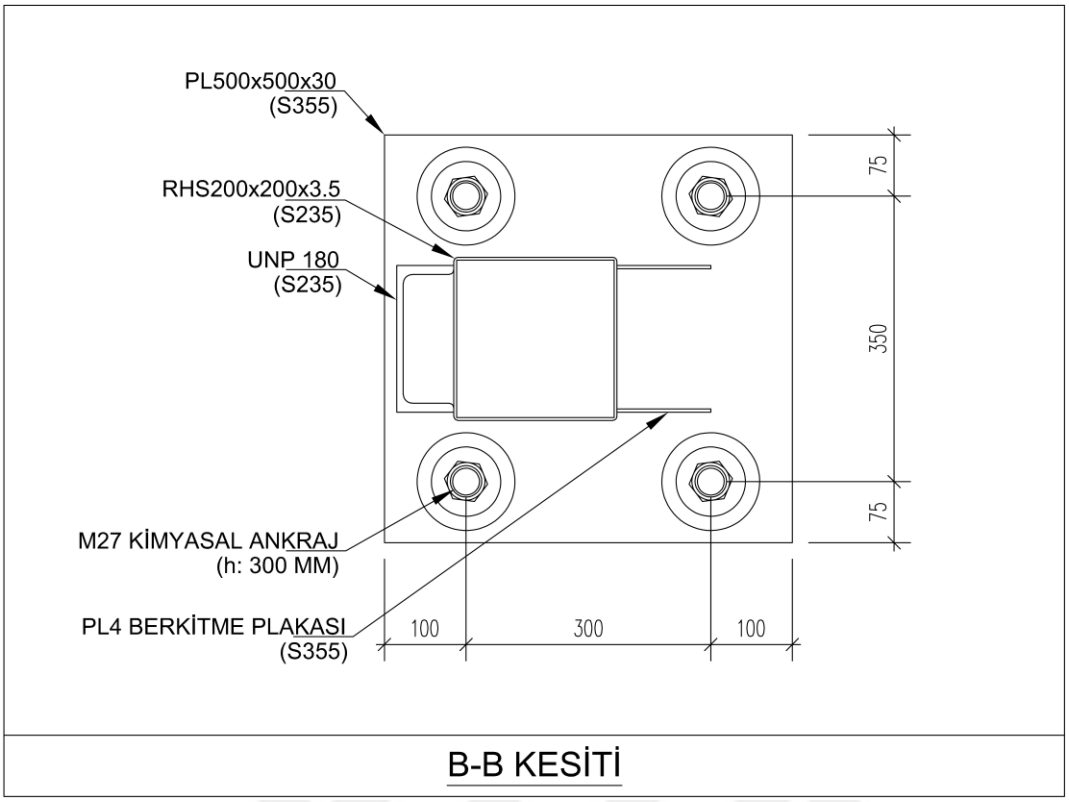


Şekil 1.11 : Otokorkuluk sistemi projesi/Plan.

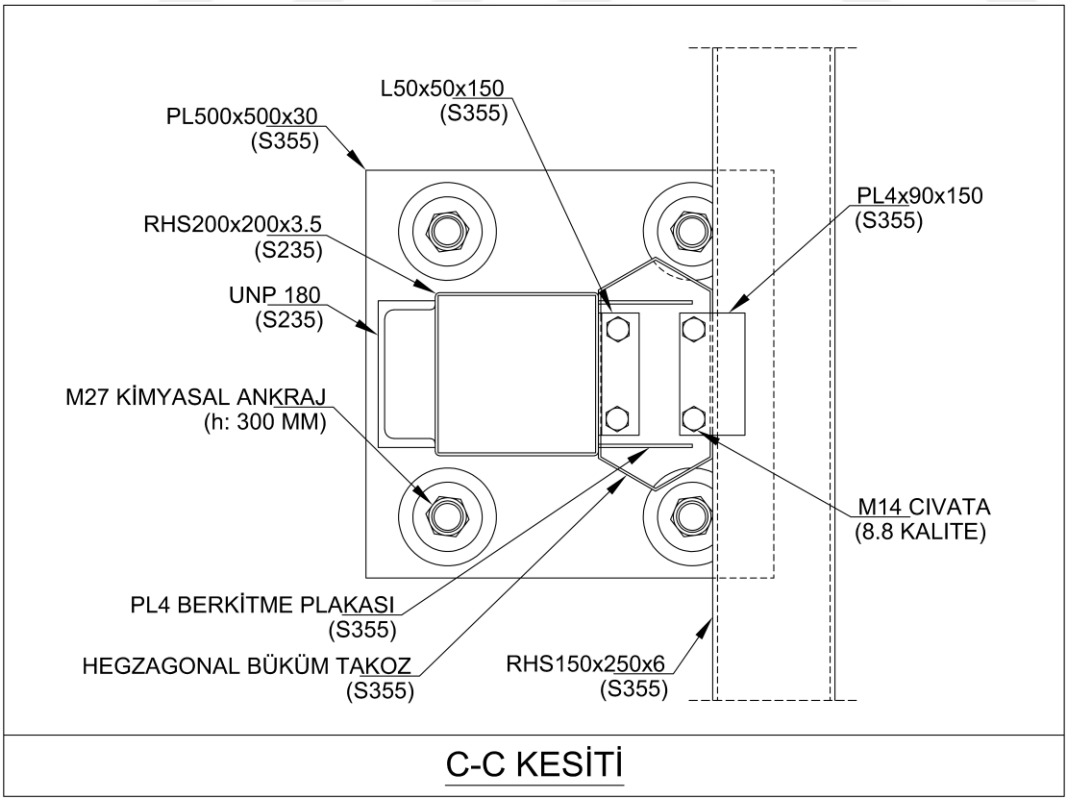


A-A KESİTİ

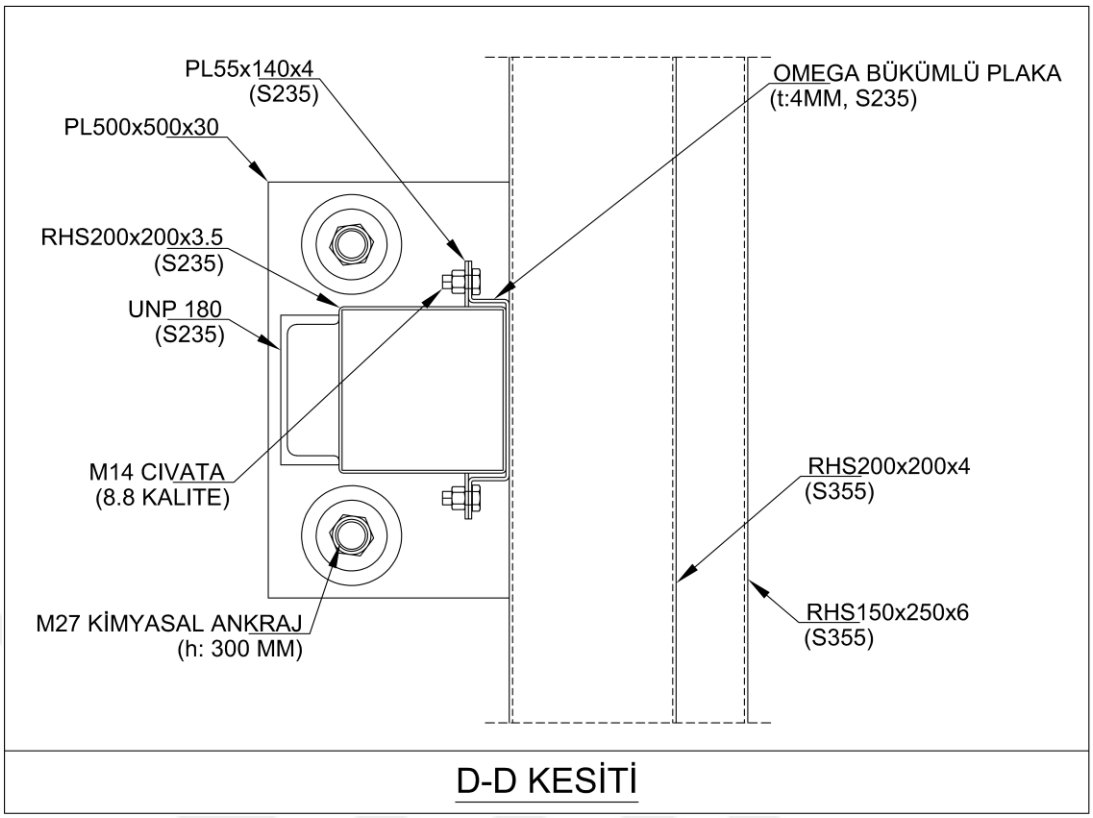
Şekil 1.12 : Otokorkuluk sistemi projesi/A-A Kesiti.



Şekil 1.13 : Otokorkuluk sistemi projesi/B-B Kesiti.

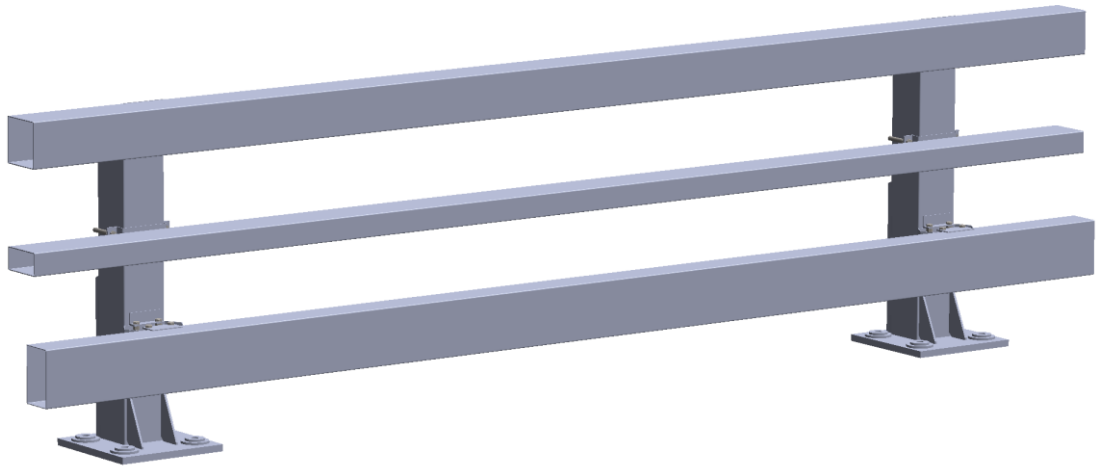


Şekil 1.14 : Otokorkuluk sistemi projesi/C-C Kesiti.

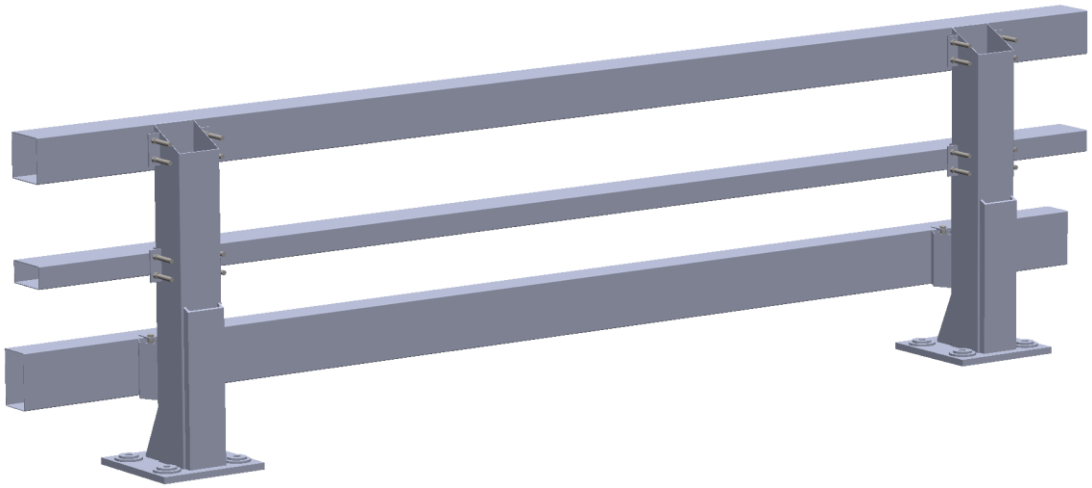


Şekil 1.15 : Otokorkuluk sistemi projesi/D-D Kesiti.

Tasarımın üç boyutlu uzayda nasıl göründüğünü anlamak için Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'de paylaşılan proje detay çizimleri doğrultusunda otokorkuluk tasarımının üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge üç boyutlu görselleri Şekil 1.16 ve Şekil 1.17'de paylaşılmıştır.



Şekil 1.16 : Otokorkuluk sistemi üç boyutlu görseli (yol cephesi).

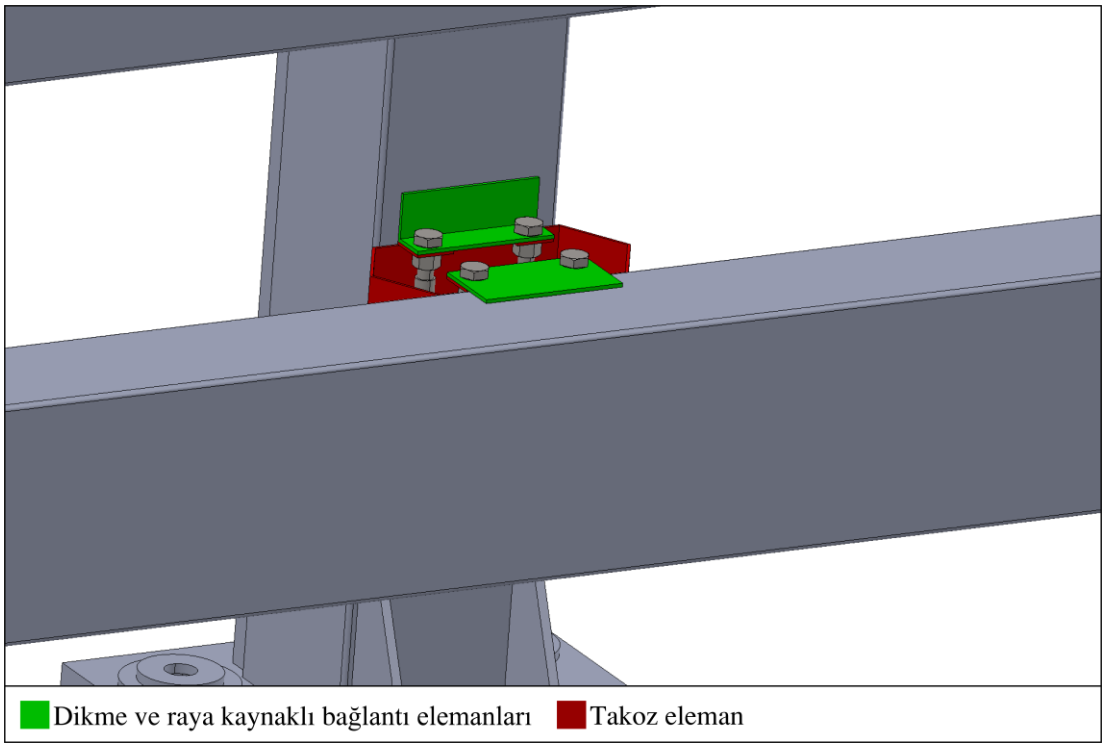


Şekil 1.17 : Otokorkuluk sistemi üç boyutlu görseli (arka cephe).

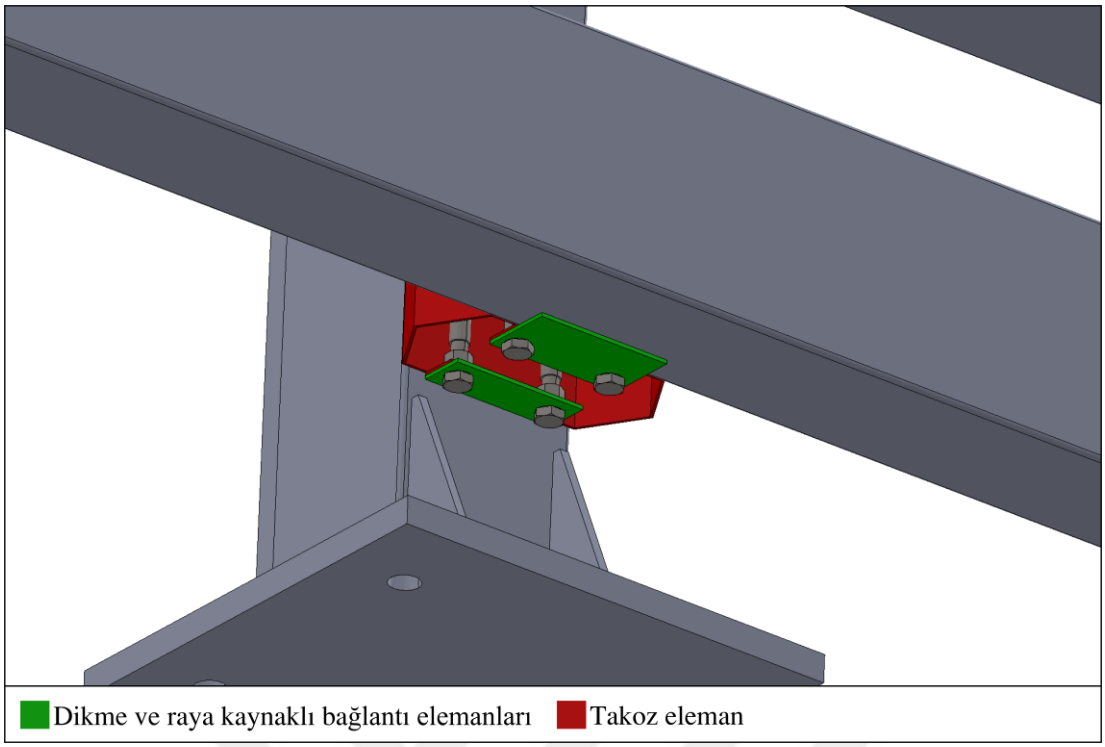
Alt rayın, TB81 testinde kullanılan 38 tonluk römorklu HGV taşıtın ilk çarpma etkileri altında, taşıt tekerleğinin takılmayacağı bir yapıda olması gerekmektedir. Alt ray, çarpma etkileri altında plastik şekil değiştirmelere uğrayarak taşıt tekerini tutacak bir forma bürünmemesi için nispeten yüksek bir et kalınlığına sahip olan RHS 150x250x6 kutu profilden tasarlanmıştır. Ayrıca TB11 testinde kullanılan 900 kg'lık otomobilin ilk etkilerini de alt ray almaktadır. Bu sebeple hem ASI indeksini istenen seviyede tutabilecek kadar esnek, hem de 38 tonluk taşıtın deformasyona uğratamayacağı kadar rijit olmalıdır. Tasarım bu prensipler doğrultusunda oluşturulmuştur.

İlk çarpışma etkilerini alan alt rayın otokorkuluk sistemine aktardığı momentumu azaltmak adına, alt ray ile dikme arasında konumlanan çelik bir takoz eleman tasarlanmıştır. İlgili takoz eleman, boyutları farklı uzunlukta olan, altıgen kesitli (hegzagonal) bir boru profil eleman olarak tasarlanmıştır. Bu takoz eleman 4 mm kalınlıklı plakadan büküm ile oluşturulmuştur. Takoz eleman tasarım detayları Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'deki proje detay çizimleri ile paylaşılmıştır. Uzunluğu 245 mm olan takoz eleman, alt ray ile dikme arasına yol eksenine dik olarak yerleştirilmiştir. Bu elemanın temel görevi, kaza anında taşıtın otokorkuluk sistemine aktardığı enerjinin bir kısmını ilk anda emerek momentumu azaltmaktır. Takoz elemanın, çarpışma etkisi ile ezilerek aracın momentumunun bir kısmını emmesi amaçlanmıştır. Ayrıca takoz elemanın ezilmesi, alt ray profillerin çarpışma etkilerine karşı daha esnek hareket edebilmesini sağlayacaktır. Rayın ve takozun hedeflenen çarpışma davranışını göstermesi, taşıtın ivme değerlerini düşürecektir ve dolayısı ile daha düşük bir ASI indeksi elde edilecektir.

Takoz, dikme ve alt ray bağlantılarında cıvatalı sistemler kullanılmıştır. Takoz-dikme üst bağlantısı çelik bir profil eleman ile yapılmaktadır. Bu elemanlar 150 mm boyunda L40x50x4 çelik bir profildir. Çelik profilin üzerinde iki adet Ø16 delik bulunmaktadır. İlgili çelik profil elemanlar dikme elemana kaynak ile bağlanmaktadır. Takoz eleman üzerinde; takoz elemana kaynak ile bağlı, üzerinde de iki adet Ø16 delik bulunan, 3 mm kalınlıklı plakalar bulunmaktadır. Takoz eleman, dikme elemana kaynaklı çelik profil eleman ve takoz elemana kaynaklı plakalarda bulunan Ø16 deliklerden geçen, M14 (8.8 kalite) cıvatalar vasıtasıyla dikme elemana bağlanmaktadır. Dikme-takoz alt bağlantı bölgesinde, dikmeye ve takoz elemana kaynaklı olan PL4x40x150 çelik plakalar ile yapılmaktadır. Takoz-dikme alt bağlantısı, dikme ve takoz eleman üzerinde bulunan kaynaklı çelik elemanları birbirine bağlayan M14 (8.8 kalite) cıvatalar ile yapılmaktadır. Alt ray elamanın üst ve alt noktalarında birer adet olmak üzere, takoz ve alt ray elemana kaynak ile bağlı PL4x40x40 plakalar bulunmaktadır. Takoz-alt ray bağlantısı, alt ray ve takoz üzerinde bulunan kaynaklı çelik elemanları birbirine bağlayan M14 (8.8 kalite) cıvatalar ile yapılmaktadır. Takoz eleman ve bağlantı detaylarını gösterir üç boyutlu görseller Şekil 1.18 ve şekil 1.19'da paylaşılmıştır. Şekil 1.18 ve şekil 1.19'da paylaşılan görsellerde takoz eleman kırmızı renkte, dikme ve alt raya kaynaklı bağlantı elemanları ise yeşil renkte gösterilmiştir.



Şekil 1.18 : Takoz bağlantısı üç boyutlu görseli (üst).

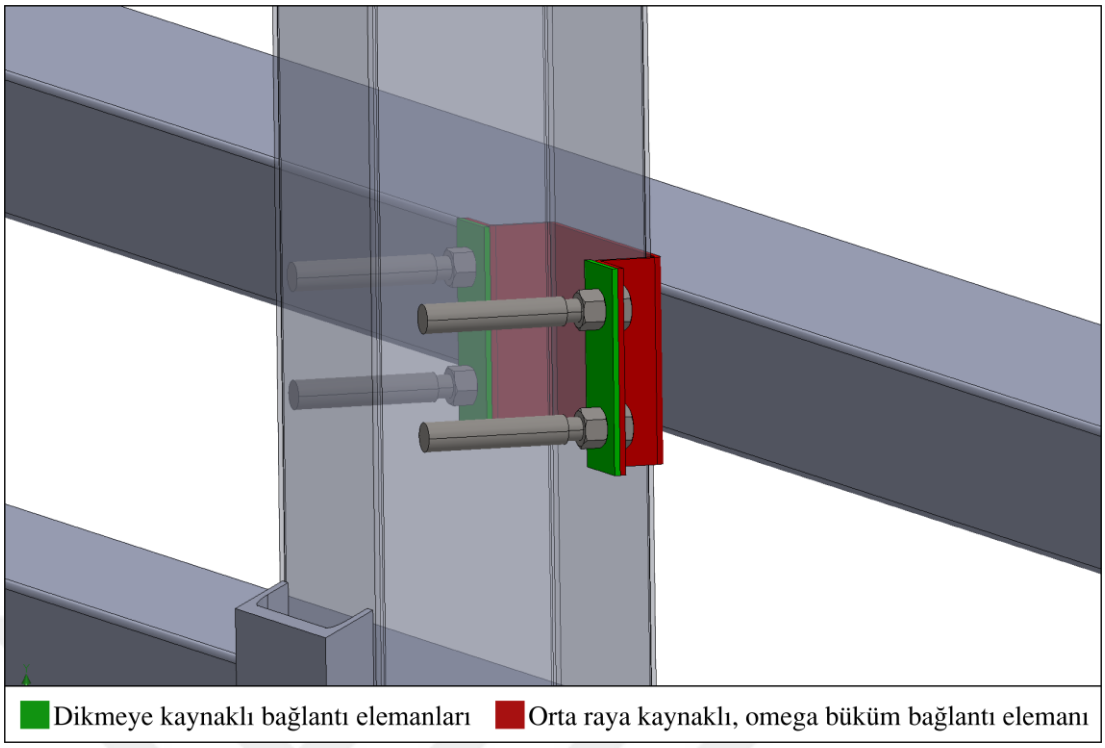


Şekil 1.19 : Takoz bağlantısı üç boyutlu görseli (alt).

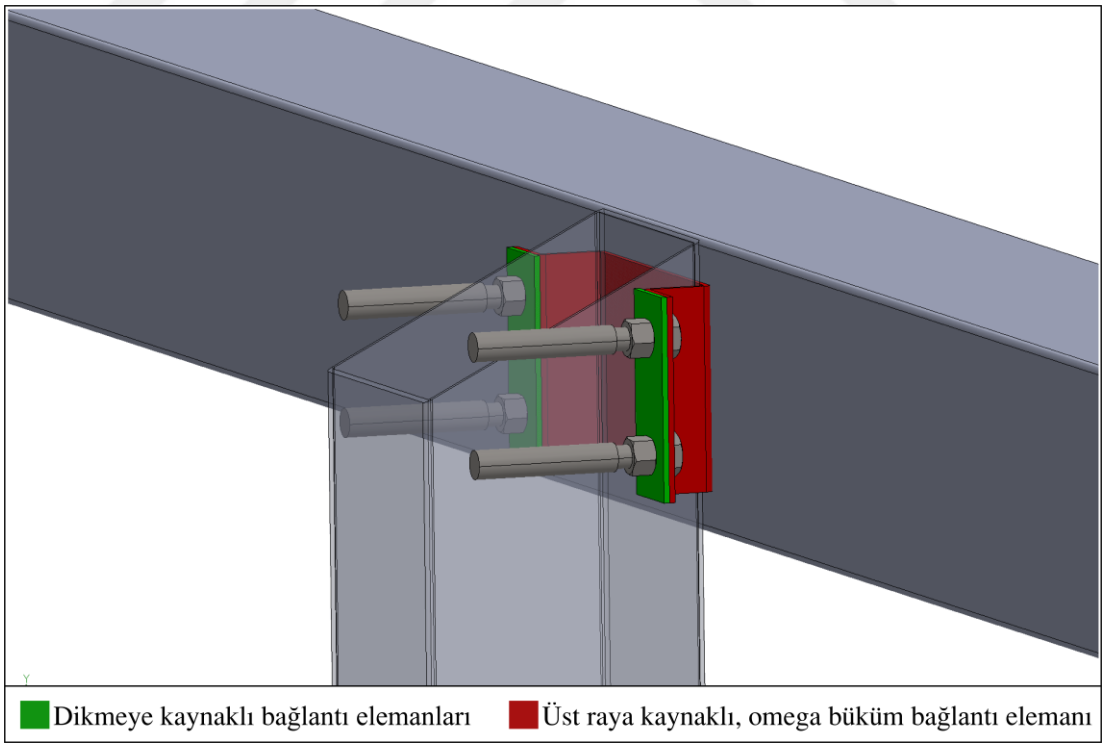
Orta ve üst rayın temel görevi, TB81 testinde kullanılan 38 tonluk römorklu HGV taşıtın otokorkuluk sistemi boyunca yönlendirilmesi ve çalışma genişliği performans seviyesinin istenen sınır değer olan W3 olarak elde edilmesini sağlamaktır. En yüksek yer değiştirme değeri, çarpışma mekaniği gereği otokorkuluk sisteminin en üst noktasında meydana gelmektedir. Bu sebeple üst ray, orta raya oranla daha yüksek mukavemet momentine sahip SHS200x4 kutu profilden tasarlanmıştır.

Orta ve üst ray bağlantısı, 4 mm kalınlıklı bir plakadan üretilmiş omega bükümlü bir eleman yardımı ile yapılmaktadır. Omega büküm plaka dikmeye kaynak ile bağlanmaktadır. Dikme üzerine, kaynak ile bağlantısı yapılmış 3 mm kalınlıklı çelik plakalar bulunmaktadır. Dikme ve orta ray bağlantısı, bayrak plakası ve omega büküm plakada bulunan ikişer adet Ø16 delikten geçen M14 (8.8 kalite) cıvata elemanlar ile yapılmaktadır. Dikme-orta ray bağlantısı üç boyutlu görseli Şekil 1.20'de paylaşılmıştır. Üst ray bağlantısı orta ray bağlantısı ile aynı mantıkta teşkil edilmiştir. Dikme-üst ray bağlantısı üç boyutlu görseli Şekil 1.21'de paylaşılmıştır.

Otokorkuluk sistemi tasımında kullanılan tüm kaynaklı birleşimler sonlu elemanlar analiz simülasyonlarından alınan element gerilmelerine göre hesaplanmıştır. Kaynaklar, çarpma etkileri altında çelik elemanlarda plastik deformasyon oluşturacak kuvvetlerin üzerinde bir kuvvete dayanacak niteliktedir.



Şekil 1.20 : Dikme-orta ray bağlantısı üç boyutlu görseli.



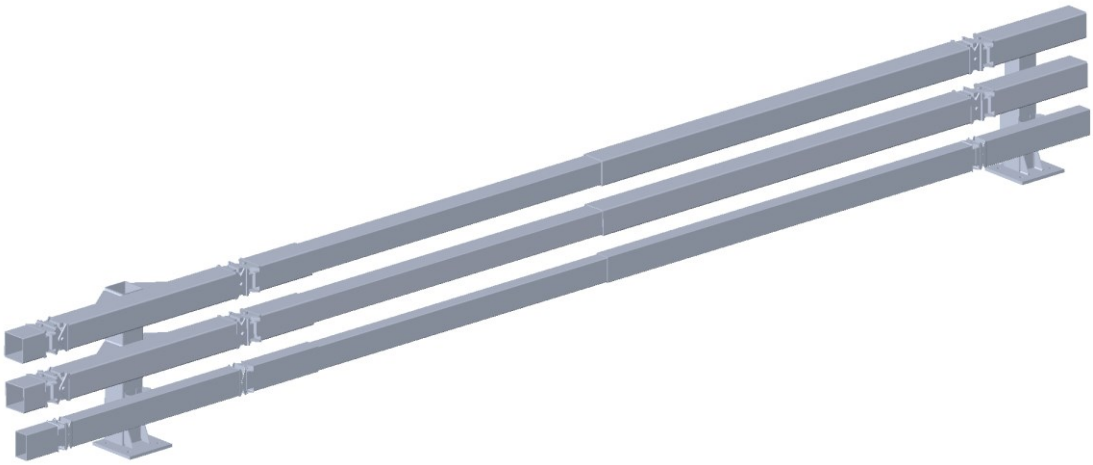
Şekil 1.21 : Dikme-üst ray bağlantısı üç boyutlu görseli.

1.7.2 Genleşme derzi tasarım bilgileri

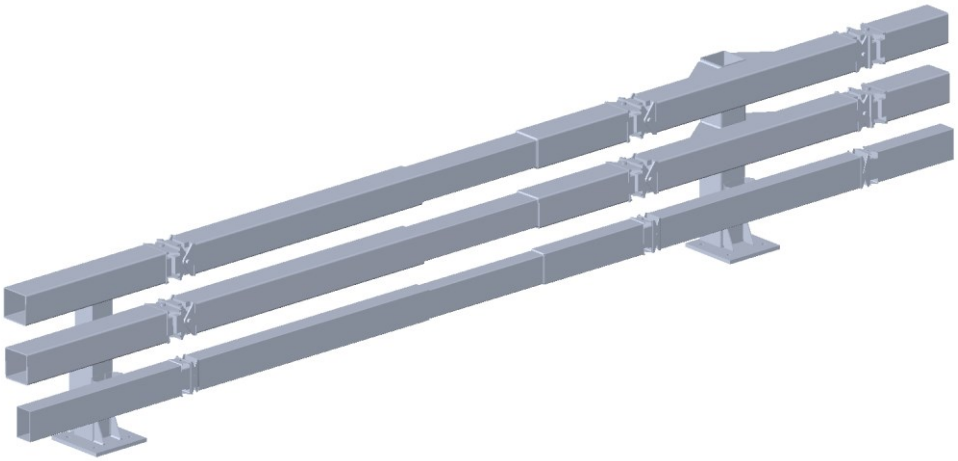
Köprüler yapıları gereği hareketli sistemlerdir. Özellikle çelik köprü sistemlerinde ısı ve rüzgâr etkisiyle yapısal sistem hareketleri oluşmaktadır. Köprü ile karayolu birleşimlerinde bu hareketi karşılamak adına hareketli mesnet bölgeleri bulunmaktadır. Bu sebepten köprülerde kullanılan otokorkuluk sistemlerinde, köprü bölgesinden karayolu bölgesine geçişlerde bir genleşme derzi tasarımı gerekmektedir. Genleşme derzi otokorkuluk tasarımları, köprü hareketleri sebebi ile otokorkuluk sistemlerinin yük almaması için mafsallı ve kayıcı bağlantı sistemleri içermektedir.

Tez kapsamında tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi için bir genleşme derzi tasarımı yapılması gerekliliği öngörülmüştür. İlgili otokorkuluk tasarım detayı belirli bir köprü tasarımı için geliştirilmemektir. Bu sebeple genleşme derzi ağır hizmet tipi otokorkuluk sistem detayı varsayımsal boyutlara göre yapılmış bir öneri tasarımıdır. Bu çalışmada genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımı sadece performans yeterliliği açısından değerlendirilecektir. Bu sebeple sadece TB81 test simülasyonu üzerinden performans değerlendirmesi yapılacaktır.

Genleşme derzi tasarımında, iki dikme arasında 10,5 ve 6,5 metre mesafe olan iki otokorkuluk sistem açıklığı öngörülmüştür. 10,5 m sistem açıklığının köprü tarafında, 6,5 m dikme açıklığının ise karayolu tarafında olduğu düşünülmüştür. Yapılan tasarımda 10,5 m olan köprü tarafı açıklığı, toplamda 5,5 m hareket kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Genleşme hareketini sağlamak için iç içe geçen ray sistemleri kullanılmıştır. 10,5 m ve 6,5 açıklıklı otokorkuluk sistem bölgeleri üç boyutlu görselleri Şekil 1.22 ve Şekil 1.23'de paylaşılmıştır.

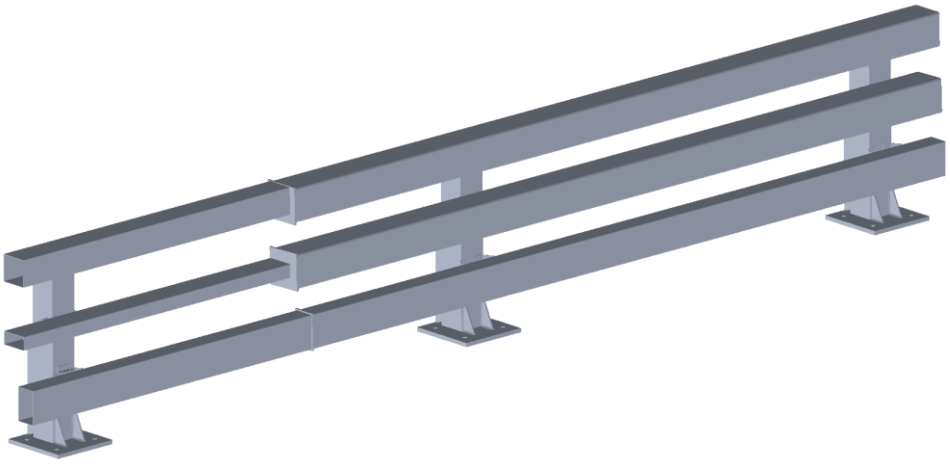


Şekil 1.22 : 10,5 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi.



Şekil 1.23 : 6,5 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi.

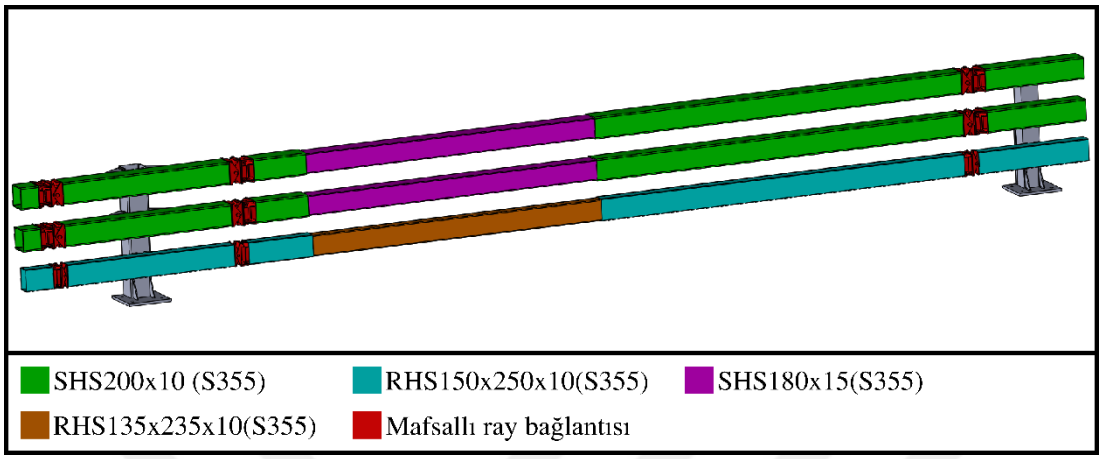
10,5 ve 6,5 metre açıklıklı genleşme derzi otokorkuluk sistemi bölgelerini takip eden ilk açıklık 3,8 metre olarak belirlenmiştir. Genleşme derzi bölgesine yapılacak bir çarpma durumunda, esnek tasarlanan genleşme derzi bölgesi yüklerinin bir kısmının takip eden otokorkuluk bölgelerince paylaşılması amaçlanmıştır. Bu sebeple 10,5 ve 6,5 metre açıklıklı otokorkuluk bölgelerini takip eden bölgelerde eğilme direncini artırmak için daha düşük bir açıklık değeri olan 3,8 metre açıklık değeri seçilmiştir. Takip eden diğer köprü ve karayolu bölgesinde normal açıklık için yapılmış tasarımın devam ettiği düşünülmüştür. 3,8 metre açıklıklı otokorkuluk bölgesi üç boyutlu görseli Şekil 1.24'de paylaşılmıştır.



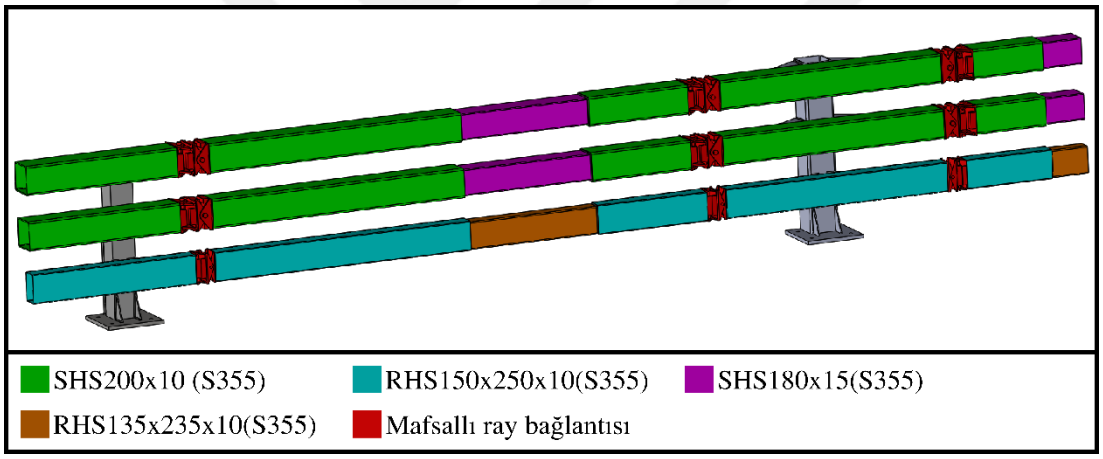
Şekil 1.24 : 3,8 metre açıklıklı genleşme derzi bölgesi.

Genleşme derzi tasarımında, köprü hareketlerini tolere etmek adına mafsallı ve kayıcı ray bağlantıları kullanılmıştır. Genleşme derzi tasarımında, kullanılan mafsallı ve kayıcı bağlantı sistemleri çarpma etkisinde moment aktarmadığı için normal açıklık

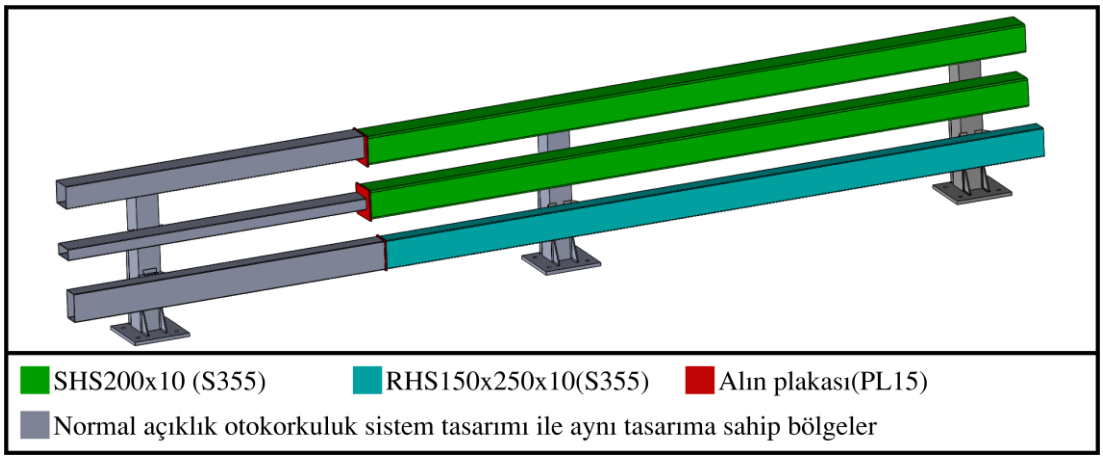
tasarımına oranla daha güçlü elemanlar kullanılmıştır. 10,5, 6,5 ve 3,8 metre açıklıklı bölgelerde kullanılan ray profil tipleri sırasıyla Şekil 1.25, Şekil 1.26 ve 1.27'de paylaşılmıştır.



Şekil 1.25 : 10,5 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri.

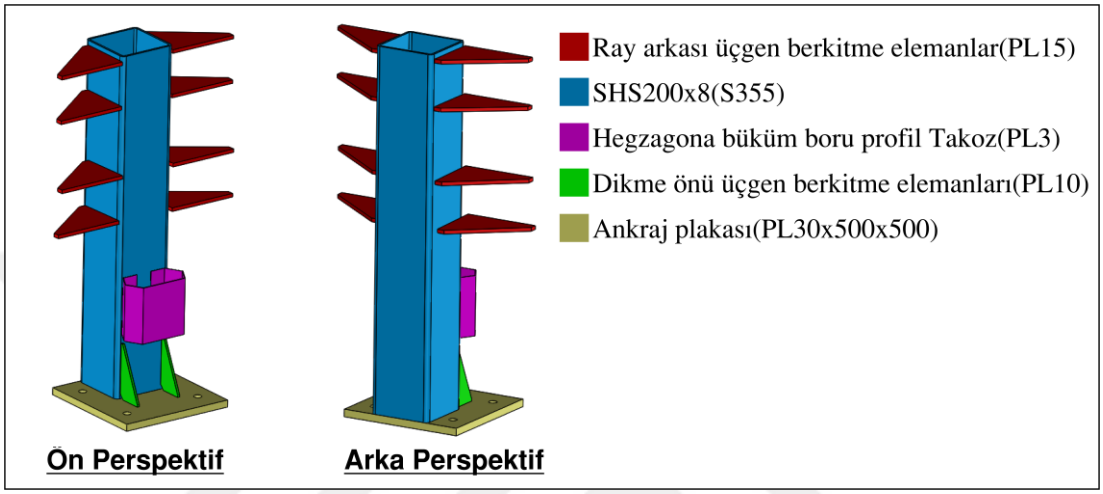


Şekil 1.26 : 6,5 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri.



Şekil 1.27 : 3.8 metre açıklıklı genleşme derzi ray profil tipleri.

Çarpışma etkileri otokorkuluk sistemi ray elemanlarında dikme elemanlara iletilmektedir. Genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımında, ray bağlantıları mafsallı ve kayıcı sistemler ile tasarlandığı için dikme elemanlara normal açıklığı oranla çok daha fazla eğilme momenti etkiyeceği öngörülmüştür. Bu sebeple normal açıklığa oranla daha kuvvetli bir dikme sistemi oluşturulmuştur. Genleşme derzi otokorkuluk sistemi dikme bölgesi tasarım bilgileri Şekil 1.28'de paylaşılmıştır.

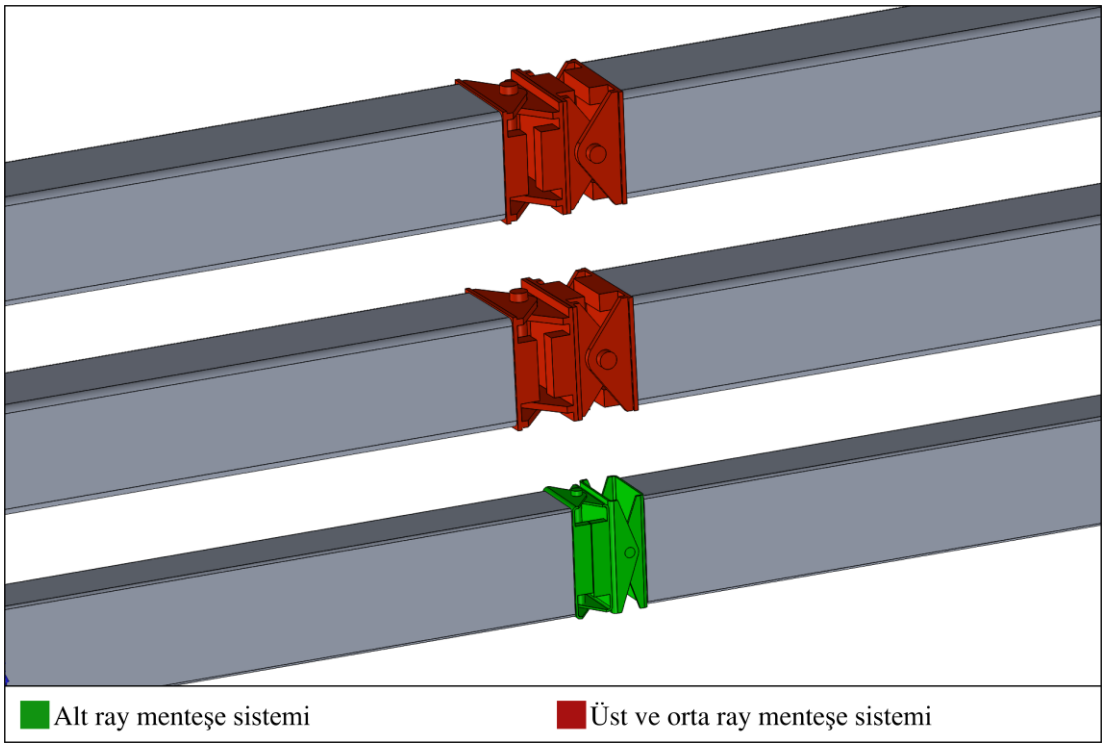


Şekil 1.28 : Genleşme derzi dikme tasarım bilgileri.

Ray bağlantılarında kullanılan kayıcı ve mafsallı sistemler sebebi ile dikme-ray bağlantılarının daha rijit olması gerekmektedir. Bu sebeple dikme-ray bağlantıları çepeçevre kaynaklı olarak yapılmıştır. Orta ve üst ray-dikme bağlantılarında, rayların çarpma etkisi ile dikme ekseninde dönmesini önlemek adına her bir ray arkasına ikişer adet olmak üzere, 10 mm kalınlı plakalardan imal edilmiş üçgen berkitme elemanlar yerleştirilmiştir (Şekil 1.28). Takoz, normal açıklık otokorkuluk sistem tasarımında kullanılan ile aynı tasarıma sahiptir. Takoz eleman dikme ve alt ray elemana çepeçevre kaynak ile bağlanmaktadır.

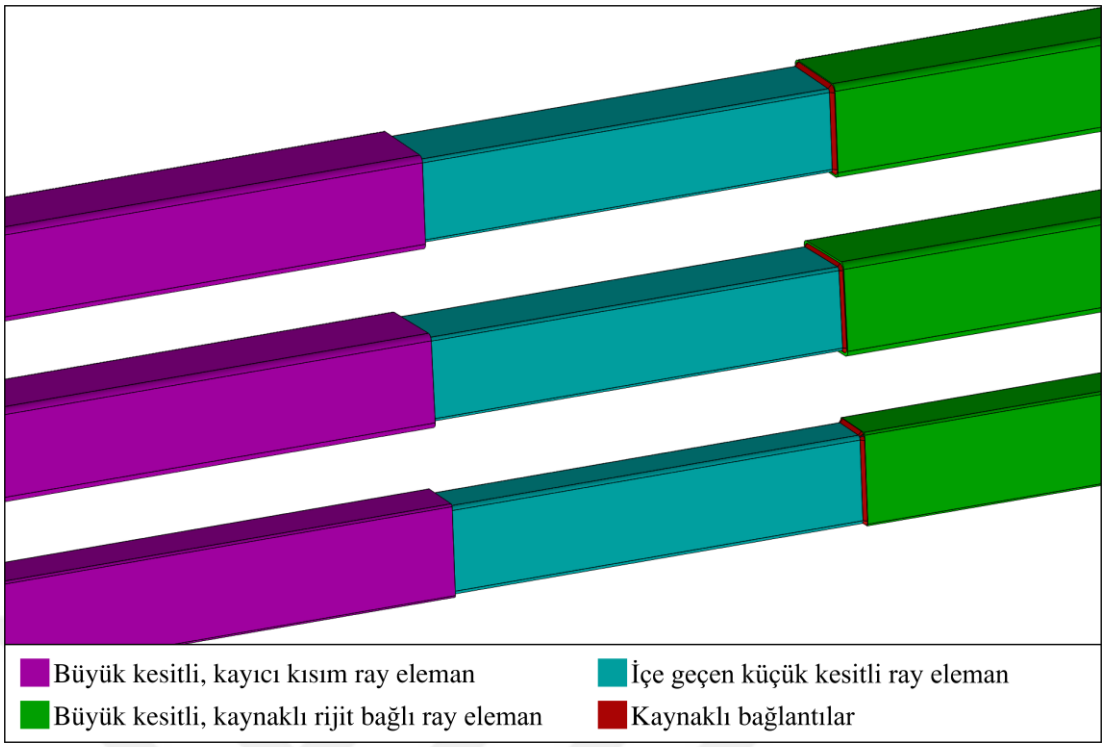
Genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımı ray bağlantılarında mafsallı bağlantı sistemleri kullanılmıştır. İlgili bağlantılar çarpma etkisi altında rayların daha esnek hareket etmesini sağlamaktadır. Genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımında 10,5 ve 6,5 metre gibi geniş açıklıklar kullanılmaktadır. Geniş açıklıklı bölgelerde, çarpışma anında taşıtın karayoluna döndürülmesinde daha esnek hareket edebilen ray sistemleri önemli bir rol onamaktadır. İlgili mafsallı ray bağlantısı üç boyutlu görseli Şekil 1.29'de paylaşılmıştır.

Genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımında, köprü tablası hareketlerini tolere edebilecek kayıcı bağlantı sistemleri kullanılmıştır. Bu kayıcı bağlantı sistemleri köprü tablasında oluşacak hareketlerden dolayı otokorkuluk sistemine ilave yükler gelmesini engellemek amacı ile geliştirilmiştir. Bu kayıcı bağlantı sistemi, iç içe geçen ray sistemleri olarak tasarlanmıştır. İlgili kayıcı bağlantı tasarımında, kutu profil olarak tasarlanmış ray elemanlar, ray profilinin içine geçirilebilen daha küçük çapta başka bir ray eleman yardımı ile birbirine bağlanmıştır. İçe geçen daha küçük çaptaki kutu profil bir taraftan kaynakla ray profiline bağlanmıştır. İçe geçen kutu profilin diğer tarafı ise ray profili içerisinde serbest hareket edebilecek şekilde bırakılmıştır. Kayıcı bağlantı üç boyutlu görseli Şekil 1.30' paylaşılmıştır.

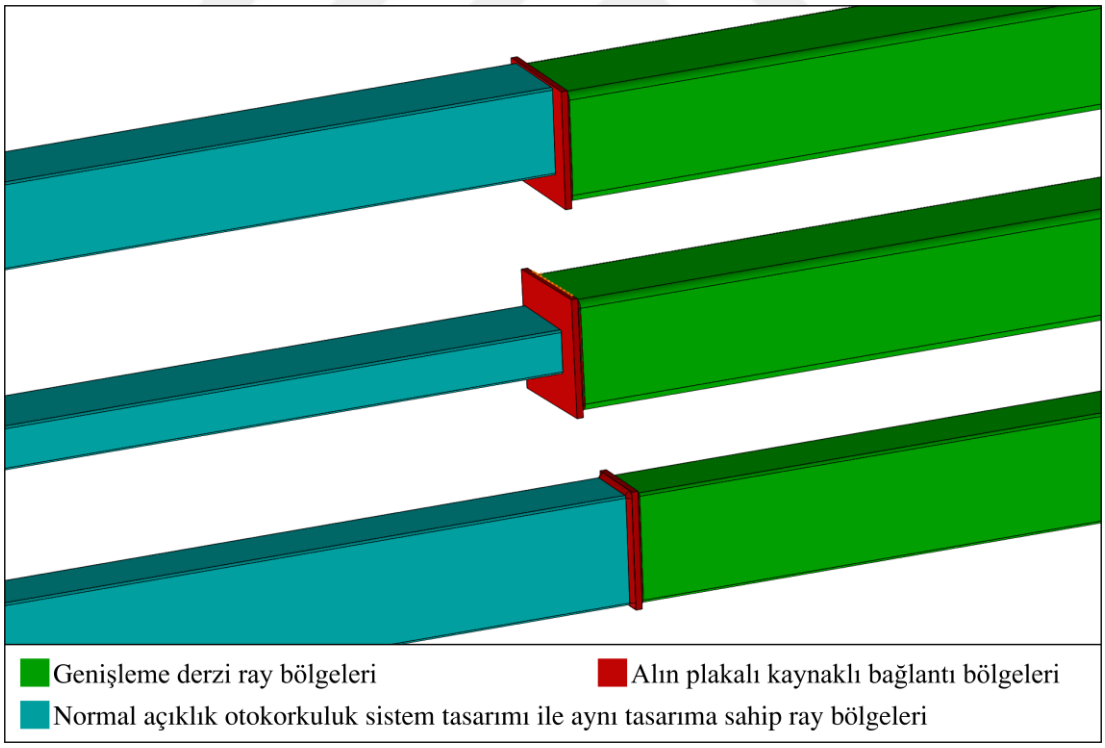


Şekil 1.29 : Mafsallı ray bağlantıları üç boyutlu görseli.

Genleşme derzi otokorkuluk sisteminden normal açıklıklı otokorkuluk sistemine geçişte, raylar kaynaklı ekler yardımı ile birbirine bağlanmaktadır. Böylelikle genleşme derzi bölgesinden normal açıklık bölgesine geçişte ray elemanların tek bir elemanmış gibi birlikte çalışması sağlanmıştır. İlgili bağlantı üç boyutlu görseli Şekil 1.31'de paylaşılmıştır. Genleşme derzi otokorkuluk sistemi tasarımında kullanılan tüm kaynaklı birleşimler sonlu elemanlar analiz verilerine göre tasarlanmıştır. Bütün kaynaklı bağlantılarda kapasite tasarımı yapılarak, tam penetrasyonlu kaynak yapılması öngörülmüştür.



Şekil 1.30 : Kayıcı sistem bağlantıları üç boyutlu görseli.



Şekil 1.31 : Rijit ray bağlantısı üç boyutlu görseli.

2. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ

2.1 Kullanılan Ticari Yazılımlar (LS-DYNA, LS-PrePost, SOLIDWORKS)

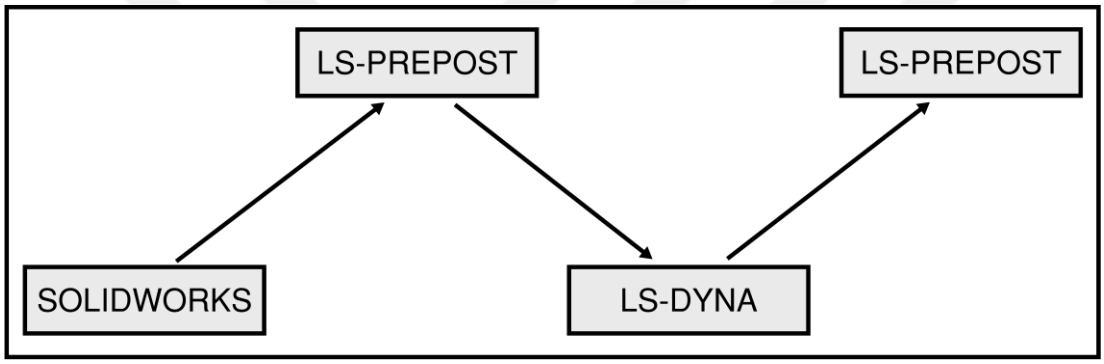
LS-DYNA, sonlu elemanlar metodu ile çalışan kompleks bir bilgisayarlı analiz programıdır. LS-DYNA, tek bir yürütülebilir dosyadan oluşan ve tamamen komut satırı ile çalışan bir bilgisayar yazılımıdır. LS-DYNA yazılımı, komutları içeren bir dosya ile çalışmaktadır. LS-DYNA hesap dosyası ASCII (American Standard Code for Information Interchange) dosya formatındaki kodları içerir. LS-DYNA hesap dosyası herhangi bir metin düzenleyici bilgisayar programı ile oluşturulabilir. Girdi dosyaları grafik ön işlemci yardımlı bilgisayar yazılımları ile de hazırlanabilmektedir. Bu çalışmada, grafik ön işlemci yardımlı yazılım olarak LS-PrePost kullanılmıştır. LS-PrePost; LS-DYNA analiz dosyasını oluşturmakta kullanılan, üç boyutlu görselleri kod satırlarına dönüştüren, üç boyutlu görsel ara yüze sahip bir yazılımdır. Bu yazılımda; testte kullanılacak materyalin geometrik özellikleri, her türlü malzeme özelliği, modeli oluşturan elemanların sınır ve mesnet koşulları, analizi yapılan elemanların temas yüzey özellikleri ve temas davranışları gibi parametreler üç boyutlu ara yüz yardımıyla tanımlanabilmektedir.

LS-DYNA, çok geniş alanda kullanımı olan bir sonlu elemanlar analiz yazılımıdır. Havacılık alanında; motor tribünlerinin tasarımında, kuş çarpma senaryolarının analizi ve hata analizi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe; kaza analizleri, çarpışma simülasyonları, emniyet kemeri ve hava yastığı analizleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otokorkuluk sistemlerinin çarpışma test analizlerinde kullanılmıştır. Ayrıca; deprem analizleri, metal üretim sektörü kalıp tasarımları, ısıl değişim analizleri ve elektromanyetik analizler gibi birçok alanda da kullanılmaktadır.

Solidworks, parasolid prensibinde çalışan bir yazılımdır. Parasolid prensibi kullanıcıya tasarımın oluşturulma aşamasında kolay müdahale şansı tanımaktadır. Müdahale kolaylığı model boyutlarının hızlıca değiştirilmesine olanak sağlar. Tasarım ağacı prensibi ile çalışmaktadır. Eleman kütüphanesinden malzeme özellikleri ve

bağlantı elemanları (cıvata, perçin vb.) hızlıca tanımlanabilmektedir. Solidworks çizim modülünün yanı sıra sonlu elemanlar prensibinde makine elemanlarının analizlerini de yapabilmektedir. Bu çalışmada Solidworks yazılımının çizim modülü kullanılmıştır.

Bu çalışmada, birden çok program birbirleriyle etkileşimli olarak kullanılmıştır. Solidworks'de oluşturulan geometrik model LS-PrePost yazılımına aktarılmıştır. LS-PrePost yazılımında, otokorkuluk sistemini oluşturan elemanların sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş ve test özellikleri tanımlanarak LS-DYNA yazılmı için kodları içerir eksplisit sonlu elemanlar modeli nümerik hesap dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra, oluşturulan bu nümerik hesap doyası LS-DYNA paket yazılımı ile analiz edilerek matematiksel veriler ve simülasyonlar elde edilmiştir. Program kullanımı akış şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Program kullanımı akış şeması.

2.2 Otokorkuluk Sisteminin Geometrik Modelinin Oluşturulması

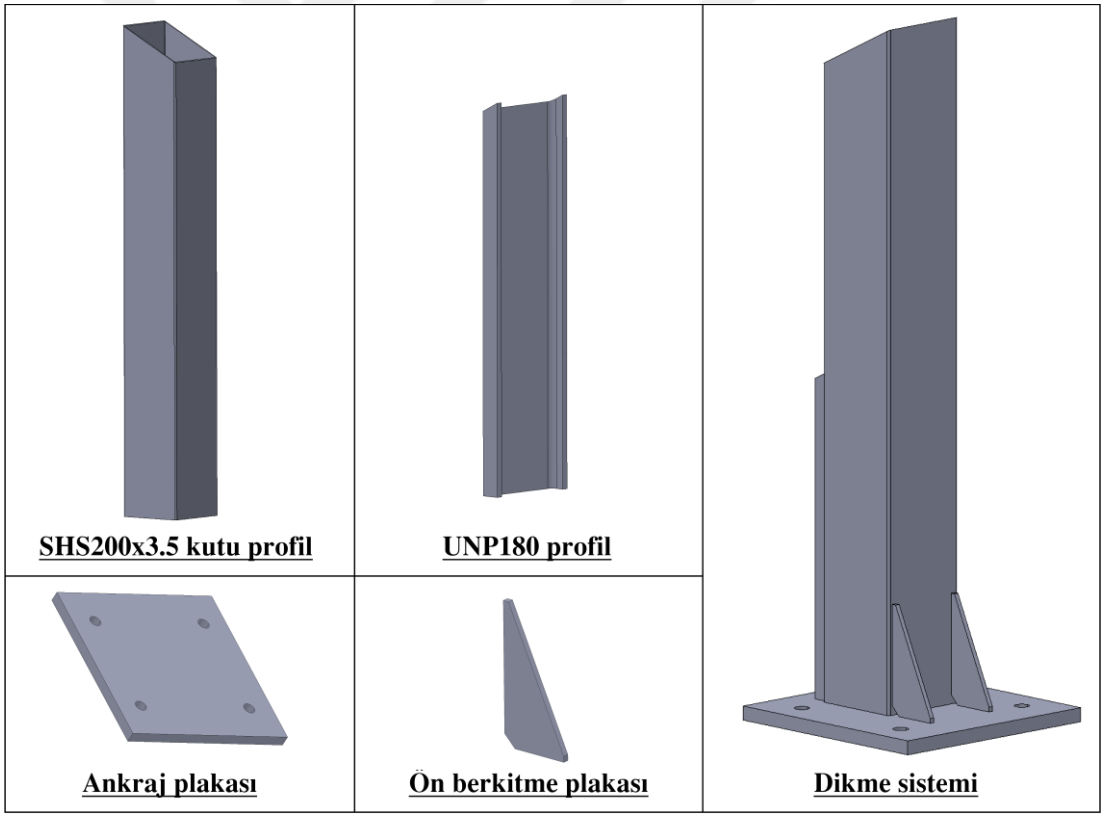
Analiz modelleri LS-PrePost yardımı ile oluşturulmuştur. Tasarım aşamasında karar verilmiş boyut ve tipteki profillerin LS-PrePost programına yazılımına aktarılabilmesi için üç boyutlu olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, üç boyutlu model Solidworks yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Katı eleman modellerinin oluşturulmasındaki temel amaç LS-PrePost yazılımı için sonlu elemanlar ağı oluşturabilecek yüzeyler tanımlamaktır. Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra elemanların boyut ve kalınlık gibi tasarım özellikleri LS-PrePost yardımı ile de değiştirilebilmektedir.

Solidworks yazılmı tasarım kütüphanesinde yapısal çelik profiller ve çelik bağlantı elemanları gibi birçok yapısal eleman bulunmaktadır. Bu çalışmada tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi standart yapısal çelik elemanlar içermektedir. Bu

sebeple boyut ve kesit özellikleri belirlenerek tasarımın üç boyutlu katı eleman modeli Solidworks yazılımı tasarım kütüphanesinden seçilen elemanlar yardımı ile kolayca oluşturulabilmektedir. Solidworks yazılımında tasarımı oluşturan herbir parça ayrı ayrı modellenmektedir. Herbir elemanın ayrı ayrı katı modelleri oluşturulduktan sonra ana tasarımı oluşturan montaj işlemi gerçekleştirilmektedir. Montaj işlemi, ayrı ayrı tasarlanmış öğelerin tekbir eleman olarak bir araya getirilmesi işlemidir.

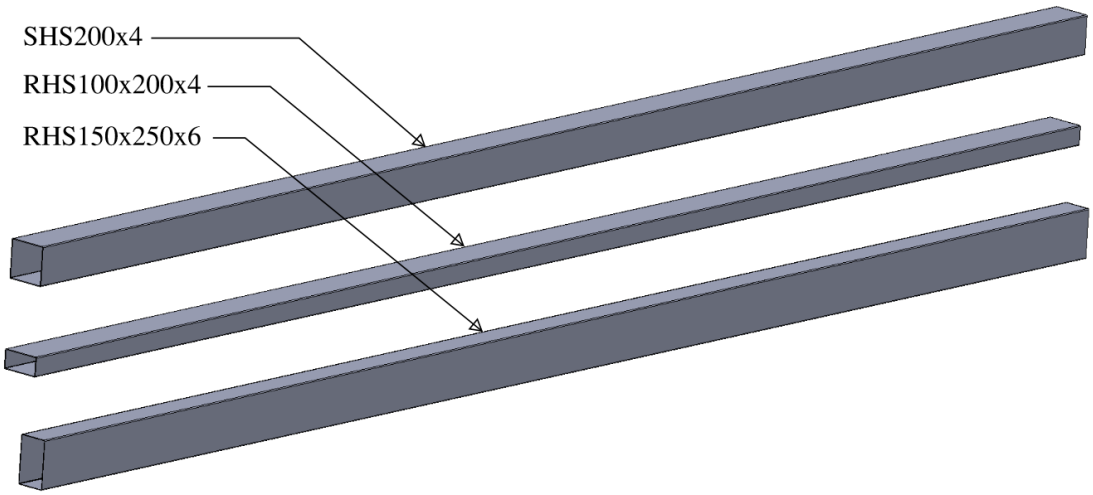
2.2.1 Normal açıklıklı otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modelleri

Solidworks katı eleman modelleri Bölüm 1.7.1'de belirlenen tasarım detaylarına göre oluşturulmuştur. Dikme sistemini oluşturan; dikme profili, UNP180, ankraj plakası ve ön berkitme plakası katı eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. Oluşturulan katı eleman modelleri Solidworks yazılımında montaj komutu ile bir araya getirilmiştir. Dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.2'de paylaşılmıştır.



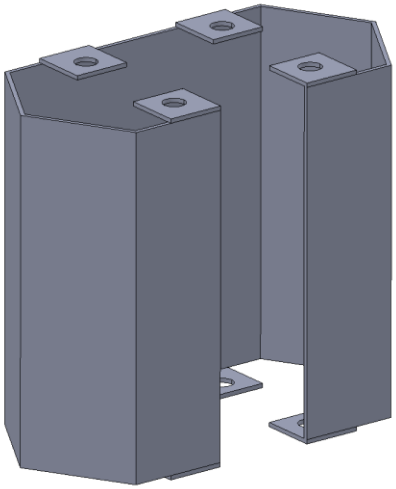
Şekil 2.2 : Norma açıklık dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli.

Ray sistemi oluşturan; alt ray (RHS150x250x6), orta ray (RHS100x200x4) ve üst ray (SHS200x4) kutu profil elemanların Solidworks katı eleman modelleri Bölüm 1.7.1'de belirlenen tasarım detaylarına göre oluşturulmuştur. Ray sistemi Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.3'de paylaşılmıştır.



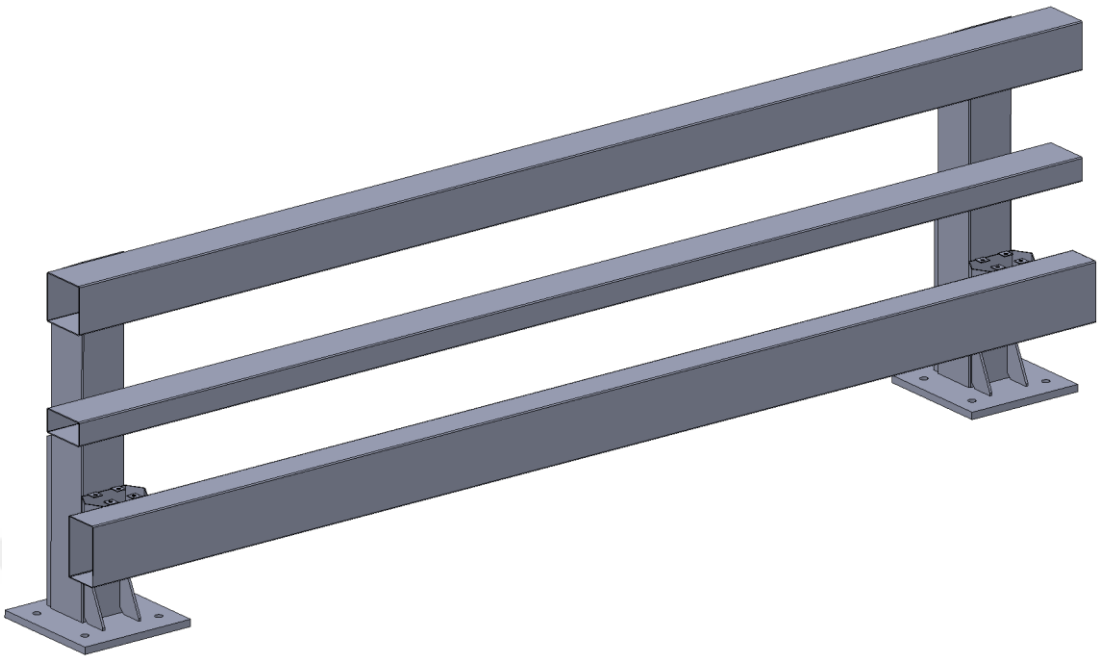
Şekil 2.3 : Normal açıklık ray sistemi Solidworks katı eleman modeli.

Çarpışma etkilerini azaltmak adına tanımlanan özel tasarım takoz eleman Solidworks katı eleman modeli Bölüm 1.7.1'de paylaşılan tasarım detaylarına göre oluşturulmuştur. Takoz elemanı oluşturan plakalar ve bağlantı plakaları, Solidworks yazılımında ayrı ayrı modellenmiştir. Ayrı ayrı üç boyutlu modelleri oluşturulan elemanlar. Montaj komutu ile tek bir eleman haline getirilmiştir. Takoz eleman Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.4'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.4 : Takoz eleman Solidworks katı eleman modeli.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı katı eleman modeli, ayrı ayrı tasarımı yapılan elemanlardan oluşturulmuş tek bir montajlı eleman haline getirilmiştir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı için oluşturulan nihai Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.5'de paylaşılmıştır.



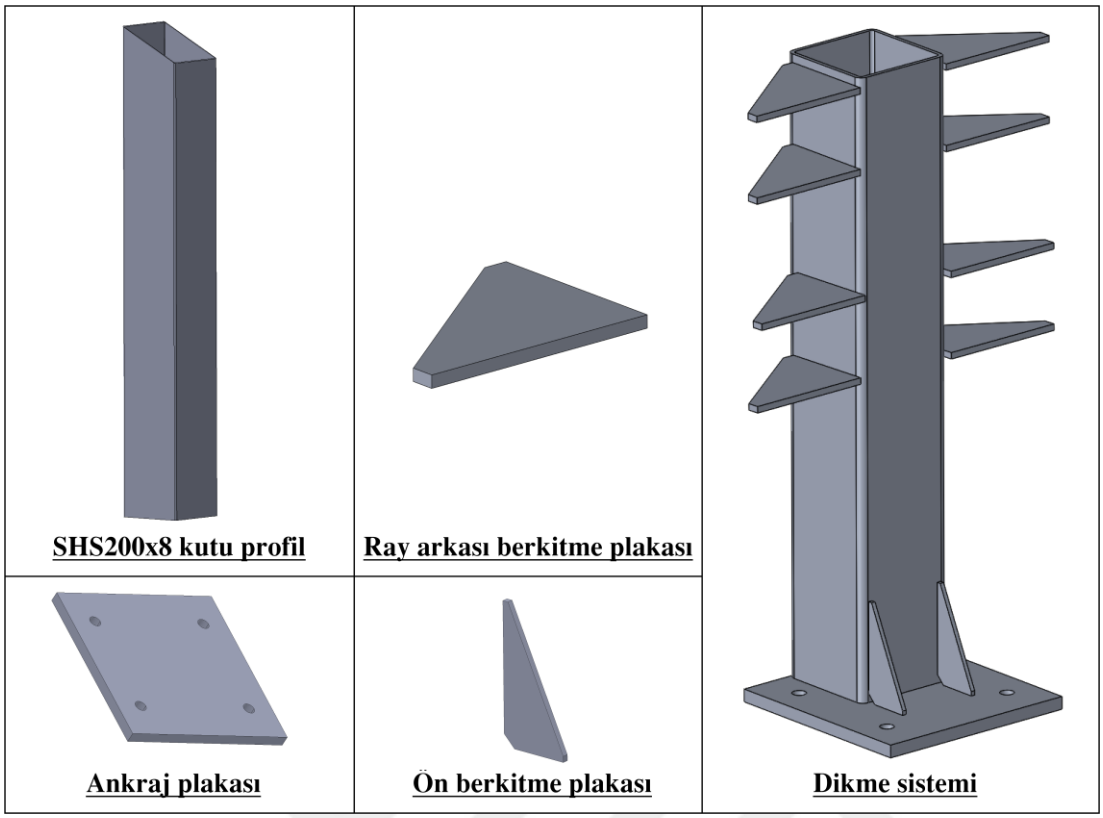
Şekil 2.5 : Normal açıklıklı otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modeli.

2.2.2 Genleşme derzi otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modelleri

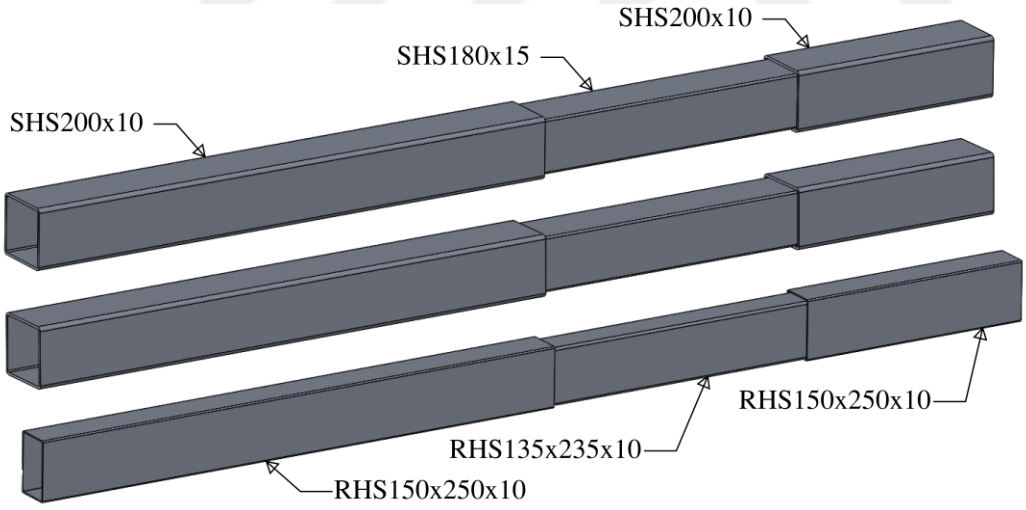
Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi bölgesi dikme sistemi tasarımı Solidworks katı eleman modelleri Bölüm 1.7.1'de belirlenen tasarım detaylarına göre oluşturulmuştur. Dikme sistemini oluşturan; dikme profili, ankraj plakası, ray arkası berkitme plakası ve ön berkitme plakası katı eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. Ayrı ayrı oluşturulan katı eleman modelleri Solidworks yazılımı içerisindeki montaj komutu ile birleştirilmiştir. Dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.6'da paylaşılmıştır.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi bölgesi ray sistemini oluşturan; alt ray (RHS150x250x10), orta ray (SHS200x10), üst ray (SHS200x10), alt kayıcı sistem rayı (RHS235x135x10), orta ve üst kayıcı sistem rayı (SHS180x10) kutu profil elemanların Solidworks katı eleman modelleri Bölüm 1.7.2'de belirlenen tasarım detaylarına göre oluşturulmuştur. Ray sistemi Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.7'de paylaşılmıştır.

Genleşme derzi ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımında, normal açıklık bölgesi ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı ile aynı takoz sistemi kullanılmıştır. İlgili takoz eleman Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.4'de paylaşılmıştır.

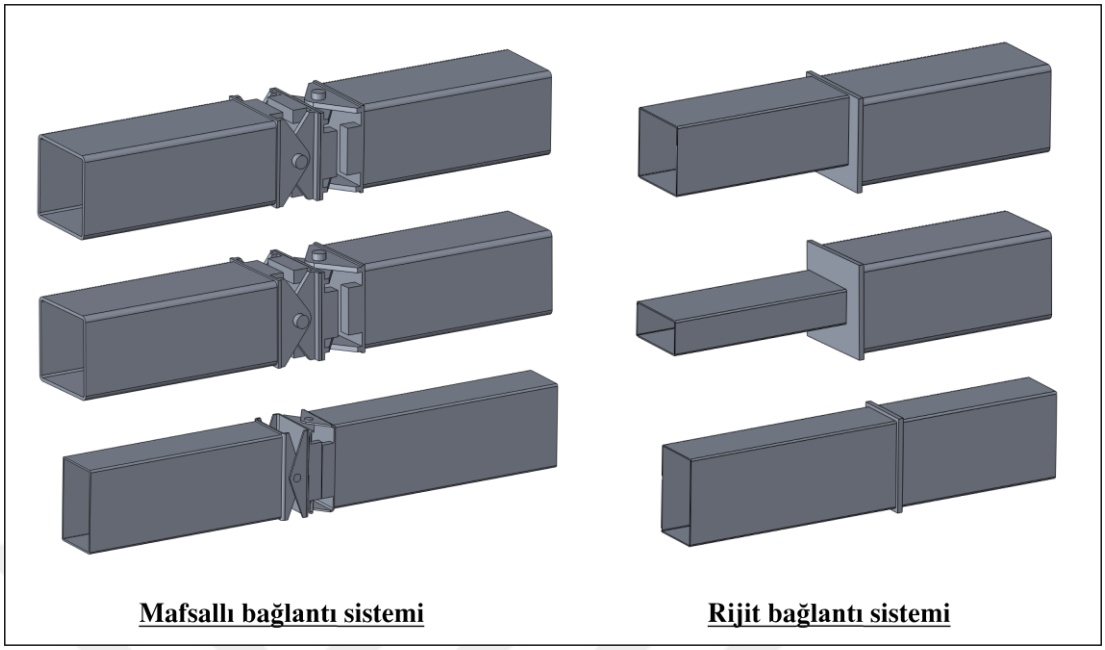


Şekil 2.6 : Genleşme derzi dikme sistemi Solidworks katı eleman modeli.

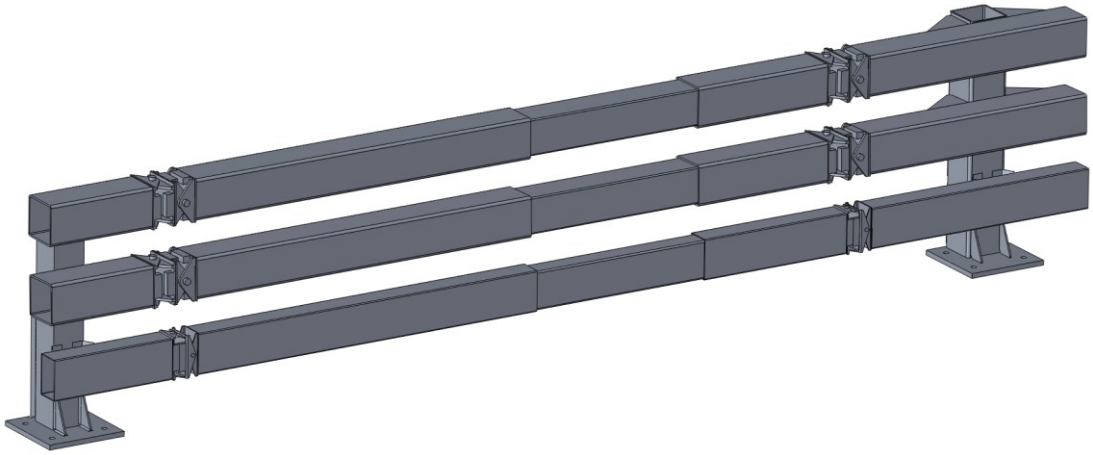


Şekil 2.7 : Genleşme derzi ray sistemi Solidworks katı eleman modeli.

Genleşme derzi otokorkuluk sistemi detayında mafsallı ve rijit bağlantı sistemleri kullanılmıştır. İlgili bağlantı sistemleri Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.8'de paylaşılmıştır. Genleşme derzi ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi katı eleman modeli, ayrı ayrı tasarımı yapılan elemanlardan oluşturulmuş tek bir montajlı eleman haline getirilmiştir. Otokorkulluk sistemi normal açıklık Solidworks katı eleman modeli Şekil 2.9'da paylaşılmıştır.



Şekil 2.8 : Mafsallı ve rijit bağlantı sistemleri Solidworks katı eleman modeli.



Şekil 2.9 : Genleşme derzi otokorkuluk sistemi Solidworks katı eleman modeli.

2.3 Otokorkuluk Sistemlerinin Analizinde Sonlu Elemanlar Modeli (FEM/Finite Element Modeling) Kullanımı

Sonlu Elemanlar Modeli (FEM), gerçek hayatta imal edilecek modelin özelliklerini ve davranışını taklit eden bir modeldir. Otokorkuluk sistem bileşenlerinin fiziksel özelliklerinden oluşur ve analizine dayanarak tasarımın genel performansını tahmin etmekte kullanılır. Analiz genellikle Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) olarak bilinir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi otokorkuluk sistemlerinin çarpışma etkisine karşı reaksiyonunu tahmin etmek için kullanılacaktır.

Bu araştırmada sonlu elemanlar analizi için LS-DYNA yazılımı kullanılmaktadır. LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından geliştirilen, gelişmiş bir simülasyon yazılımı paketidir. Yazılım, yapıların non-linear tepkisini analiz eder ve karmaşık sonlu eleman problemlerini çözer. Bu gelişmiş paket yazılım, eldeki karmaşık sorunları çözer ve sonuçları görüntüler. FEM'in geliştirilmesi için LS-DYNA programına tanımlanması gereken çok sayıda değişken vardır. Bu ayrıntılar aşağıda belirtildiği gibidir.

2.4 Otokorkuluk Sistemi LS-PrePost Sonlu Elemanlar Nümerik Modelinin Oluşturulması

FEM'in geliştirilmesi için LS-DYNA programına enjekte edilecek çok sayıda bilgi gerekir. Bu bilgiler aşağıda paylaşılan sıra ile tanımlanacaktır.

1. Geometrik modelin LS-DYNA yazılımına aktarılması
2. Sonlu elemanlar ağının oluşturulması
3. Element formülasyonlarının tanımlanması
4. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi
5. Sınır ve mesnet koşullarının belirlenmesi
6. Temas kabullerinin belirlenmesi
7. Analiz seçeneklerinin belirlenmesi

2.4.1 Geometrik modelin LS-DYNA yazılımına aktarılması

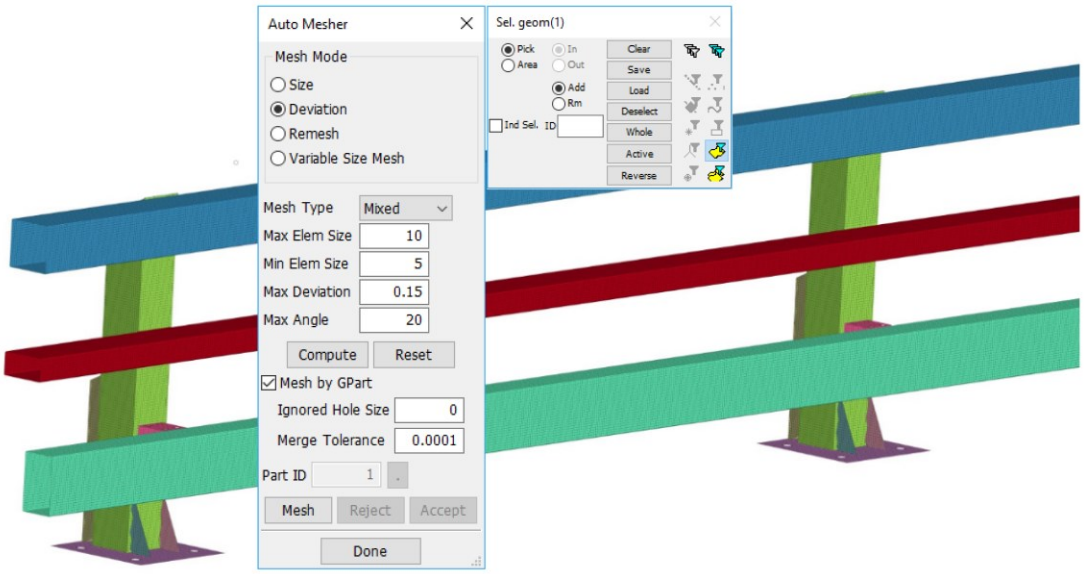
LS-PrePost, birçok uzantıda üç boyutlu modelleri açma özelliğini bünyesinde barındıran bir yazılımdır. LS-DYNA; Nastran, IGES, STEP, I-DEAS ve VDA gibi girdi dosyalarını içe aktarabilir ve düzenleyebilir. AutoCAD'in tasarlanan model bileşenleri kaydedebilir ve daha sonra IGES dosyaları olarak dışa aktarabilir. Solidworks yazılımında 1/1 ölçekli olarak oluşturduğumuz geometrik modeli içe aktarma işlemi sırasında, boyutsal bozulmaların önüne geçmek için ölçek özelliklerini ve kaynak biçimlendirmesini değiştirmeden aktarmak önemlidir. Nümerik hesap dosyası oluşturulurken yazılım içinde uygun birim sistemlerinden birtanesi seçilerek işlem yapılmalıdır. Yazılım içerisinde birim sistemi seçeneği mevcut değildir. Bütün analiz girdiler seçilen birim sistemine göre yapılmalıdır.

2.4.2 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması

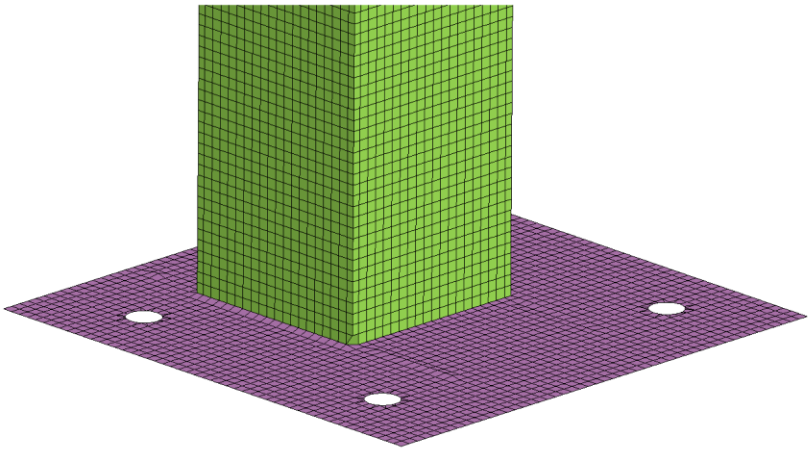
LS-PrePost'ta oluşturulan sonlu eleman modelleri, test edilecek gerçek fiziki parçaları temsil eder. Doğruluk derecesi, kullanılan sonlu eleman ağına bağlıdır. Sonlu elemanlar ağı, modeli, denklem kümelerinin çözüldüğü, "element" olarak bilinen daha küçük bölümlere ayırır. Model, büyük elementlerden oluşan kaba bir sonlu elemanlar ağına ya da küçük elementlerden oluşan yoğun bir sonlu elemanları ağına sahip olabilir. Yazılımlar, kaba bir sonlu elemanlar ağını hesaplanacak element formülasyonu az olduğu için daha hızlı hesaplarlar ve yüklemeler sonucu bazı bölgelerde oluşan stres yoğunlaşmalarını gösteremez. Yoğun bir sonlu elemanlar ağı, fazla element bulundurduğu için stres yoğunlaşmaları daha büyük ölçekte gösterebilir. Yoğun sonlu elemanlar ağı oluşturma, hesaplanacak element sayısının çokluğu sebebi ile hesaplama süresini arttırır, ancak sonuçların doğruluğunu da artırır.

Solidworks yazılımda oluşturulan geometrik modellerinin sonlu elemanlar ağı oluşturma işlemi, LS-DYNA içine bulunan otomatik sonlu elemanlar ağı oluşturma özelliği (Automash) ile gerçekleştirilir. Automasher'ın amacı, eleman boyutuna bağlı olarak bir seri, sıralı dizili sonlu eleman üretmektir. Otomatik sonlu elemanlar ağı oluşturma komut kutucuğunda, model, element boyut özellikleri belirlenebilir. Sonlu elemanlar ağı oluşturma işlemi element boyutlandırmasında, FEA'de doğru sonuçlar elde etmek için Şekil 2.10'da gösterildiği gibi küçük element boyutları seçilmelidir.

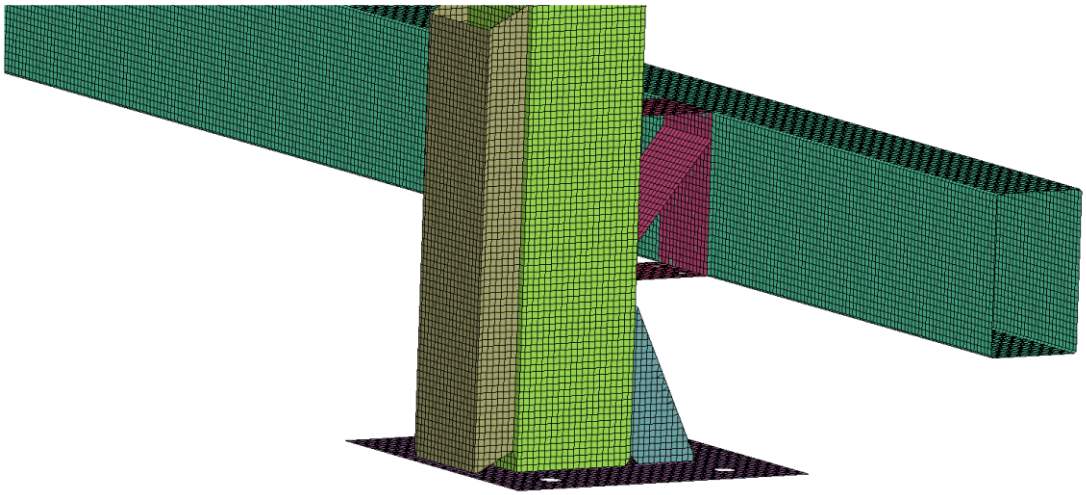
Solidworks yazılımında oluşturulan katı eleman modeli LS-PrePost yazılımına aktarılmıştır. LS-PrePost yazılımında, içe aktarılan üç boyutlu modelleri oluşturan yüzeylerin sonlu element özellikleri belirlenerek sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken maksimum ve minimum element boyutları sırasıyla 5 mm ve 10 mm olarak belirlenmiştir. Üç boyutlu yüzeylerin sonlu elemanlar ağı oluşturulurken kavisli kenarlar ve köşelerin modellenmesinde kare element modeli yetersiz kalabilmektedir. Böyle bölgelerde elementler açısal değişimlere göre farklı şekillerde oluşturulmaktadır. Bu sebeple element boyutları oluşturulurken maksimum boyutsal değişim ve açı değerleri de sırasıyla %15 ve 20 derece olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş eleman örnek görselleri Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.10 : Otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar ağı oluşturma işlemi.



Şekil 2.11 : Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model örnek görsel-1.



Şekil 2.12 : Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model örnek görsel-2.

2.4.3 Element formülasyonlarının tanımlanması

Tez kapsamında geliştirilen ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi sekiz ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler; dikme, dikme arka destek profili olannUNP180, dikme ön destek berkitmeleri, ankraj plakası, alt ray ile dikme arasında darbe emici özellik gösteren takoz, alt ray, orta ray ve üst raydır. Her bir otokorkuluk sistemi ana bileşeninde oluşacak gerilme ve deformasyon seviyeleri, seçilen çarpışma test tipine göre değişecektir. Bu şiddet ve deformasyon seviyeleri çarpışma açısı, çarpışma hızı, araç kütlesi gibi değişkenlere bağlıdır.

Otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modelinin eleman bilgilerini içerir özet tablosu Çizelge 2.1'de paylaşılmıştır. Otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modeli yalnızca kabuk (Shell) elemanlar içermektedir. Otokorkuluk sisteminin yapısal özellikleri gereği kabuk eleman modellemesi seçilmiştir. LS-DYNA içerisinde kabuk eleman ve katı eleman modeli gibi birçok farklı elemen model tipi bulunmaktadır. Eleman formülasyon tipleri sadece kabuk elemanlarını katı elemanlardan ayırmakla kalmaz, aynı zamanda LS-DYNA tarafından çözülecek analizin karmaşıklığını gidermekte de katkıda bulunur.

Çizelge 2.1 : Sonlu elemanlar modeli özeti.

Tanımlamalar	Normal açıklık	Genleşme derzi
Tasarım modülü adetleri (açıklık adedi)	17	8
Sonlu elmanlar ağı element adetleri	1897955	1527547
Sonlu elemanlar düğüm noktası adetleri	1883508	1516891

2.4.3.1 Belytschko – Tsay Shell kabuk eleman modeli

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modeli bileşenleri tamamen kabuk (Shell) elemanlar olarak tanımlanmıştır. ELFORM = 2, Belytshcko-Tsay olarak tanımlanır. Bu, kabuk elemanları için LS-DYNA'da tanımlanan element formülasyonlarından biridir. Belytshcko-Tsay kabuk eleman modeli, standart tek nokta entegrasyonuna sahip bir element formülasyonudur. Enerji emici tüpleri çevreleyen kabuk bileşenlerinin sonlu eleman modellerinin tümünde bu eleman formülasyonunu kullanır. ELFORM = 2'nin temel avantajları, tek nokta entegrasyonu ile verimli sonlu eleman hesapları yapabilmesi, doğruluk oranının yüksek olması ve daha kısa hesaplama süresine ihtiyaç duymasıdır.

2.4.4 Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Otokorkuluk sistemlerinin tasarımında, önemli parametrelerden birisi de malzeme seçimidir. Otokorkuluk sistemleri, çarpışma davranışı açısından malzeme sünekliği ile darbe emebilecek nitelikte olmalıdır. Kullanılan malzeme tipinin süneklik düzeyinin yüksek olması gerekmektedir. Sünek malzeme, yükleme altında şekil değiştirme kapasitesinin yüksekliği ile çarpma şiddeti performans seviyesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Aynı zamanda, çalışma genişliği performans seviyesinin belirlenmesinde de önemli bir parametredir. Malzeme sünekliği darbe emme kapasitesini artırarak ASI indeksini düşürmeye yardımcı olduğu gibi çalışma genişliği performans seviyesini de artırıcı bir unsurdur. Bu iki seviye arasındaki denge mühendislik tasarımı sayesinde sağlanmaktadır. Otokorkuluk sistemlerinin doğru miktarda mukavemete sahip olması, mühendislik tasarımının ana unsurudur. Çelik otokorkuluk sistemleri bu konuda avantajlı bir tasarım ortaya koymaktadır. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımında, çelik otokorkuluk sistemlerinin bu avantajlarında faydalanmak adına köprü korumalı çelik bir otokorkuluk sistemi geliştirilmiştir.

2.4.4.1 Yapısal sıcak hadde çelik

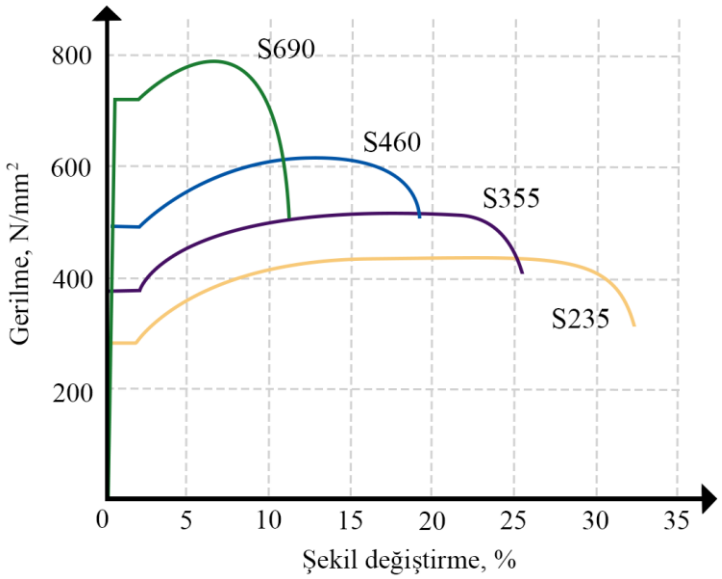
Yapısal çelik elemanlar, belirli bir işlevi yerine getirmek adına çeşitli şekil ve formlarda kullanılabilme kolaylığı ve istenilen şekil ve biçimde üretilebildiği için çok kullanışlı bir elemandır. Ayrıca, yapısal çelikler elemanlar kolayca şekil verilebilir, uyarlanabilir elemanlar olması, çeşitli kaynak tipleri ile çeşitli formlarda eklenebilme özellikleri ve üretim süreçlerinin gelişmişliği büyük avantaj sağlamaktadır. Çelik elemanların kaynaklı birleşimlerinde, istenilen mukavemet değerine garanti bir şekilde ulaşılabilme özellikleri, üretim ve tasarımda büyük avantajlar sağlamaktadır. Yapısal hadde çelik elemanlar üç ana mukavemet sınıfında üretilmektedir. Bu mukavemet sınıfları çelik kaliteleri olarak bilinir. Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi gerilme mukavemeti ve akma mukavemeti bakımından farklılık gösterirler.

Çizelge 2.2 : Yapısal sıcak hadde çelik dayanımları.

Tanımlamalar	Normal açıklık	Genleşme derzi
S235 JR	235	360-510
S275 JR	275	370-530
S355 JR	355	470-630

S420, S460, S500, S550, S620, S690, S890 ve S960 gibi yüksek akma dayanımına sahip türleri de mevcuttur.

Otokorkuluk sistem performansını etkileyen temel unsurlardan birisi malzeme seçimidir. Çarpışma esnasında otokorkuluk sistemine aktarılan kinetik enerjinin emilebilmesi, yolcuyu riske atmayacak yüksek mukavemetli bir malzemenin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu gereklilikler sünek bir malzeme kullanımını işaret etmektedir. Yüksek mukavemetli yapısal çelik, diğer mekanik özellikleri dikkate alınmadığı takdirde uygun gibi görünecektir. Yapısal çeliğin mukavemetindeki artış, direnci arttırır, ancak karşılığında kaynaklanabilirlik, şekillendirilebilirlik ve tokluk gibi diğer özellikleri azaltır. Yapısal çelikte, mukavemet arttıkça, nihai gerilme mukavemetinin akma mukavemetine oranı ve süneklik düzeyi azalır. Farklı yapısal çelik kalitelerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13 : Yapısal çelik sınıflarına göre gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Yapısal çelik elemanların sonlu eleman nümerik modelindeki kabulü, LS-DYNA'da MAT24 olarak veya MATERIAL_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY olarak da bilinen malzeme tanımlamasıdır. MAT24, gerilme eğrisine karşı belirsiz dayanıma sahip elasto-plastik malzemeleri temsil eder. Bu malzeme tanımında, gerilmeler altında oluşan elastik ve plastik şekil değiştirmelerin zamana göre değişimi tanımlanabilir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sisteminin tasarımında S235JR ve S355JR kalite sınıfına sahip yapısal çelik elemanlar kullanılmıştır. Otokorkuluk sistemini oluşturan parçalara ait yapısal çelik sınıf bilgileri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Otokorkuluk sistem elemanları yapısal çelik kalite sınıfları.

Otokorkuluk sistemi tipi	Otokorkuluk sistemini bileşenleri	Yapısal çelik sınıfları
Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı	UNP180	S235 JR
	Berkitme plakaları	S235 JR
	Dikme elemanlar	S235 JR
	Takoz eleman	S355 JR
	Alt ray	S355 JR
	Orta ray	S355 JR
	Üst ray	S355 JR
	Dikme kapama plakası	S355 JR
	Ankraj plakası	S355 JR
Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi bölgesi tasarımı	UNP180	S355 JR
	Berkitme plakaları	S355 JR
	Dikme elemanlar	S355 JR
	Takoz eleman	S355 JR
	Alt ray	S355 JR
	Orta ray	S355 JR
	Üst ray	S355 JR
	Dikme kapama plakası	S355 JR
	Ankraj plakası	S355 JR

LS-DYNA yazılımı için oluşturulan nümerik hesap dosyasında otokorkuluk sistemi tasarımında, kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin de tanımlanması gerekmektedir. LS-PrePost yazılımında oluşturulan nümerik hesap dosyasında otokorkuluk sistemi tasarımında kullanılan S235JR ve S355JR kalite sınıflı çelik elemanların mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Bu iki yapısal çelik sınıfının akma mukavemet değerleri ve gerilme-şekil değiştirme grafik özellikleri farklılık göstermektedir. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri, yazılım içerisine grafik olarak tanımlanmıştır. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımında kullanılan yapısal çelik elemanlarına ait mekanik özellikler Çizelge 2.4'de verilmiştir.

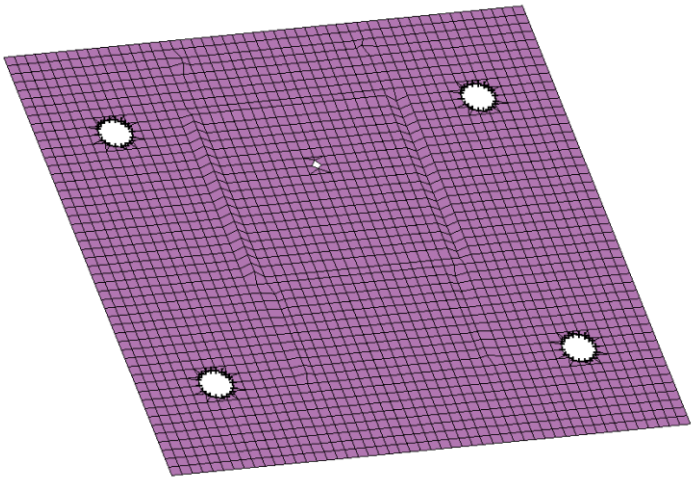
Çizelge 2.4 : Yapısal çelik sınıfları minimum dayanım özellikleri.

Parametre	Normal açıklık	Genleşme derzi
Birim ağırlık (Ton)	7,85	7,85
Elastisiste modülü (MPa)	200000	200000
Poisson oranı	0,3	0,3
Akma mukavemeti	235	355

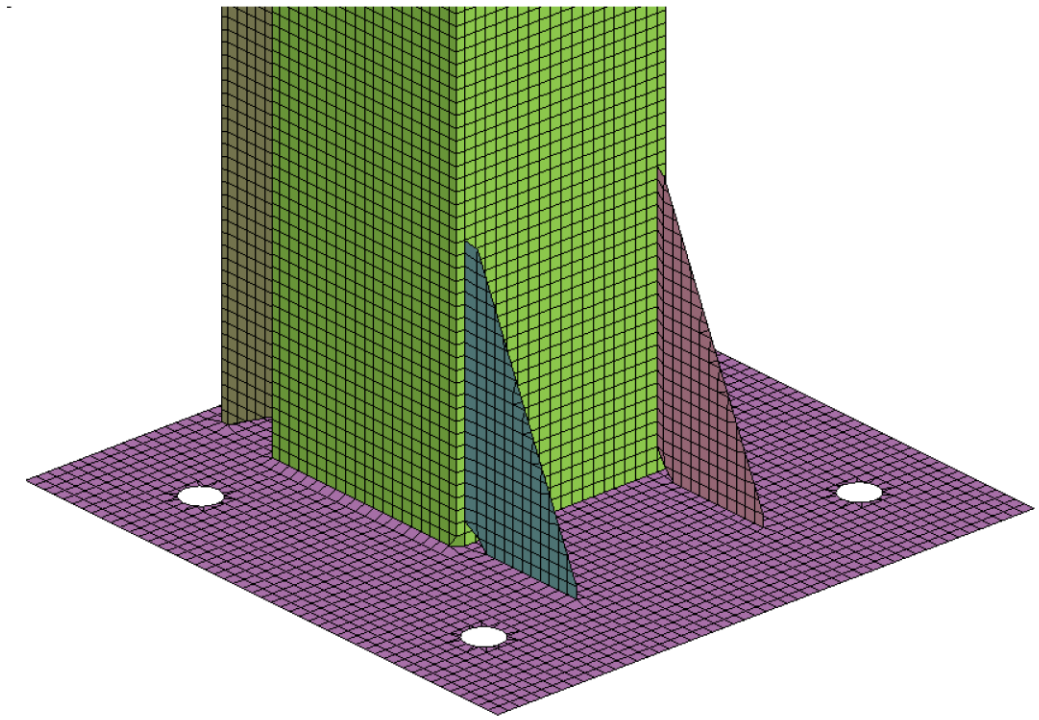
2.4.5 Sınır-Mesnet koşullarının belirlenmesi

Sınır ve mesnet koşulları otokorkuluk sisteminin hareket kısıtlamalarını temsil eden tanımlamalardır. Sınır ve mesnet koşulları LS-DYNA'da BOUNDARY_SPC olarak bilinen mesnet tanımı yardımı ile tanımlanmıştır. İlgili tanım, sonlu elemanlar modelindeki öğelerin hareket kısıtlamalarını temsil eder. Bu tanım ile otokorkuluk sisteminin herhangi bir parçasının üç boyutlu uzaydaki hareket ve dönmeleri kısıtlanabilir. Ankraj plakalarının zemin bağlantısında tanımlanan hareket kısıtlamaları Şekil 2.14'de paylaşılmıştır. Ankraj plakası kimyasal ankrajları, çarpma etkisinde kopmayacak nitelikte tasarlanmıştır. Bu sebeple ankraj plakalarının tijlere denk gelen bölgelerindeki sonlu eleman elementleri arasındaki düğüm noktalarının (node) hareketleri BOUNDARY_SPC mesnet tanımı ile kısıtlanmıştır.

Otokorkuluk sistem elemanları kaynaklı birleşimleri, çarpışma esnasında kaynaklara gelebilecek maksimum kuvvetlere dayanacak nitelikte tasarlanmıştır. Otokorkuluk sistem elemanlarını birleştiren kaynakların mukavemet değerleri, çelik elemanın kopma mukavemet değerinin üzerinde olduğu için ilgili kaynaklı birleşim bölgelerinde ayrıca bir kaynak tanımı yapılmamıştır. Kaynaklı birleşim ile birbirine bağlanan elemanlar tek bir eleman gibi tasarlanmıştır. Bu tasarım öğesinin modele tanımlanmasında, LS-PrePost paket programında tanımlı komutlardan olan "merge" komutu kullanılmıştır. "Merge" komutu, sonlu elemanlar ağını oluşturan elementleri temas noktalarından birleştiren bir komuttur. Bu komut elemanları birleştiren düğüm noktalarını (node) birbirine sabitler ve tek bir düğüm noktası gibi çalışmasını sağlar. Merge tanımı için temsili görsel Şekil 1.15'de verilmiştir.



Şekil 2.14 : Ankraj plakaları mesnet tanımları (BOUNDARY_SPC).



Şekil 2.15 : Element merge işlemi temsili görseli.

2.4.6 Temas kabullerinin belirlenmesi

Otokorkuluk sistem bileşenleri arasındaki temas şartlarının tanımı, eksplisit deformasyon problemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Bileşenler arasındaki temasın doğru modellenmesi, analiz sonucu elde edeceğimiz matematiksel verilerin ve sonlu eleman simülasyonlarının doğruluğu için çok önemlidir.

LS-DYNA paket programı, çeşitli temas özellik tanımları içerir. Bazı temas tanımları spesifik uygulamalar için özelleşmiş tanımlardır. Bazı tanımlar ise genel kullanım içindir oluşturulmuştur. LS-DYNA'nın gelişimi ve sürekli geliştirilmesi, temas tipleri için yeni gelişmiş spesifikasyonlara yol açmıştır. Önceki LS-DYNA sürümlerindeki eski temas tanımları, eski modellerin geçmişte olduğu gibi çalışmasını sağlamak için halen geçerli temas kabulleri kitaplığında mevcuttur.

Temas; parçalar (parts), parça setleri (part sets), eleman setleri (sagment sets) ve düğüm setleri (node sets) değerlendirilerek tanımlanır. Bileşenler, tali veya ana elemanlar olabilir. Bir tali eleman düğüm noktasının (node), bir ana eleman ile gerçekleştireceği potansiyel temaslar, bir birim zaman adımında farklı algoritmalar kullanılarak kontrol edilir. Eğer temas meydana gelirse, temasa direnmek ve ortadan kaldırmak için temas derinliğine orantılı bir kuvvet uygulanır.

Bir modeldeki olası temas durumlarını ele alacak, tek bir temas kabulü tanımlamak doğru bir seçenek olacaktır. Ayrıca, iki veya daha fazla temas kabulü, aynı temas durumu için sayısal dengesizliklere yol açabileceğinden, bir modelde birden fazla temas tanımlanması önerilmez. Otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modeli, birbiriyle temas halinde olan farklı bileşenlerden oluştuğu için, çarpma sırasında yer değiştirmeye ve/veya deformasyona uğrayacaktır. Analizdeki tüm bileşenleri içerecek en iyi temas kabulü seçeneği, LS-DYNA yazılımı içerisindeki gömülü temas kabullerinden olan "CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE" temas kabulüdür. Bu temas algoritması, hızlı ve sağlam etkiler için avantajlıdır. Temas kabulünü tanımlamak için oluşturulan LS-DYNA kodlar Şekil 1.16'da paylaşılmıştır.

```
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
$     SSID      MSID     SSTYP     MSTYP    SBOXID    MBOXID       SPR       MPR
   1000002       329         2         2         0                   0         0
$       FS        FD        DC        VC       VDC    PENCHK        BT        DT
      0.7       0.6       0.0       0.0       0.0         0       0.0 1.000E+20
$      SFS       SFM       SST       MST      SFST      SFMT       FSF       VSF
      1.0       1.0      10.0      10.0       1.0       1.0       1.0       1.0
$     SOFT    SOFSCL    LCIDAB    MAXPAR    PENTOL     DEPTH     BSORT    FRCFRQ
        0      0.10                1.025       0.0       2.0       100         1
$   PENMAX    THKOPT    SHLTHK     SNLOG      ISYM     I2D3D
      0.0         0         0         0         0         0
$     IGAP    IGNORE
        2         1
```

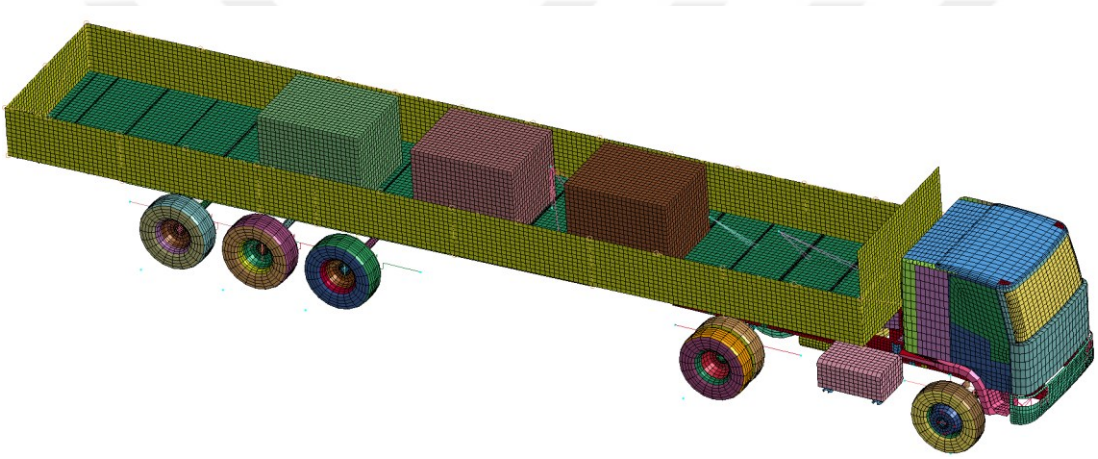
Şekil 2.16 : LS-DYNA temas kabulü.

2.4.7 Analiz Seçeneklerinin Belirlenmesi

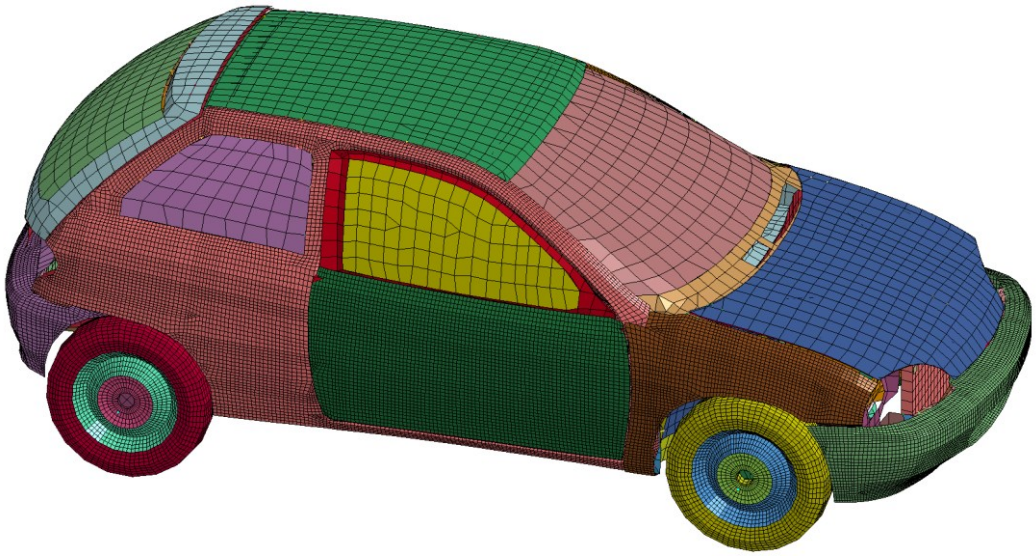
LS-DYNA, eksplisit ve implisit sonlu elemanlar problemlerini çözmek için özelleşmiş bir bilgisayarlı simülasyon yazılımıdır. Bir soruyu çözmek adına uygulanan her herhangi bir çözümde olduğu gibi, veri çıktısını ve analiz için gerekli maksimum süreyi tanımlamak oldukça önemlidir. Bu tanımlamalar "DATABASE" ve "CONTROL TERMINATION" bölümlerinden yapılmaktadır. "DATABASE", çıktı dosyalarının denetlemek için çok çeşitli anahtar seçenekler içermektedir. Analiz simülasyonu çıktıları için LS-DYNA paket yazılımında kullanılan anahtar seçenek "DATABASE_BINARY_D3PLOT"'dur. Bu seçenek, çıktı sonuçlarını "D3plot" adlı bir dosyaya kaydeder. "D3plot" dosyası, farklı zamanlardaki yer değiştirme, gerilme, birim şekil değiştirme, hızlar vb. analiz sonuç verilerini içeren ve analiz verilerine ulaşılmasını sağlayan dosyadır. Ayrıca "ASCII_options" bölümünden analiz sonrası hangi matematiksel veri çıktılarının alınacağı ve veri çıktısı özellikleri belirlenmelidir. "CONTROL TERMINATION" seçeneği ise analiz süresini belirlemede kullanılan bir özelliktir. Belirlenen maksimum süreye ulaşıldıktan sonra analizi sonlandırmaktadır.

2.5 Taşıtların LS-PrePost Sonlu Elemanlar Nümerik Modeli

TB81 ve TB11 testlerinde kullanılacak olan taşıtlar sırasıyla 38 ton ağırlıklı römorklu HGV ve 900 kg ağırlıklı binek otomobildir. Bu taşıt modelleri daha önceden üreticiler tarafından gerçek geometriye uygun olarak oluşturulmuş modellerdir. Bu çalışmada taşıt modelleri baştan oluşturulmamıştır. 38 ton ağırlıklı römorklu HGV taşıt modeli olarak IVECO marka bir tırın sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. 900 kg ağırlıklı binek otomobil modeli olarak ise SUZUKI GEO METRO sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Taşıt modelleri üreticiler ve test merkezlerinden temin edilmiştir. IVECO marka tıra ait sonlu elemanlar modeli Şekil 2.17'de ve SUZUKİ GEO METRO sonlu elemanlar modeli Şekil 2.18'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.17 : 38 ton IVECO marka tır sonlu elemanlar modeli.



Şekil 2.18 : 900 kg SUZUKI GEO METRO sonlu elemanlar modeli.

2.6 Çarpışma Testi İçin LS-DYNA Sonlu Elemanlar Nümerik Modelinin Oluşturulması

LS-PrePost yazılımı ile oluşturulan otokorkuluk sistemi ve araç sonlu elemanlar modellerini TB11 ve TB81 test düzeneklerinde bir araya getiren nihai bir nümerik hesap dosyası oluşturulmuştur. Bu nümerik model her bir test tipi için ayrı ayrı olmak üzere iki adet olarak oluşturulmuştur.

Otokorkuluk sistemi ve taşıt sonlu elemanlar modellerin, yalnızca sistemi oluşturan ana bileşenlerin tanımlandığı modellerdir. Bu modeller, otokorkuluk ve taşıt sistemlerini oluşturan ana ve tali parçaların geometrik özelliklerinin tanımlandığı, sonlu elemanlar hesabı için gerekli sonlu elemanlar ağının oluşturulduğu, malzeme ve element özelliklerinin belirlendiği temel modellerdir. Hareket özellikleri, temas koşulları gibi dinamik çarpışma hareketini tanımlayacak bütün tanımlar ayrı bir LS-DYNA nümerik hesap dosyasında oluşturulmuştur. Bu dosyanın temel görevi; oluşturulmuş otokorkuluk sistemi sonlu elemanlar modeli ile taşıt sonlu elemanlar modelini istenilen çarpışma özelliklerine göre bir araya getirmek, kendi içinde tanımladığımız temas ve analiz koşulları ile çarpışma testini simüle etmek ve analiz çıktılarını vermektir. Bu ana analiz dosyasında; çarpışma açısı, çarpışma hızı, çarpma noktası, temas kabulleri, analiz süresi, analiz veri alma sıklığı gibi çarpışma testi ve sonlu elemanlar analizi özelindeki temel tanımlamalar bulunmaktadır. Bu dosyayı kullanmaktaki temel amaç, oluşturulan otokorkuluk sistem modeli ve taşıt sistem modelini tek bir model üzerinde oluşturmanın vereceği zorluk ve potansiyel programsal sıkıntılardır.

2.7 Otokorkuluk Sistemi Tasarımının Optimizasyonu

Otokorkuluk sistemlerinin uygunluğu, standartta belirtilen tam ölçekli çarpışma testleri ile belirlenmektedir. Otokorkuluk sistemlerinin test prosedürleri uzun ve pahalı süreçlerdir. Bu nedenle, teste giren otokorkuluk sisteminin ilk seferde testleri geçebiliyor olması en iyi alternatiftir. Defalarca tekrarlanan testler, hem zaman hem de test maliyeti olarak büyük ekonomik yükler getirmektedir. Tez kapasımda yapılan çalışmada, otokorkuluk sisteminin çarpışma davranışları ilgili standartta belirtilen parametreler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Geliştirilen otokorkuluk sisteminin optimizasyonu için çok sayıda bilgisayar simülasyonu yapılmıştır. Kullanılan yapısal

çelik elemanların et kalınlıkları, kesitleri ve konumları tasarım aşamasında belirlenen performans seviyelerini sağlayabilmesi konusunda değerlendirilmiştir. Tüm optimizasyon çalışmaları sonucunda, ilgili standartta belirtilen parametrelere uygun, "B" sınıf çarpma şiddet ve W3 çalışma genişliği performans seviyelerine sahip bir otokorkuluk sistemi tasarımı elde etmek için tasarımı oluşturan her bir eleman irdelenmiş ve nihai tasarım ortaya çıkmıştır.

2.8 Çarpışma Noktasının Belirlenmesi

Otokorkuluk sistemlerinin uygunluğu, standartta belirtilen tam ölçekli testler ile belirlenmektedir. TS EN 1317 standardında, çarpışma noktasının, çarpışma testini gerçekleştirecek test kurulunca belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Çarpışma noktasını belirlenmesinde, deney kuruluşunun otokorkuluk sistemi için en elverişsiz bölgeyi çarpışma noktası olarak belirlemesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca standart, varsa otokorkuluk sistemi tasarımının en hassas özelliğinin çarpışma noktasının belirlenmesinde dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Standartta, taşıtın otokorkuluk sistemine çarpacağı nokta ile ilgili net bir kriter belirtilmemiştir. Bu sebeple otokorkuluk sistemi tasarımının, bütün olası çarpışma noktalarında, tasarım alt sınırları olan W3 çalışma genişliği ve "B" sınıfı çarpma şiddeti performans seviyelerini sağlaması gerekmektedir.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarım bölgesinin tabi tutulacağı TB81 test simülasyonu için çarpışma noktası, farklı çarpışma noktası senaryolarına göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz simülasyonları ile değerlendirilmiştir. Taşıtın dikme bölgesine çarpması durumunda; taşıtın teker ve tampon gibi elemanlarının otokorkuluk sistemine takılma riskinin olduğu görülmüştür. İlgili çarpışma durumunun, taşıtın otokorkuluk sistemini aşarak karayolu sınırları dışına çıkma potansiyeli taşıdığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, dikmeye çarpma durum senaryosunda değerlendirilen diğer senaryolara oranla çalışma genişliği değerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Simülasyon çalışmaları sonucunda, TB81 testi için en elverişsiz çarpışma noktasının dikme bölgesi olduğuna karar verilmiştir.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarım bölgesinin tabi tutulacağı TB11 test simülasyonu için çarpışma noktası, farklı çarpışma noktası senaryolarına göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz simülasyonları ile değerlendirilmiştir. Taşıtın dikme bölgesine çarpması durumunda ASI ve THIV

indekslerinin en yüksek değerlerini aldığı görülmüştür. Simülasyon çalışmaları sonucunda TB11 testi için en elverişsiz çarpışma noktasının dikme bölgesi olduğuna karar verilmiştir.

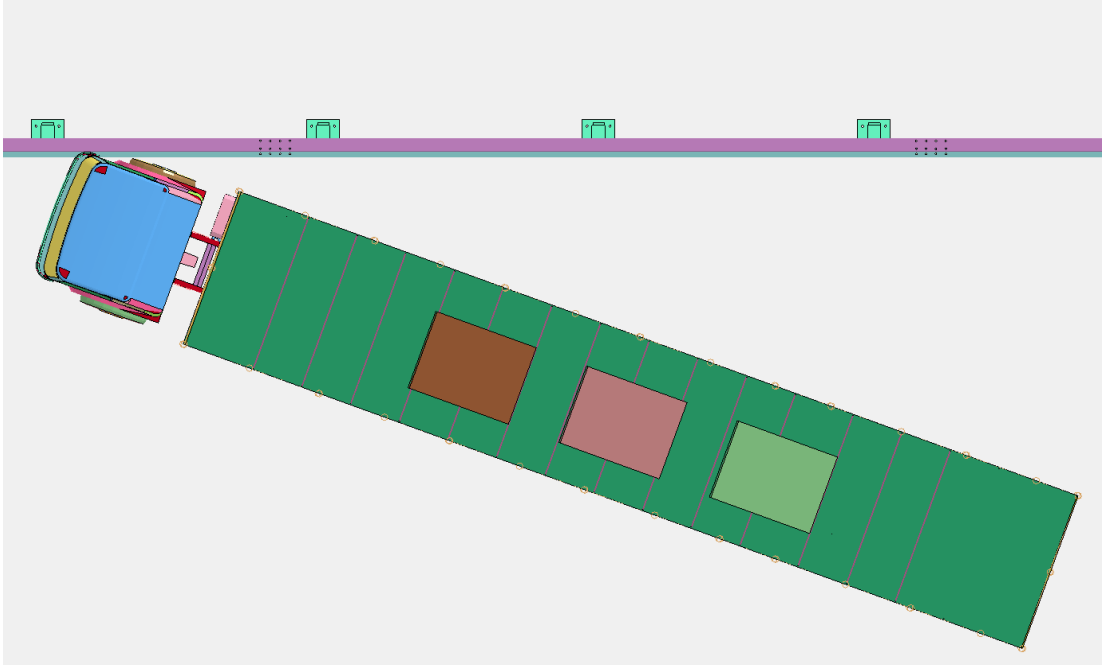
Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi bölgesi tasarımının tabi tutulacağı TB81 test simülasyonu için çarpışma noktası, farklı çarpışma noktası senaryolarına göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz simülasyonları ile değerlendirilmiştir. Çarpışma noktasının belirlenmesinde çok sayıda farklı çarpışma noktası senaryosu sonlu elemanlar analiz simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çarpışma test simülasyonları; taşıtın otokorkuluk sistemine takılma, otokorkuluk sistemini aşıp kara yolu sınırlarının dışına çıkması ve istenen W3 çalışma genişliği değerinin elde edilememesi gibi birçok parametre açısından değerlendirilmiştir. Taşıtın genleşme etkileri için tasarlanmış kayıcı ray eleman bağlantı bölgesine çarpması durumunda; kayıcı bağlantının aşırı yüklemler sonucu ayrılabileceği ve taşıtın karayolu sınırlarının dışına çıkma potansiyeli taşıdığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kayıcı bağlantı bölgesine çarpma durum senaryosunda değerlendirilen diğer senaryolara oranla çalışma genişliği seviyesinin değerinin daha yüksek elde edildiği görülmüştür. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda en elverişsiz çarpışma senaryosunun taşıtın kayıcı ray eleman bağlantı bölgesine çarpması durumu olduğuna karar verilmiştir.

3. TAM ÖLÇEKLİ ÇARPIŞMA TEST SİMÜLASYONU SONUÇLARI

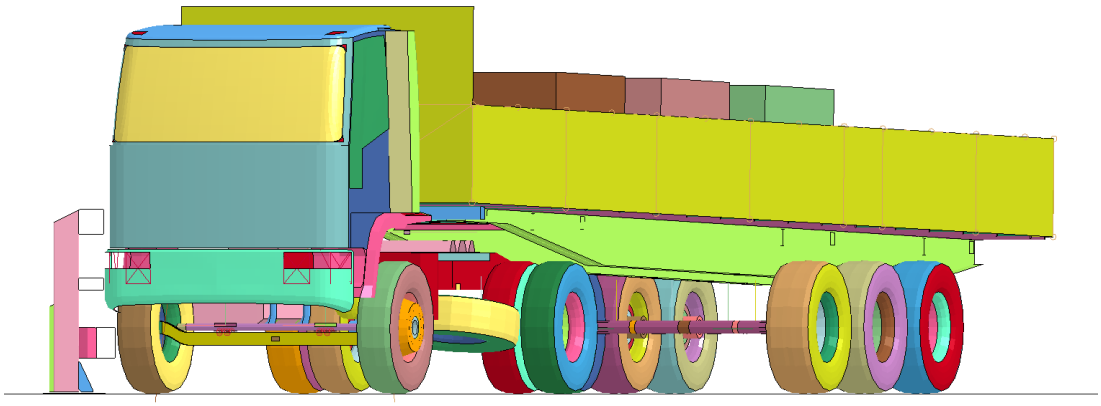
Sonlu elemanlar analiz simülasyonları ilgili TS EN 1317 standardında belirtilen tam ölçekli çarpışma testi gereklilikleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Çarpışma senaryoları için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonucu oluşturulan bilgisayar simülasyonlarında, otokorkuluk sisteminin performans ve davranışları ortaya koyulmuştur.

3.1 Normal Açıklıklı Otokorkuluk Tasarımı TB81 Çarpışma Testi Simülasyonu

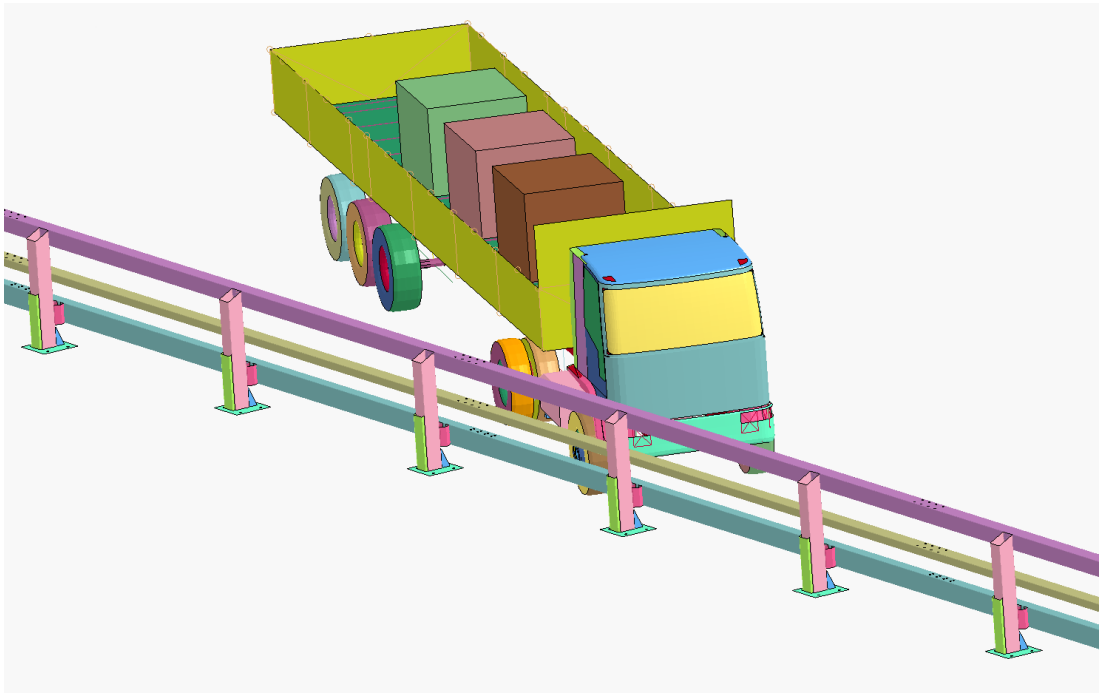
TB81 testi; 65 km/saat hızla seyreden 38 ton ağırlığındaki römorklu HGV taşıtın, otokorkuluk sistemine yirmi derece yaklaşım açısıyla çarptırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz simülasyonunda, TB81 test düzeni aynen uygulanmıştır. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı TB81 çarpışma test düzenini gösterir çarpışma öncesi görselleri Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.1 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli.



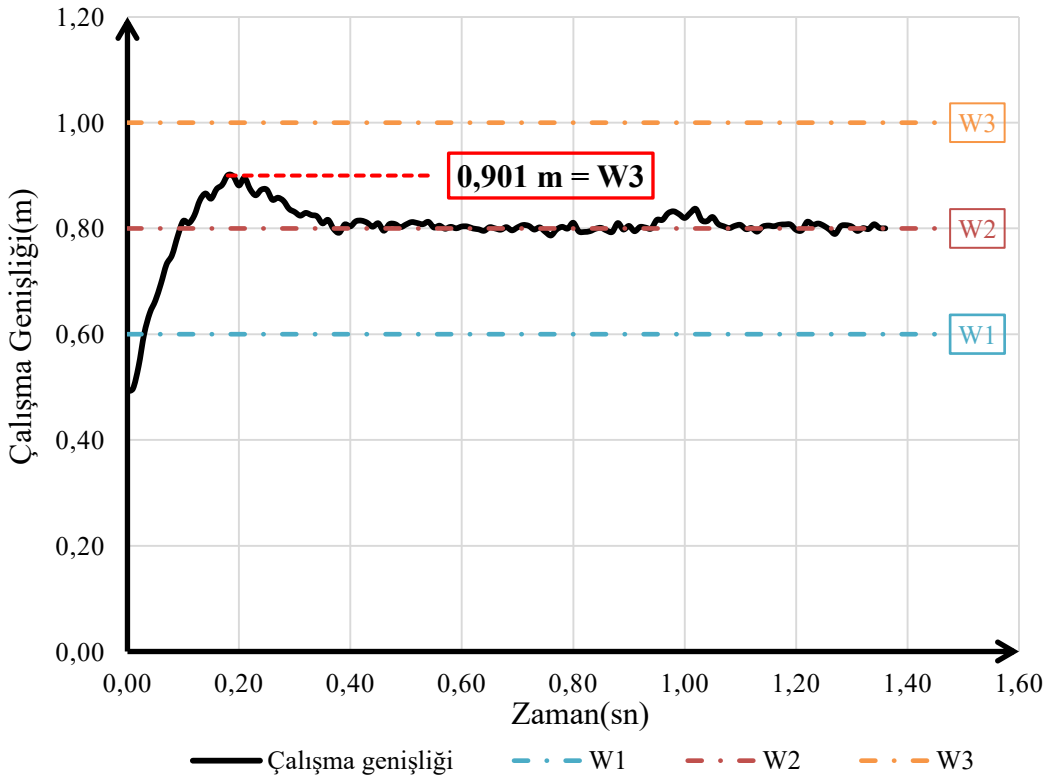
Şekil 3.2 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe cephe görseli.



Şekil 3.3 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli.

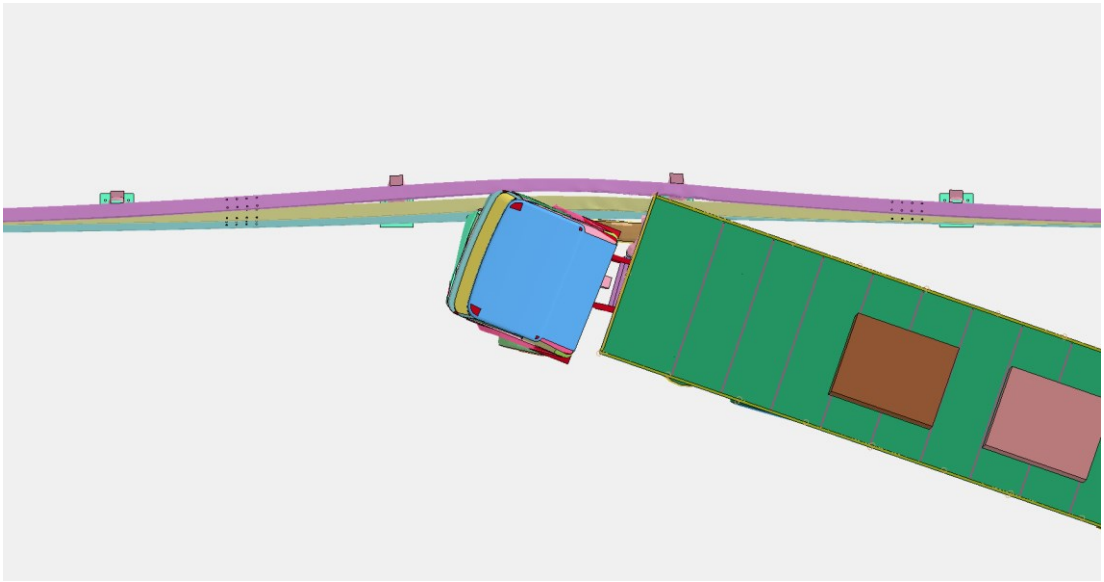
TB81 çarpışma testi simülasyonunda otokorkuluk sisteminin, 0,19'ncu saniyede maksimum yanal yer değiştirme yani çalışma genişliği değerine ulaştığı görülmüştür. Çarpışma test simülasyonundan alınan veriye göre çalışma genişliği değeri 0,901m olarak elde edilmiştir. 0.901 m çalışma genişliği değerine göre performans seviyesi W3 olarak elde belirlenmiştir. Tasarım aşamasında belirlenen çalışma genişliği performans seviyesi başarı ile elde edilmiştir. Çarpışma test simülasyonundan alınan veriler ile oluşturulmuş çalışma genişliği-zaman grafiği şekil 3.4'de paylaşılmıştır. Şekil 3.5'de paylaşılan çizelge, yanal yönde en fazla yer değiştirme yapan sonlu elemanlar düğüm noktası verilerine göre oluşturulmuştur. Teze konu otokorkuluk

sisteminde, en fazla yanal yer değiştirme taşıtın çarpışma noktası olarak belirlenen dikme elemanda gerçekleşmiştir.

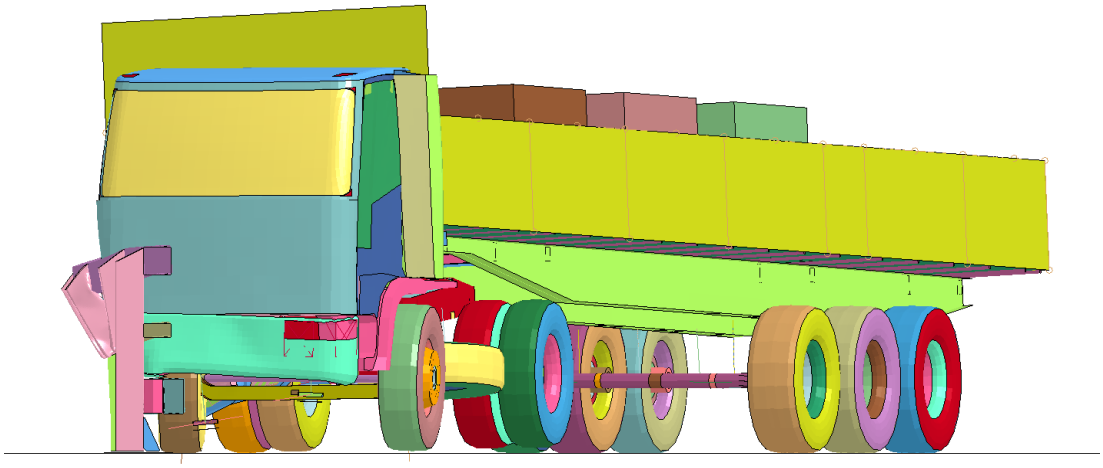


Şekil 3.4 : Çalışma genişliği zaman grafiği.

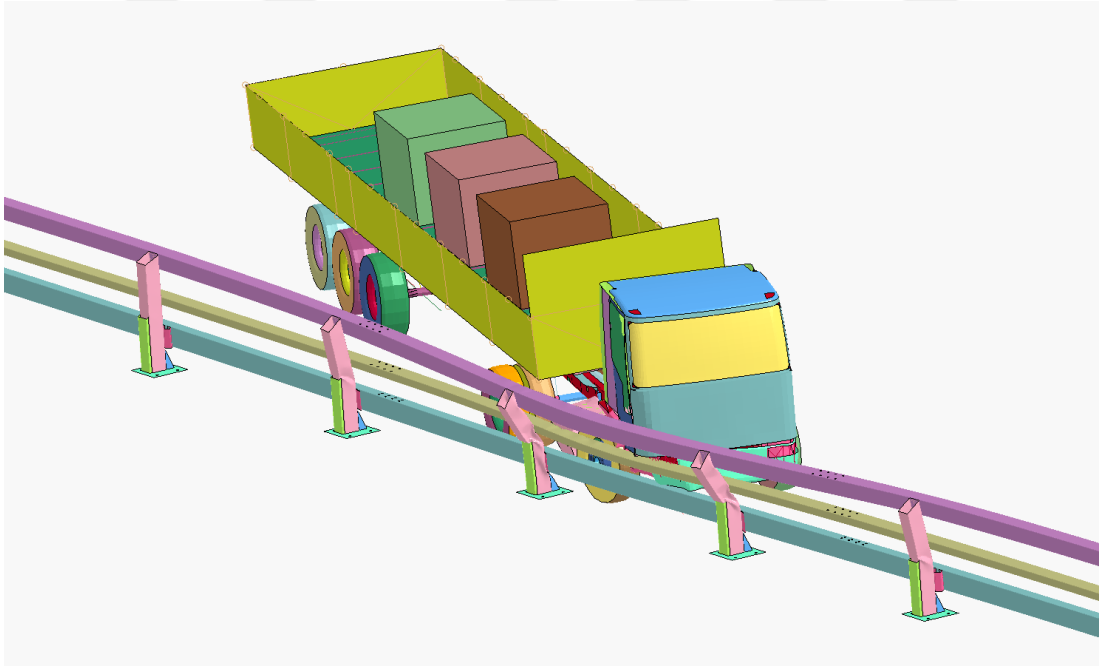
Otokorkuluk sisteminin çalışma genişliğine ulaştığı anı farklı açılardan gösterir TB81 test simülasyon görselleri Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 : TB81 test simülasyonu 0,19'ncu saniye, plan görseli.



Şekil 3.6 : TB81 test simülasyonu 0,19'ncu saniye, ön cephe cephe görseli.



Şekil 3.7 : TB81 test simülasyonu 0,19'ncu saniye, perspektif görseli.

Otokorkuluk sistemi dikme elemanı ilk çarpışma etkileri altında plastik eğilme etkileri göstermiştir. Hedeflendiği gibi plastik şekil değiştirmeye uğrayarak momentum sönümleme ve aracı yönlendirme görevini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür.

Dikme sistemi tasarımı çarpışma davranışı açısından başarılı bir performans göstermiştir. Otokorkuluk sistemini aşma ve otokorkuluk sistemine takılma gibi durumlar gözlemlenmemiştir. Dikme ön berkitme elemanları ve UNP180 profilin hedeflendiği gibi otokorkuluk sistemi dikmesinin eğilme ve burulma etkilerini sınırlandırdığı görülmüştür.

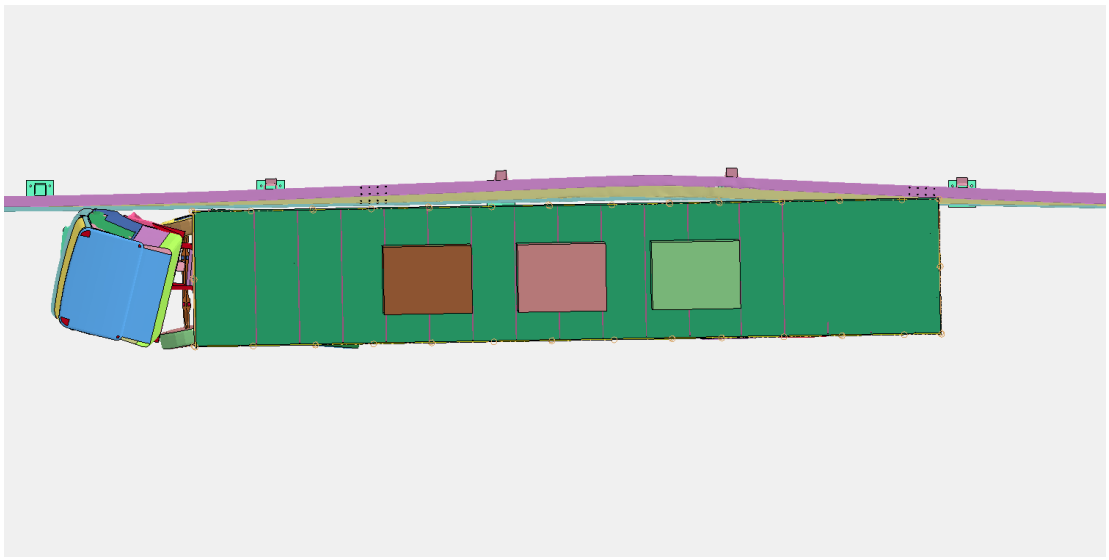
Çarpışma etkisiyle ray elemanlarda, plastik şekil değiştirmeler oluştuğu gözlemlenmiştir. Otokorkuluk sistemi ray elemanlarının, taşıtı hareketini sınırlandırma ve taşıtı karayoluna yönlendirme görevini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür.

Çelik takoz elemanın, ilk çarpışma etkileri ile katlanarak darbe emme görevini gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca takoz eleman, alt ray elemanın konumunu koruyarak taşıt tekerinin ray elemana takılmasını önlediği görülmüştür.

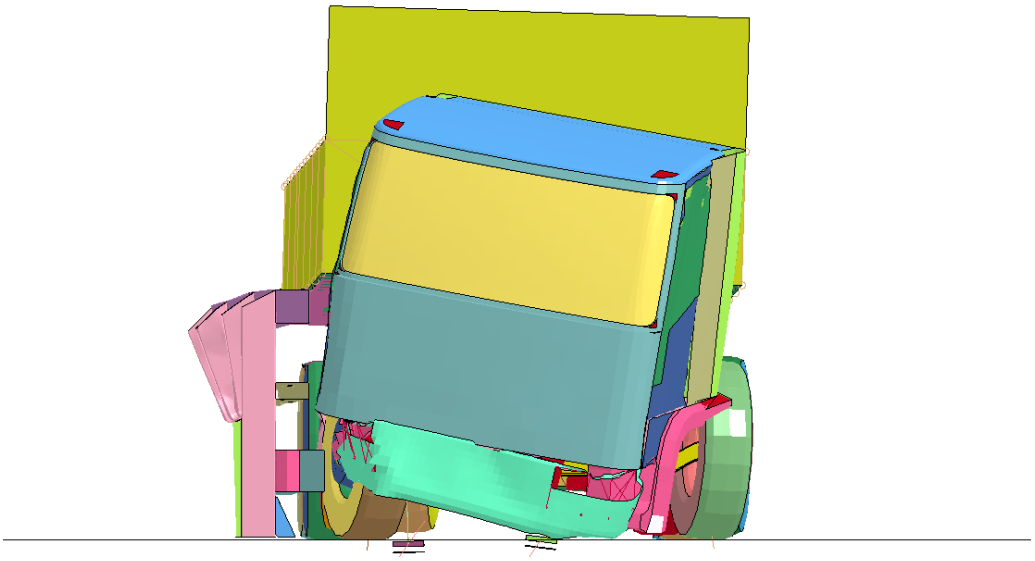
Çarpışma etkisiyle, otokorkuluk sistemi ankraj plakalarında herhangi bir eğilme ve burulma etkisi oluşmadığı görülmüştür.

Çarpışma etkisiyle, otokorkuluk sistemini oluşturan elemanların bağlantılarında herhangi bir kopma eylemi görülmemiştir.

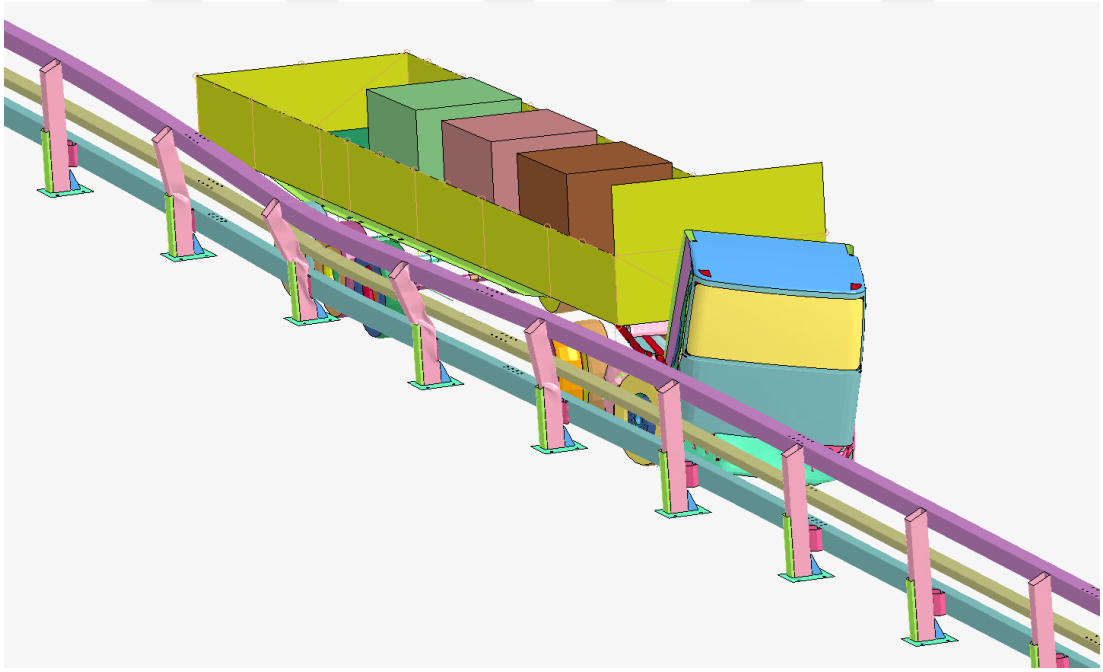
Otokorkuluk sistemine 20 derece açıyla çarpan taşıtın, otokorkuluk sistemi tarafından yol doğrultusuna yönlendirdiği gözlemlenmiştir. Taşıtın yol doğrultusundaki hareketini bir süre otokorkuluk sistemine temas ederek sürdürdüğü ve sonrasında yol doğrultusuna dönerek hareketine devam ettiği gözlemlenmiştir. TB81 testi simülasyon sonuçlarında, otokorkuluk sisteminin taşıtı güvenli bir şekilde karayoluna döndürme konusunda başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Taşıtın karayolu doğrultusuna döndüğü anı farklı açılardan gösterir TB81 test simülasyon görselleri Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.8 : TB81 test simülasyonu 0,95'nci saniye, plan görseli.



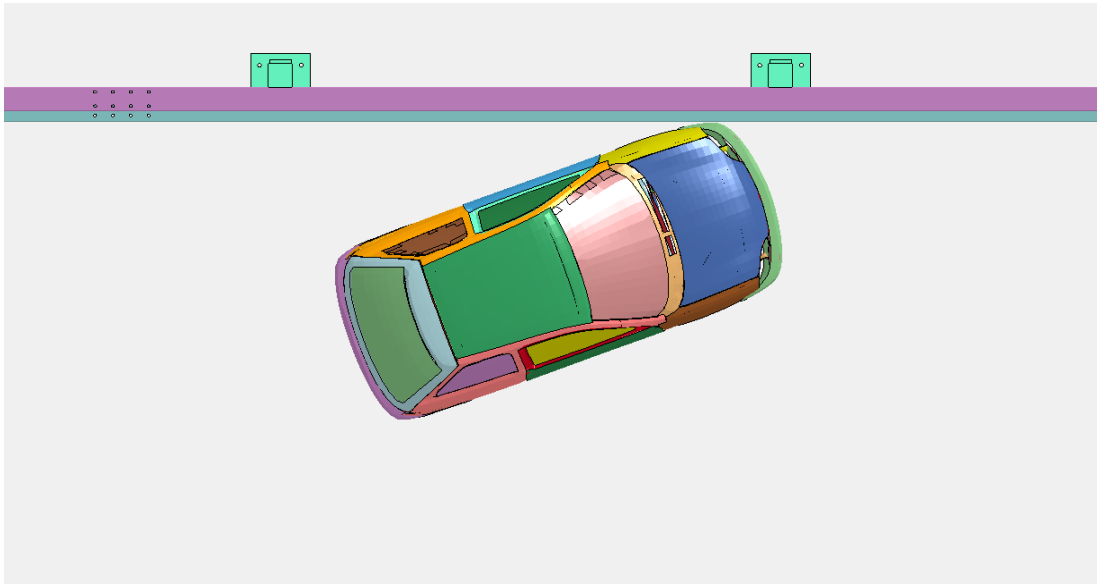
Şekil 3.9 : TB81 test simülasyonu 0,95'ncı saniye, ön cephe cephe görseli.



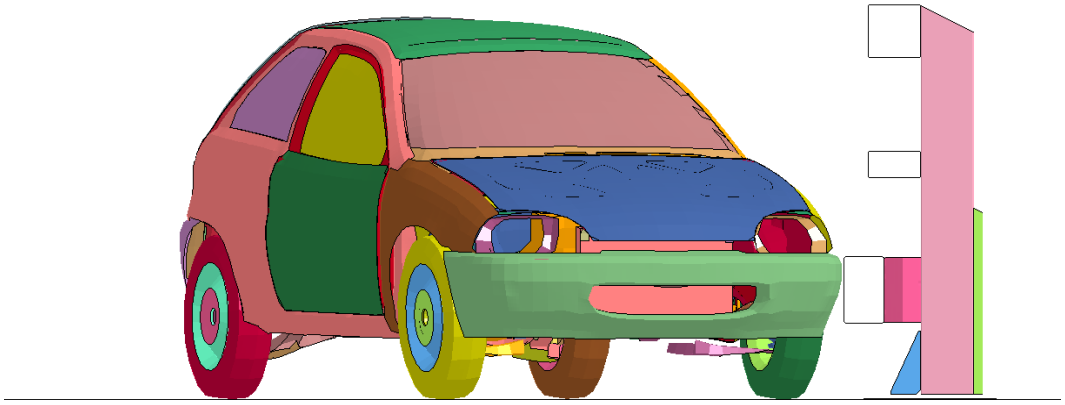
Şekil 3.10 : TB81 test simülasyonu 0,95'ncı saniye, perspektif görseli.

3.2 Normal Açıklıklı Otokorkuluk Tasarımı TB11 Çarpışma Testi Simülasyonu

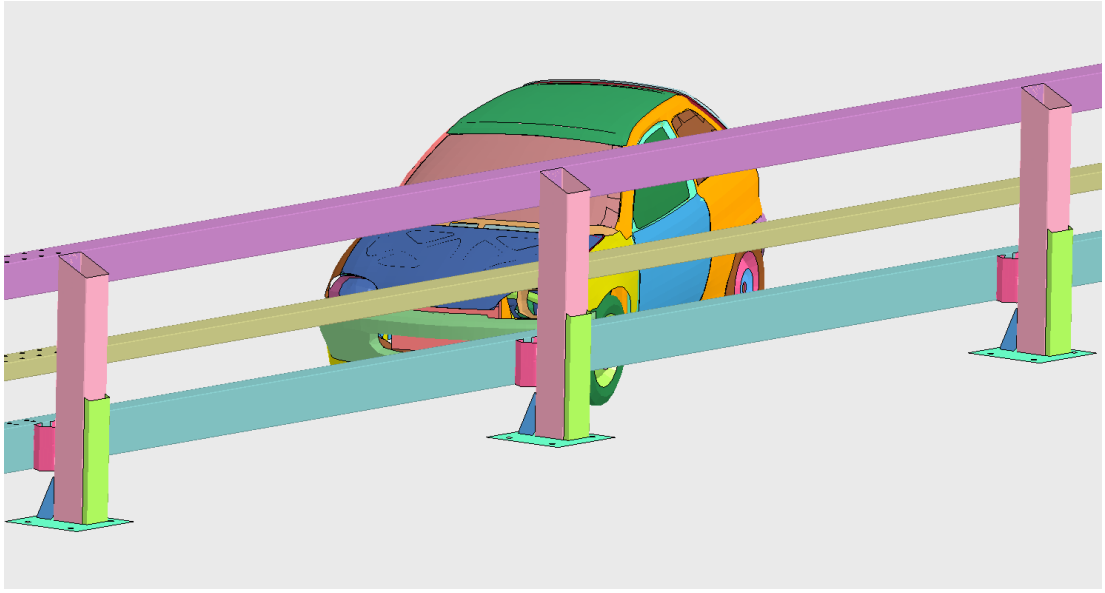
TB11 testi; 100km/saat hızla seyreden 900 kg ağırlığındaki taşıtın, otokorkuluk sistemine yirmi derece yaklaşım açısıyla çarptırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz simülasyonunda TB11 test düzeni aynen uygulanmıştır. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı TB11 çarpışma test düzenini gösterir çarpışma öncesi görselleri Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.11 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli.

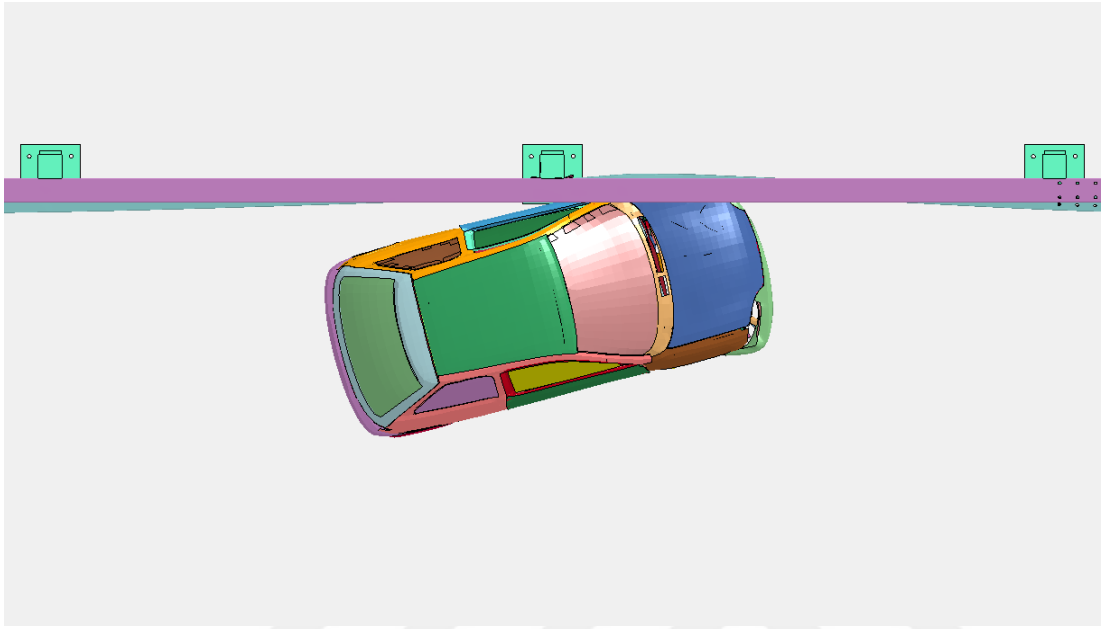


Şekil 3.12 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe görseli.

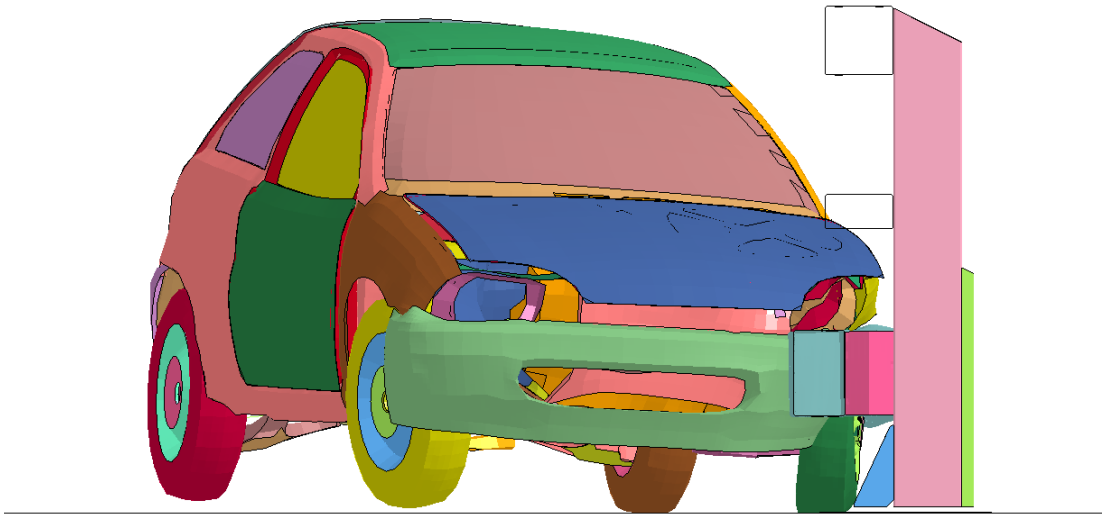


Şekil 3.13 : TB11 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli.

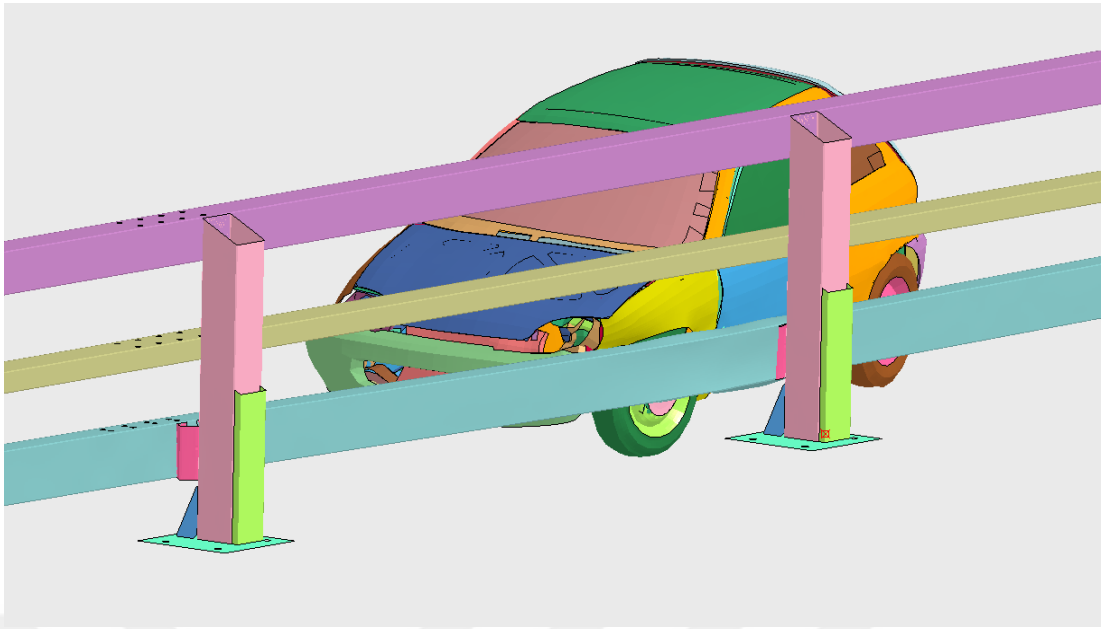
Otokorkuluk sisteminde 0,07'nci saniyede çarpışma etkilerinin maksimuma ulaştığı görülmüştür. Otokorkuluk sisteminde çarpışma etkilerinin maksimuma ulaştığı anı farklı açılardan gösterir TB81 test simülasyon görselleri Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.14 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye plan görseli.



Şekil 3.15 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye ön cephe görseli.



Şekil 3.16 : TB11 test simülasyonu 0,07'nci saniye perspektif görseli.

Dikme profili, ön berkitme elemanlar ve UNP180 elemandan oluşan otokorkuluk dikme sisteminde, ilk çarpışma etkileriyle yalnızca elastik şekil değiştirmeler olduğu gözlemlenmiştir. 900 kg ağırlıklı taşıtın, dikme sistemi üzerinde plastik eğilme etkileri yaratacak kadar büyük bir momentuma ulaşamadığı görülmüştür.

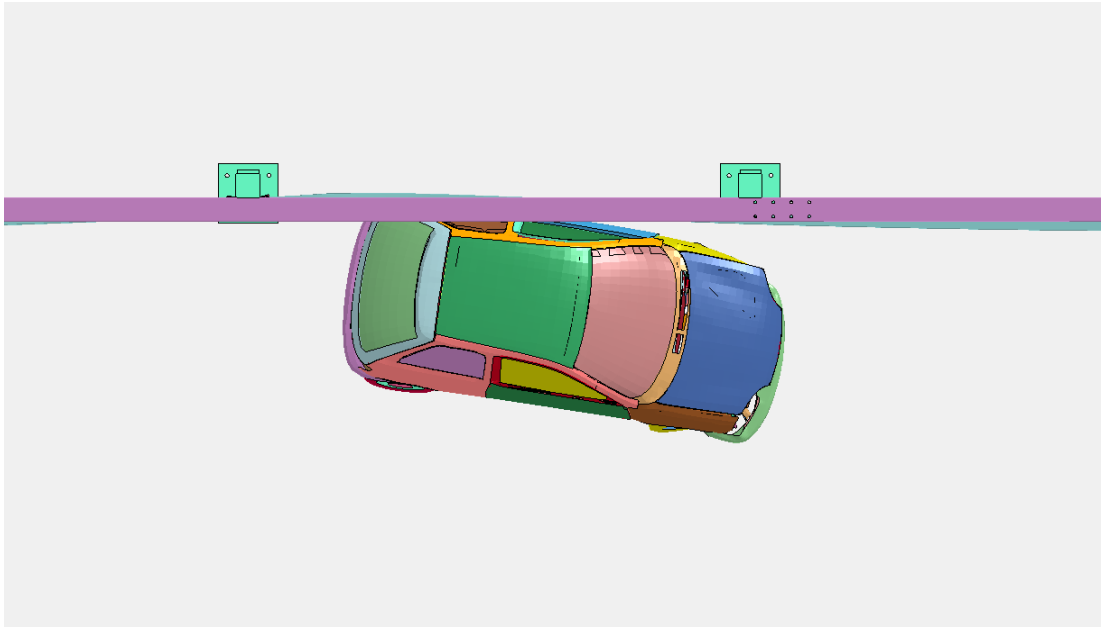
TB11 çarpışma testi simülasyonunda, çarpışma etkilerini azaltarak ASI ve THIV indekslerini sınırlandırması için tasarlanan takoz elemanın ilk çarpışma etkileri ile katlanarak darbe emme görevini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür.

Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi ray elemanların temel görevleri olan çarpışma ikincil etkilerini alarak taşıtı karayolu doğrultusunda yönlendirme görevini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür. Çarpışma etkileri altında sadece alt ray elemanda plastik şekil değiştirmeler oluştuğu gözlemlenmiştir.

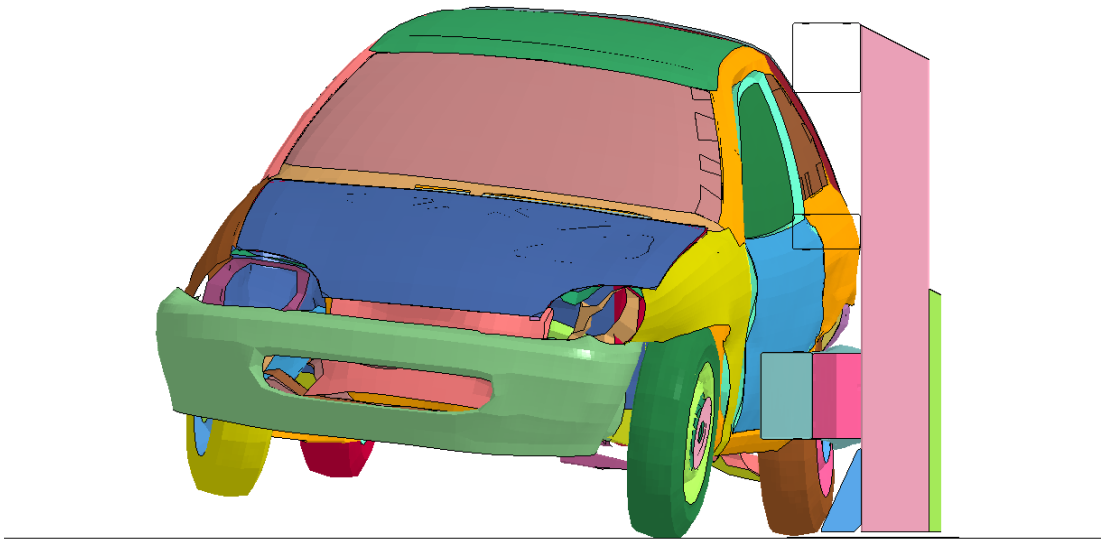
LS-DYNA yazılımı sonlu elemanlar analiz verilerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda ASI indeksi 1,42 olarak elde edilmiştir. Bu değere göre otokorkuluk sistemi çarpışma güvenliği seviyesi "B" sınıfı olarak belirlenmiştir. ASI indeksi hesaplamalarına dair detaylar takip eden bölümlerde paylaşılmıştır.

LS-DYNA yazılımı sonlu elemanlar analiz verilerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda THIV indeksi değeri 32,4 km/saat olarak belirlenmiştir. THIV indeksinin, sınır değeri aşmadığı görülmüştür. THIV indeksi hesaplamalarına dair detaylar takip eden bölümlerde paylaşılmıştır.

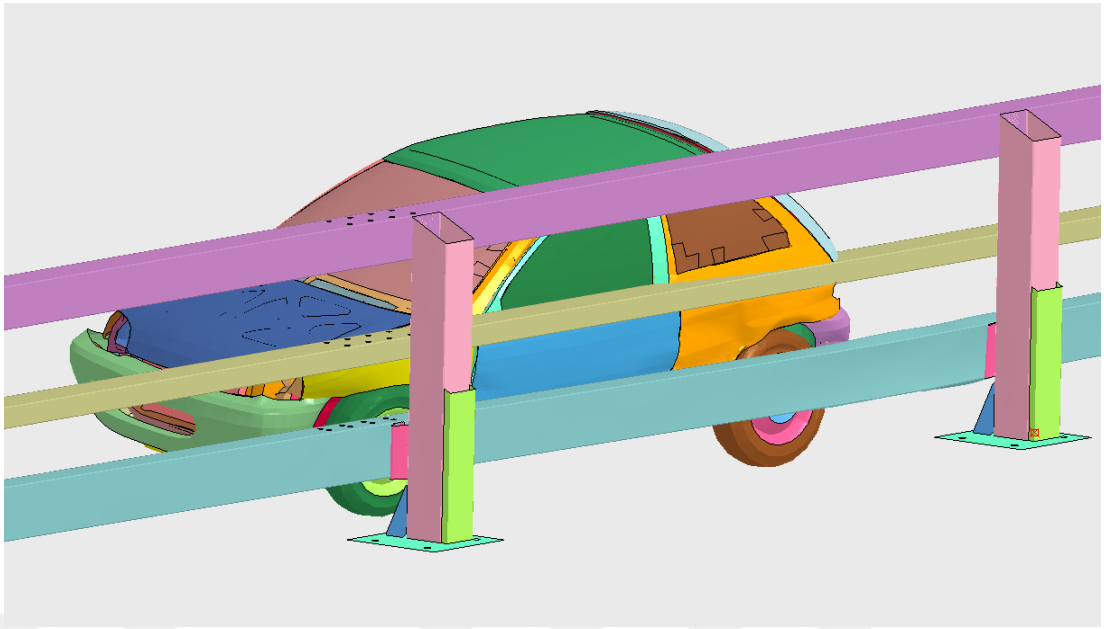
TB11 testi simülasyon sonuçlarında, otokorkuluk sisteminin taşıtı güvenli bir şekilde karayoluna döndürme konusunda başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Otokorkuluk sistemine 20 derece açıyla çarpan taşıtın, yol doğrultusundaki hareketini bir süre otokorkuluk sistemine temas ederek sürdürdüğü ve sonrasında 0,18'nci saniyede otokorkuluk sisteminden ayrılarak güvenli bir şekilde karayoluna döndüğü görülmüştür. Taşıtın otokorkuluk sisteminden ayrılarak karayoluna döndüğü anı farklı açılardan gösterir TB11 test simülasyon görselleri Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.17 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye plan görseli.



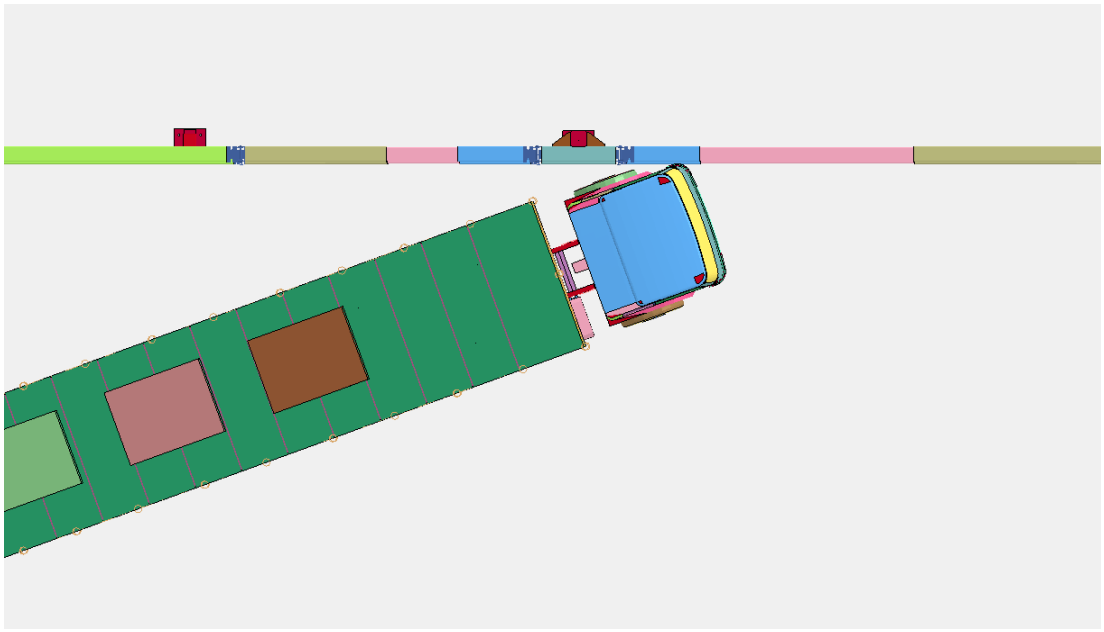
Şekil 3.18 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye ön cephe görseli.



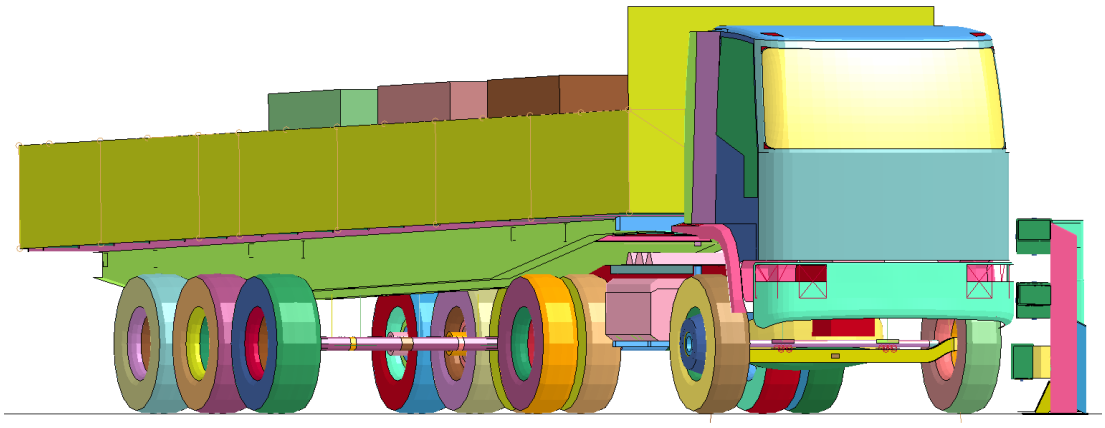
Şekil 3.19 : TB11 test simülasyonu 0,18'nci saniye perspektif görseli.

3.3 Genleşme Derzi Otokorkuluk Tasarımı TB81 Çarpışma Testi Simülasyonu

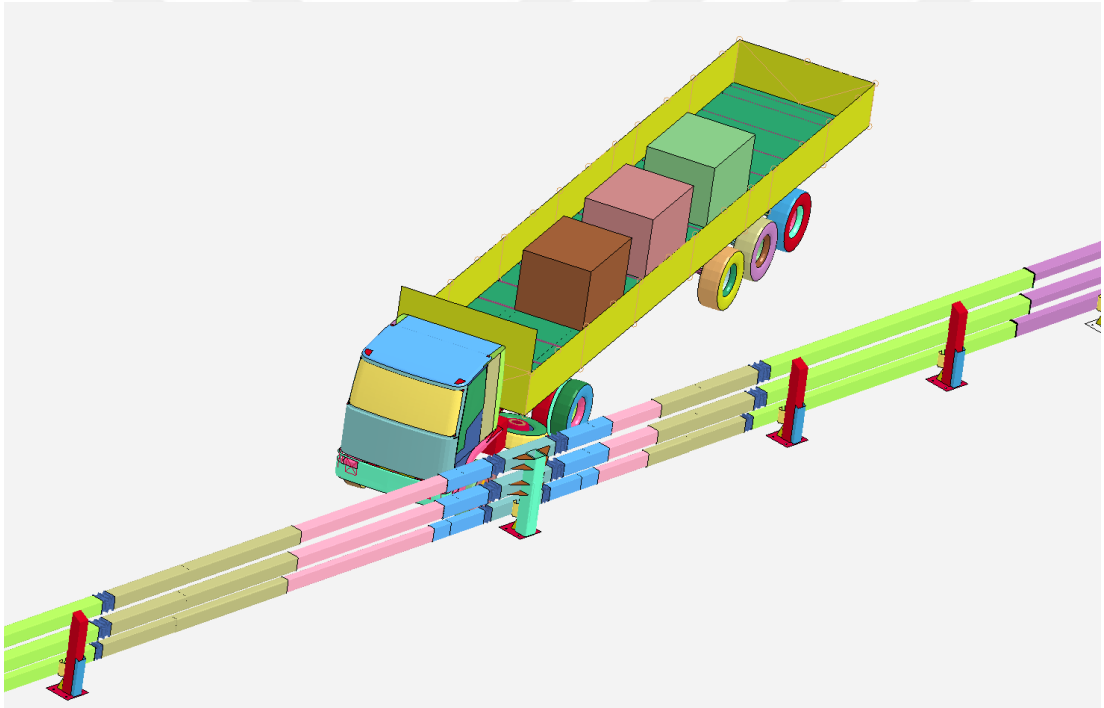
TB81 test simülasyonu, ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımını çarpışma performansı açısından değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi bölgesi tasarımı TB81 çarpışma test düzenini gösterir çarpışma öncesi görselleri Şekil 3.20, Şekil 3.21ve Şekil 3.22'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.20 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi plan görseli.



Şekil 3.21 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi ön cephe cephe görseli.



Şekil 3.22 : TB81 test simülasyonu çarpışma öncesi perspektif görseli.

TB81 çarpışma testi simülasyonunda otokorkuluk sisteminin 0,85'nci saniyede maksimum yanal yer değiştirme yani çalışma genişliği değerine ulaştığı görülmüştür. Tasarımı yapılan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi genleşme derzi çalışma genişliği değeri 0,557 m olarak elde edilmiştir. 0,557 m değerinde göre çalışma genişliği performans seviyesi değeri olan W1 olarak elde edilmiştir. Otokorkuluk sisteminin çalışma genişliğine ulaştığı anı farklı açılardan gösterir TB81 test simülasyon görselleri Şekil 3.23, Şekil 3.14 ve Şekil 3.25'de paylaşılmıştır.

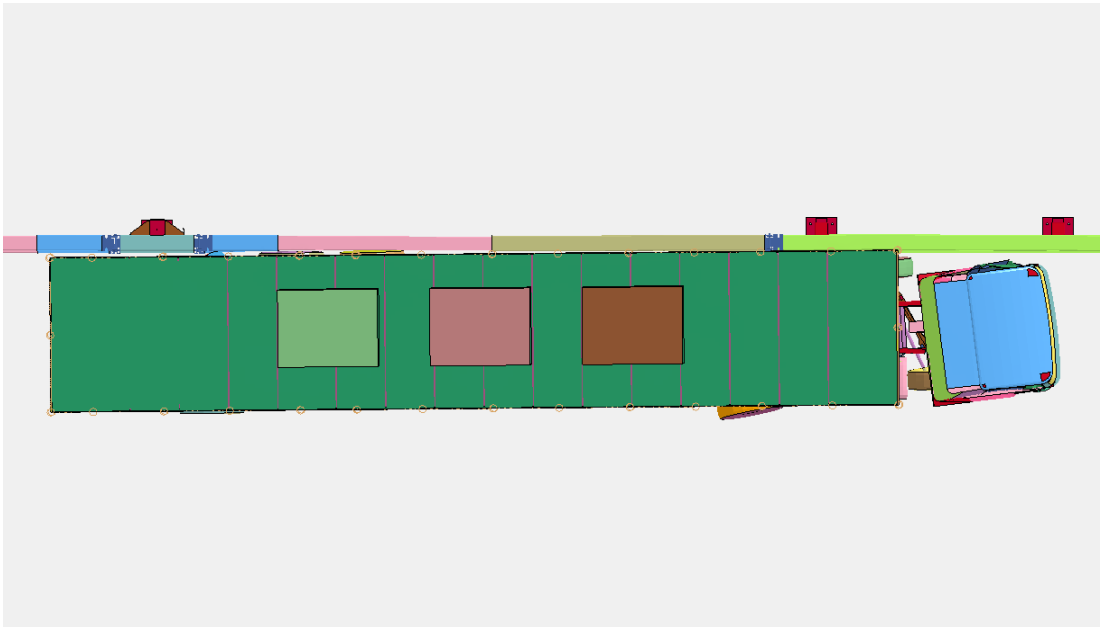
İlk çarpışma etkilerini alan mafsallı ve kayıcı bağlantı sistemleri sayesinde Otokorkuluk sistemi dikme elemanda oluşan şekil değiştirmelerin elastik bölgede kaldığı görülmüştür.

Takoz elemanın, ilk çarpışma etkileri ile katlanarak darbe emme görevini gerçekleştirdiği görülmüştür. İlk çarpışma etkileri altında alt ray elemanın konumunu koruyarak taşıt tekerinin ray elemana takılmasını önlemiştir.

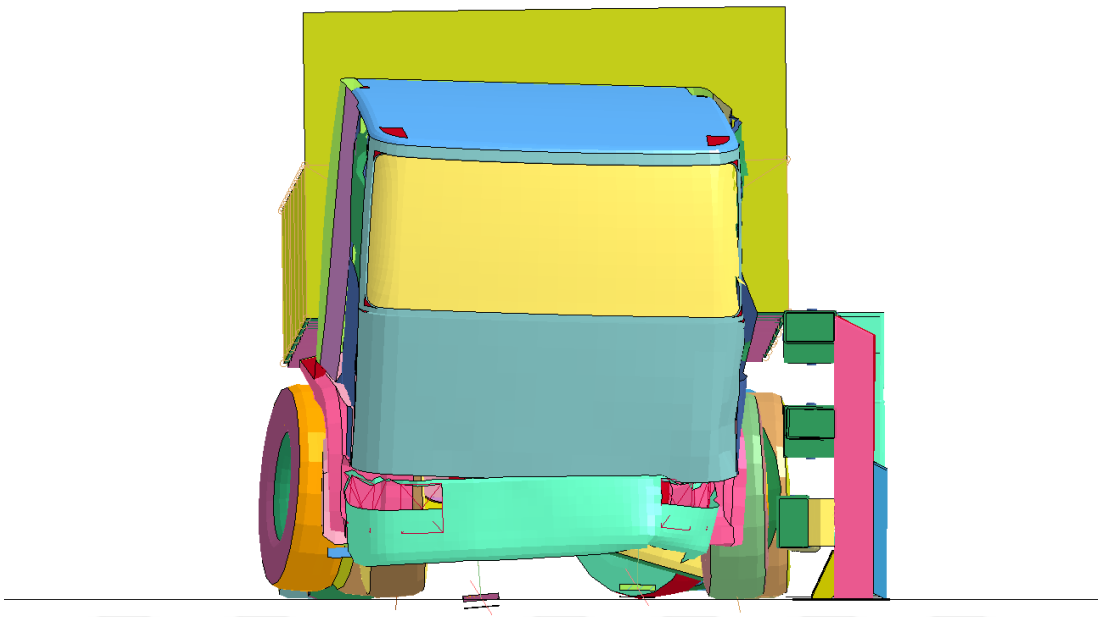
Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi ray elemanların temel görevleri olan çarpışma ikincil etkilerini alarak taşıtı karayolu doğrultusunda yönlendirme görevini başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür. Ray elemanlarda, çarpışma etkileri altında elastik şekil değiştirmeler görülmüştür. Standart tasarımlara oranla 10,5 metre gibi çok daha geniş bir açıklığa sahip olan otokorkuluk sistemi genleşme derzi tasarımının, çarpma etkisiyle ray elemanlara oluşacak eğilme etkilerine ve hedeflenen minimum çalışma genişliği performans seviyesini elde edilmesinde yeterli performansı gösterdikleri görülmüştür.

Mafsallı bağlantı sistemlerinin, raylarda çarpma etkisiyle dikmelerde oluşan eğilme etkilerini sınırlandırdığı görülmüştür.

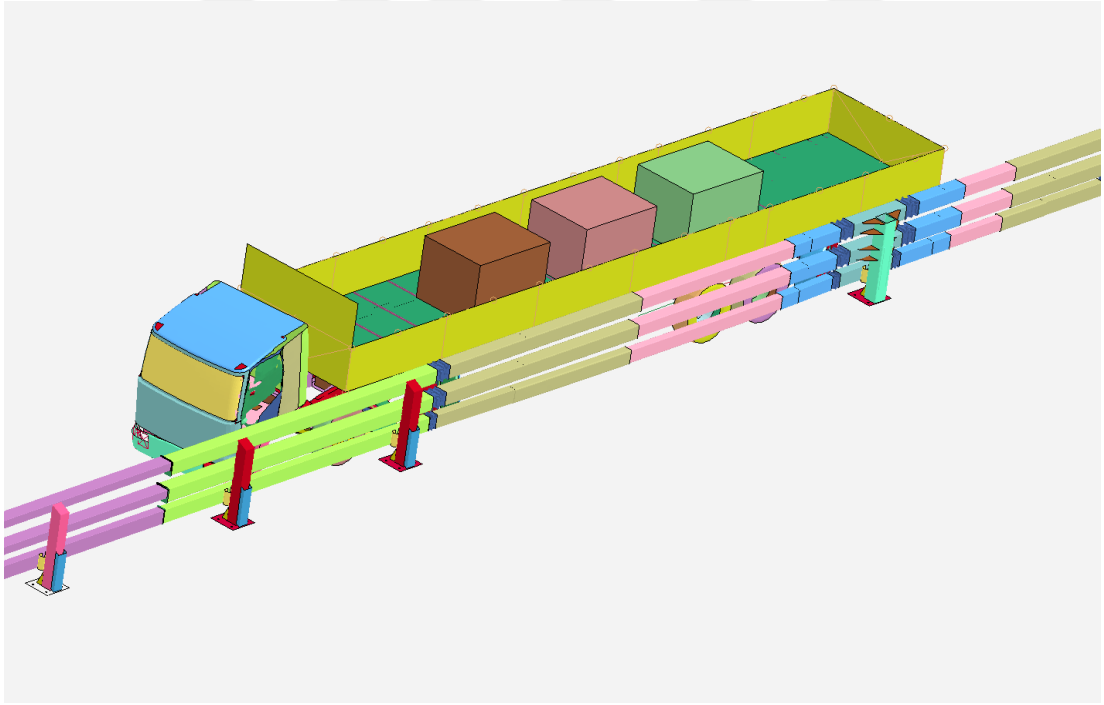
Kayıcı genleşme derzi bağlantı sistemlerinin çarpışma etkileri karşısında başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Kayıcı bağlantı elemanlarında sadece plastik şekil değişmeler olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.23 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, plan görseli.



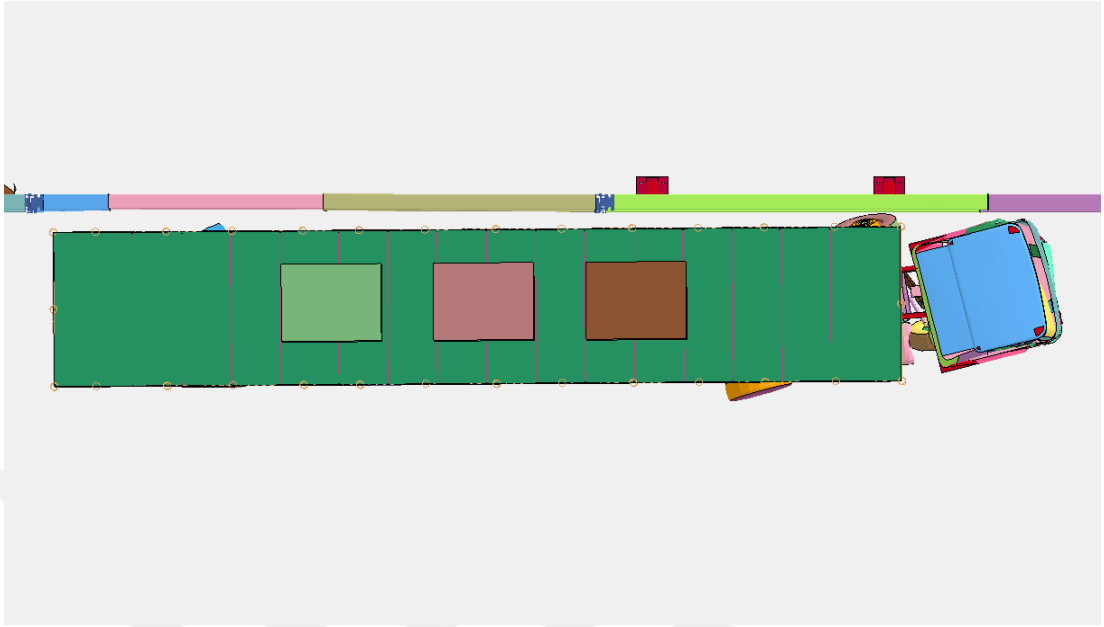
Şekil 3.24 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, ön cephe cephe görseli.



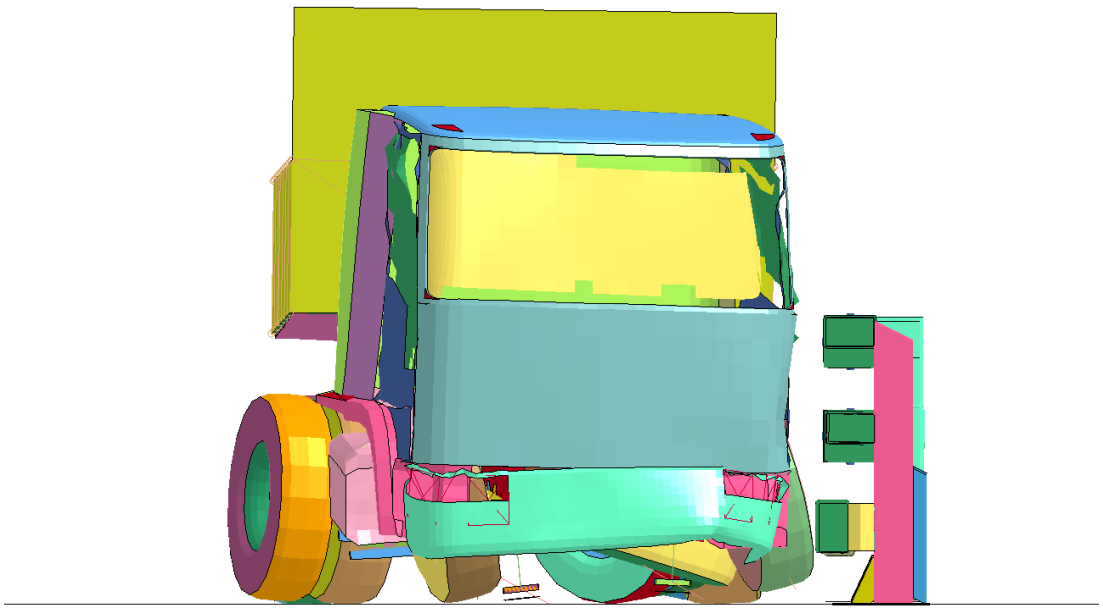
Şekil 3.25 : TB81 test simülasyonu 0,85'ncı saniye, perspektif görseli.

TB81 testi simülasyon sonuçlarında, bir öneri tasarımı olan otokorkuluk sistemi genleşme derzi tasarımının, taşıtı güvenli bir şekilde karayoluna döndürme konusunda başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Otokorkuluk sistemine 20 derece açıyla çarpan taşıtın, yol doğrultusundaki hareketini bir süre otokorkuluk sistemine temas ederek sürdürdüğü ve sonrasında 1,12'nci saniyede otokorkuluk sisteminden ayrılarak güvenli bir şekilde karayoluna yönlendiği görülmüştür. Taşıtın otokorkuluk

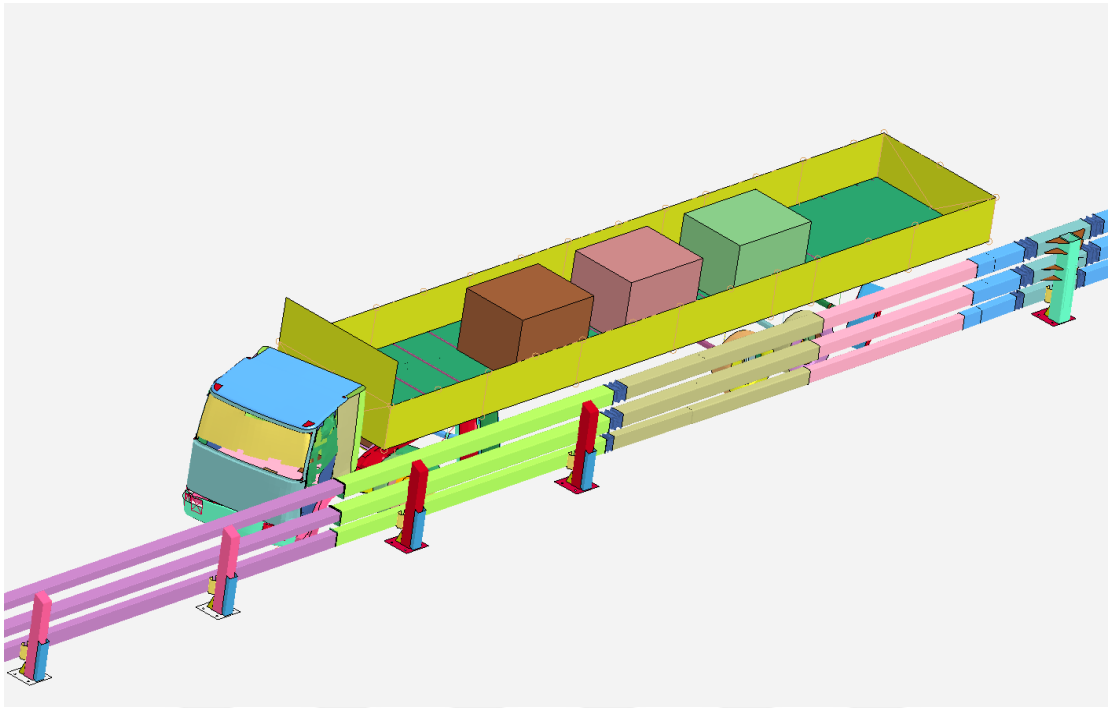
sisteminden ayrılarak karayoluna döndüğü anı farklı açılardan gösterir TB81 test simülasyon görselleri Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.26 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, plan görseli.



Şekil 3.27 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, ön cephe cephe görseli.



Şekil 3.28 : TB81 test simülasyonu 1,12'nci saniye, perspektif görseli.

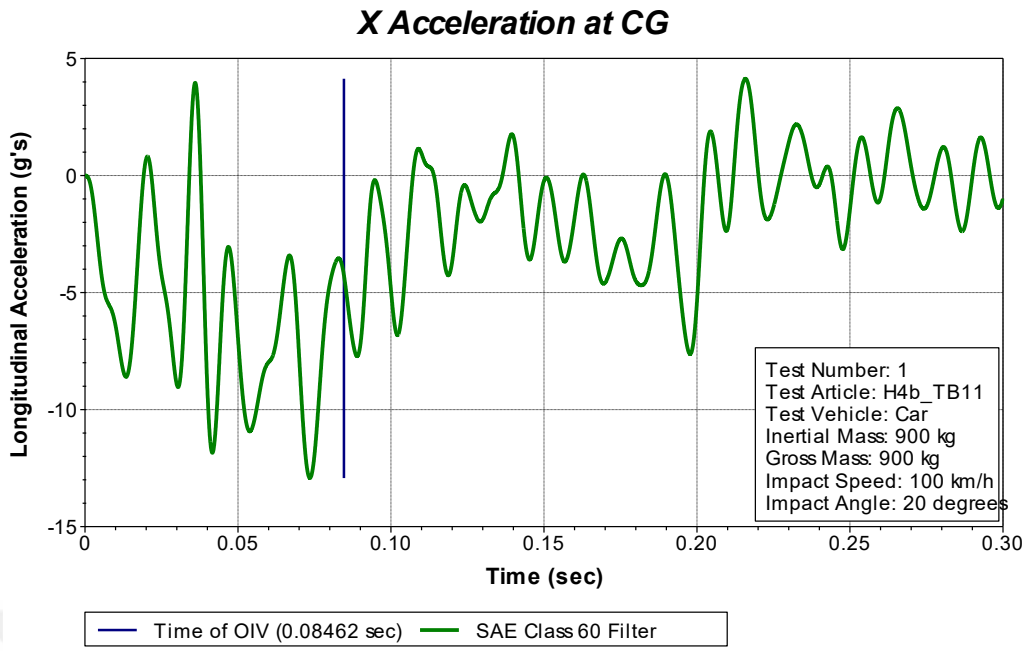
3.4 Otokorkuluk sisteminin ASI ve THIV indeksinin Hesaplanması

ASI ve THIV indekslerinin hesaplamasında, TRAP (Test Risk Assessment Program yazılımı kullanılmıştır. TRAP yazılımı, sonlu elemanlar analiz simülasyonlarından elde edilen ivme değerlerini TS EN 1317-1'de paylaşılan denklemleri kullanarak hesaplayan bir yazılımdır.

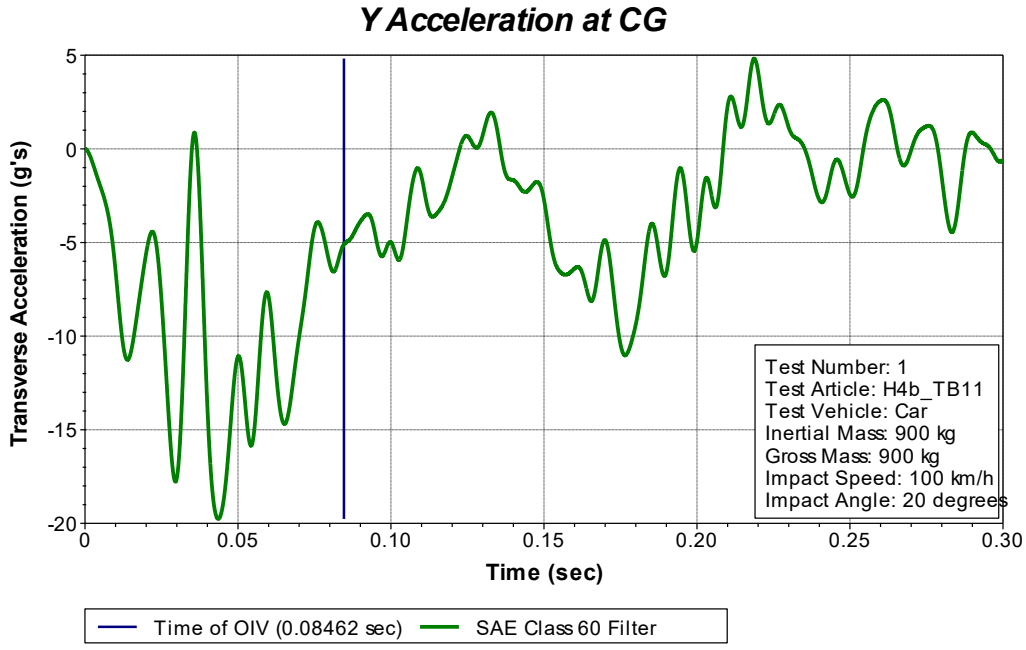
ASI ve THIV inteksi hesaplamalarında, analiz dosyaları oluşturulurken taşıt içinde tanımlanan ivmeölçerden alına veriler kullanılmıştır. ASI ve THIV indeklerinin hesabında, taşıtın üç boyutlu uzaydaki ivme ve açısal hız değerleri kullanılmaktadır. Analiz çıktılarından alınan ivme ve açışal hız verileri yazılıma tanımlanmıştır. ASI ve THIV indeksi hesaplamalarında kullanılan ivme değerlerine ait grafikler Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de paylaşılmıştır.

Yazılım tarafından, ASI İndeksi 1,42 olarak hesaplanmıştır. Yazılım tarafından oluşturulan, ASI indeksinin zamana göre değişimini veren grafik Şekil 3.32'de paylaşılmıştır.

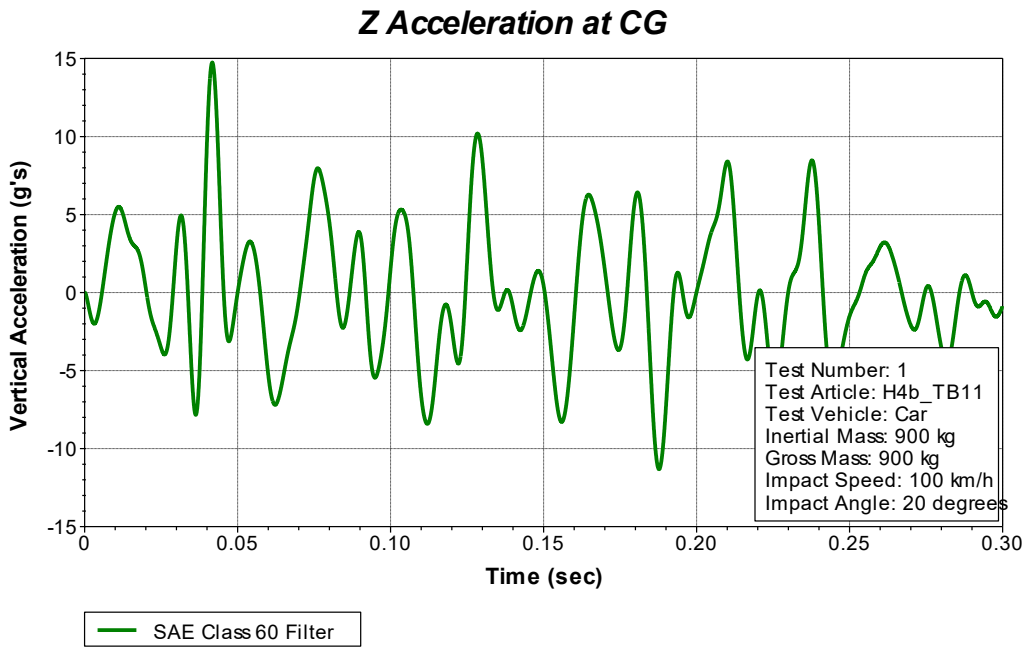
İlgili yazılım kullanılarak THIV indeksi değeri 32,4 km/saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.29 : İvme grafiği (*x* ekseni).

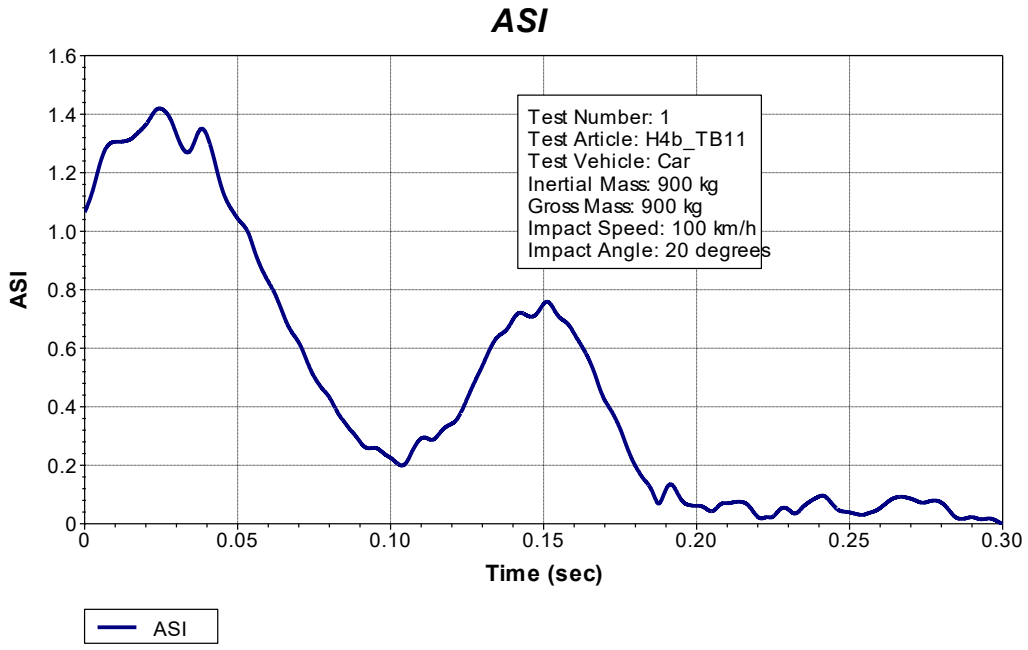


Şekil 3.30 : İvme grafiği (*y* ekseni).



Şekil 3.31 : İvme grafiği (*z* ekseni).

Yazılım tarafından, ASI İndeksi 1,42 olarak hesaplanmıştır. Yazılım tarafından oluşturulan, ASI indeksinin zamana göre değişimini veren grafik Şekil 3.32'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.32 : ASI indeksinin zamana göre değişimi.

THIV ve ASI indeksi hesaplarına dair TRAP yazılımından alınan hesap raporu görseli Şekil 3.33'de paylaşılmıştır.

```
Test Summary Report (Using SAE Class 180 Filter on Acceleration Data and Angular Velocity/Displacement Data)


General Information
   Test Agency:    ITU
   Test Number:    1
   Test Date:      23.04.2020
   Test Article:   H4b_TB11

Test Vehicle
   Description:             Car
   Test Inertial Mass:      900 kg
   Gross Static Mass:       900 kg

Impact Conditions
   Speed:    100.0  km/hr
   Angle:    20.0   degrees

Occupant Risk Factors
   Impact Velocity (m/s)       at 0.0846 seconds on right side of interior
      x-direction     4.8
      y-direction     7.6

   THIV (km/hr):       32.4    at 0.0846  seconds on right side of interior
   THIV (m/s):         9.0

   Ridedown Accelerations (g's)
      x-direction     -5.4      (0.1917 -  0.2017 seconds)
      y-direction     -9.8      (0.1724 -  0.1824 seconds)

   PHD (g's):          10.4      (0.1725 -  0.1825 seconds)

   ASI:                1.42      (0.0245 -  0.0745 seconds)

Max. 50msec Moving Avg. Accelerations (g's)
   x-direction         -7.5      (0.0394 -  0.0894 seconds)
   y-direction         -11.8     (0.0238 -  0.0738 seconds)
   z-direction         1.7       (0.0066 -  0.0566 seconds)

Max Roll, Pitch, and Yaw Angles (degrees)
   Roll             0.0       (0.2117 seconds)
   Pitch            -0.0      (0.1322 seconds)
   Yaw              0.0       (0.2172 seconds)
```

Şekil 3.33 : TRAP yazılımı hesap raporu.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuç

Bu çalışmada, ülkemizde hâlihazırda devam eden ve hayata geçirilmesi planlanan karayolu projelerinde kullanılabilecek, estetik, hafif, ekonomik ve yeni nesil bir ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi geliştirmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda ortaya konulan ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı için ilgili standartlarda gerekliliği belirtilen tam ölçekli çarpışma testleri, karmaşık eksplisit dinamik çözümler yapabilen sonlu elemanlar simülasyon yazılımları ile sanal ortamda gerçekleştirilmiştir. Ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımının çarpışma performansı çarpışma test simülasyonları üzerinden değerlendirilmiştir.

AHT otokorkuluk sistemi, normal açıklıklı bölge ve genleşme bölgesi olmak üzere iki yapısal tasarım halinde oluşturulmuştur. Tez kapsamında, normal açıklıklı bölge tasarımı çarpışma performansı değerlendirmeleri, TS EN 1317'de belirtilen gereklilikler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Normal açıklıklı bölge tasarımı, TB11 ve TB81 çarpışma test simülasyon çalışmaları üzerinden değerlendirmelere tabi tutulmuştur. Genleşme derzi tasarımı sadece bir öneri tasarımı olarak ortaya konulmuştur. Tez kapsamında, genleşme bölgesi tasarımının sadece TB81 testi üzerinden çarpışma performansı değerlendirilmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen ağır hizmet tipi (AHT) otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı çarpışma davranışı, TB11 ve TB81 çarpışma test simülasyonları üzerinden değerlendirilmiştir. Taşıtın çarpışma sonrası hareketini ilgili TS EN 1317-2 standardında belirtilen çarpışma sonrası hareket alanı içerisinde devam ettirdiği görülmüştür. Ayrıca çarpışma test simülasyonlarında, taşıtın AHT otokorkuluk sistemine takılması gibi çarpışma testini başarısız kılacak herhangi bir çarpışma davranışı gözlemlenmemiştir. Taşıtın çarpışma sonrası hareketi üzerinden yapılan değerlendirmede, otokorkuluk sisteminin başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımında TB11 ve TB81 test simülasyonları üzerinden gerçekleştirilen incelemede, taşıtın ve otokorkuluk sisteminin herhangi bir asli parçasında kopma ve bağlı bulunduğu sistemden ayrılma gibi çarpışma testini başarısız kılacak bir davranışlar görülmemiştir. Çarpışma etkilerine karşısında, taşıt ve otokorkuluk sisteminin yapısal bütünlüklerini koruduğu ve çarpışma etkilerine karşı başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür.

TB11 ve TB81 test simülasyonlarında, (AHT) otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımını oluşturan elemanlardan herhangi birinin taşıt yolcu mahalline girmesi ve yolcu mahallinde ciddi yaralanmalara sebebiyet verecek bir deformasyon oluşması gibi çarpışma testini başarısız kılacak herhangi bir çarpışma davranışı görülmemiştir.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı üzerinde gerçekleştirilen test simülasyonlarında, taşıtta herhangi bir yana yatma ve takla atma gibi çarpışma testini başarısız kılacak bir davranış görülmemiştir.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı üzerinde gerçekleştirilen test simülasyonlarında, taşıtın birden fazla tekerini bariyerin üstünden veya altından bariyerin diğer tarafına geçmesi gibi çarpışma testini başarısız kılacak herhangi bir çarpışma davranışı görülmemiştir.

İlgili TS EN 1317-2 standardında kabul kriteri olarak değerlendirilmeyen taşıt girme mesafesi (VI_m) ve dinamik yer değiştirme (D_m) parametreleri, otokorkuluk sistemlerinin uygulama alanlarının değişikliği sebebiyle oluşabilecek potansiyel sorunları öngörmede yardımcı olmaktadır. Çarpışma test simülasyonları üzerinden taşıt girme mesafesi (VI_m) ve dinamik yer değiştirme (D_m) parametreleri değerlendirilmiştir. AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı için taşıt girme mesafesi (VI_m) değerinin göz ardı edilebilecek derecede düşük olduğu görülmüştür. Tez kapsamında tasarımı yapılan AHT otokorkuluk sistemi için dinamik yer değiştirme mesafesinin bir önem arz etmediği kanısına varılmıştır.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge dikme tasarımında kullanılan SHS200x3.5 kutu profil elemanların yeterliliği çarpışma test simülasyonları üzerinden değerlendirilmiştir. AHT otokorkuluk sistemi dikme elemanında, çarpışma etkileri altında plastik şekil değiştirmeler oluştuğu görülmüştür. Bu plastik şekil değiştirmeler çarpışma etkilerinin emilmesi ve 38 tonluk taşıtın karayoluna yönlendirilmesinde etkili

olmuştur. AHT otokorkuluk sistemi dikme elemanların çalışma genişliği performans seviyesinin sınırlandırılmasında yeterli bir performans gösterdiği görülmüştür.

TB81 çarpışma testine AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı, 38 tonluk taşıtın çarpması ile büyük bir eğilme etkisine maruz kalmıştır. AHT otokorkuluk sistemi dikme tasarımında kullanılan arka destek profili UNP180 ve ön berkitme elemanların, eğilme dayanımı artırmak adına başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı alt ray elemanı çarpışma etkilerinin karşılayan ilk elemandır. Çarpışma etkileri altında alt ray elemanda plastik şekil değiştiler oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu plastik şekil değiştirmeler ilk çarpışma etkilerinin emilmesinde etkili olmuştur. Plastik şekil değiştirmeler sayesinde emilen çarpışma etkileri, ASI ve THIV indislerinin sınırlandırılmasına katkı sağlamıştır. TB81 ve TB11 çarpışma test simülasyonları üzerinden yapılan değerlendirmelerde alt ray elemanın başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı orta ve üst ray elemanlarının, 38 tonluk ağır vasıtanın çarpası etkisiyle AHT otokorkuluk sisteminde oluşacak yanal yer değiştirme hareketini sınırlandırma konusunda başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür. Orta ve üst rayda çarpışma etkileri ile sınırlı düzeyde plastik şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir.

TB11 test simülasyonu üzerinde yapılan değerlendirmede, AHT otokorkuluk sistemi takoz elemanın ilk çarpışma etkileri altında katlanarak taşıtı yavaşlatma konusunda bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca takoz elemanın katlanması, alt ray elemanın çarpışma etkilerine karşı daha esnek hareket edebilmesini sağlamıştır. Daha esnek hareket edebilen AHT otokorkuluk sistemi alt bölgesi ASI ve THIV indekslerinin sınırlandırılmasında etkin bir rol oynamıştır. TB81 test simülasyonunda, çarpışma noktasındaki takoz elemanın tamamen ezildiği gözlemlenmiştir. Takoz eleman, ezilmesine rağmen alt ray elemanının konumu muhafaza etmiştir. Böylelikle taşıt kererinin alt ray elemanın üzerine çıkmasını ve taşıt tekerinin raya takılmasını önlemiştir. Ayrıca çarpışma noktasını takip eden her iki yöndeki ilk iki takoz elemanda da çarpışma etkileri ile sınırlı ezilme etkileri gözlemlenmiştir. Bu durum çarpışma etkilerinin otokorkuluk sistemi boyunca düzgün bir şekilde yayıldığını göstermektedir. TB11 ve TB81 test simülasyonları üzerinde yapılan değerlendirmeler sonucunda,

AHT otokorkuluk sistemi tasarımında kullanılan, özel tasarım tazoz elemanın hem TB11 hem de TB81 testinde başarılı bir performans gösterdiği görülmüştür.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı için çalışma genişliği performans seviyesi TB81 test simülasyonu üzerinden belirlenmiştir. Simülasyon verileri üzerinden çalışma genişliği değeri 901 mm olarak elde edilmiştir. AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı için tasarım aşamasında belirlenen minimum hedef değer olan W3 çalışma genişliği performans seviyesi değeri, yapılan çok sayıda analiz simülasyonu sonucunda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları ile elde edilmiştir.

AHT otokorkuluk sistemi normal açıklıklı bölge tasarımı için çarpma şiddeti performans seviyesi TB11 test simülasyonu üzerinden belirlenmiştir. Ham ASI indeksi, TB11 test simülasyonundan elde edilen ivme değerleri üzerinden gerçekleştirilen hesaplarla 1,42 olarak elde edilmiştir. Net ASI indeksi değeri, standardın belirlediği şekilde ham ASI indeksi üzerinde yapılan yuvarlama işlemi sonucunda 1,4 olarak elde edilmiştir. Tasarım aşamasında karar verilen minimum çarpma şiddeti performans seviyesi olan "B" sınıfı çarpma şiddet seviyesi, yapılan çok sayıda analiz simülasyonu sonucunda gerçekleştirilen tasarım optimizasyonu çalışmalarıyla elde edilmiştir. Karmaşık eksplisit dinamik çözümler yapabilen sonlu elemanlar analiz yazılımları yardımı ile gerçekleştirilen tasarım ve optimizasyon çalışmaları neticesine; estetik, hafif ve yeni nesil bir ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi tasarımı ortaya konulmuştur.

AHT otokorkuluk sistemi genleşme derzi tasarımı, ihtiyaç duyulabileceği düşüncesi üzerinden geliştirilen bir öneri tasarımıdır. Genleşme derzi tasarımları, her yapı için özel olarak tasarlanan sistemler olması sebebi ile standardize edilemeyen tasarımlardır. Bu sebeple test kapsamında varsayımsal ölçüler üzerinden bir AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımı oluşturulmuştur. İlgili tasarım sadece çarpışma performansı açısından değerlendirilmiştir. Çarpışma performansını değerlendirmek adına TB81 test simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çarpışma sonrası taşıt hareketinin ilgili standartlarda belirtilen gereklilikleri sağladığı görülmüştür. Taşıtın birden fazla tekerinin otokorkuluk sistemini altından veya üstünden diğer tarafa geçmesi gibi çarpışma testini başarısız kılacak bir çarpışma davranışı görülmemiştir.

AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımı üzerinde gerçekleştirilen TB81 test simülasyonlarında, taşıtın otokorkuluk sistemine takılması gibi testi başarısın kılacak bir çarpışma davranışı görülmemiştir.

TB81 test simülasyonlarında, taşıtın ve AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımının herhangi bir asli parçasında kopma davranışı görülmemiştir. AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımının herhangi bir parçasının taşıt yolcu mahallinde girmediği ve yolcu mahallinde sağlığı tehdit edecek düzeyde bir deformasyon oluşmadığı görülmüştür. Çarpışma test simülasyonunda, taşıt ve AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımının çarpışma etkileri karşısında yapısal bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. TB81 çarpışma test simülasyonu üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda, Çalışma genişliği değeri 557 mm olarak elde edilmiştir. Çalışma genişliği performans seviyesi 557 mm değerine göre W1 olarak belirlenmiştir. Simülasyon verileri üzerinden gerçekleştirilen tüm değerlendirmeler sonucunda, AHT otokorkuluk sistemi genleşme bölgesi tasarımının çarpışma davranışı açısından yeterli bir performans gösterdiği görülmüştür.

4.2 Öneriler

Karmaşık eksplisit dinamik çözümler yapabilen sonlu elemanlar analiz yazılımları ile işlevsel bir otokorkuluk tasarımı ortaya konuşmuş olsa da ülkemizde ve dünyada otokorkuluk sistemlerinin karayolu projelerinde kullanılabilmesi için Avrupa'ya uygunluk (CE) sertifikası alması zorunlu koşulmuştur. Avrupa'ya uygunluk sertifikası, ülkemizde TS EN 1317 standardında belirtilen gerekliliklerin sağlanması koşuluna bağlanmıştır. İlgili standart, otokorkuluk sistemlerinin Avrupa'ya uygunluk sertifikasyonu işlemleri için tam ölçekli çarpışma testlerinden geçmesini zorunlu koşmaktadır. Bu sebeple, tez kapsamında geliştirilen ağır hizmet tipi otokorkuluk sistemi, Avrupa'ya uygunluk çerçevesinde tam ölçekli çarpışma testlerine tabi tutulmalıdır.

Çarpışma testleri, ilgili standartlara uyan akredite çarpışma test laboratuvarlarında yapılmaktadır. Ülkemizde hâlihazırda akredite bir çarpışma test laboratuvarı bulunmamaktadır. Ayrıca her mühendislik tasarımının, tasarımın doğruluğunu değerlendirmek için test süreçlerinden geçmesi gerekmektedir. Ülkemizde çarpışma dinamiği alanında daha fazla çalışma yapılabilmesi ve bu alanda akademik çalışmalarda dünya standartlarını yakalayabilmesi adına, akademi ve üniversiteler

bünyesinde akredite bir çarpışma test laboratuvarı açılması ülke menfaatleri için son derece önemlidir. Ülkemizde çarpışma test laboratuvarı olmaması sebebi ile akademik çalışmalarda yapılması gerekli testler için yurt dışındaki laboratuvarlardan hizmet alınmaktadır. Bu durum da test süreç maliyetlerini artırmaktadır. Yerli bir test laboratuvarının açılması ekonomik açıdan ülkemizi geliştirecek etmenlerden bir tanesi olarak düşünülmelidir.

KAYNAKLAR

Atahan, A. O. & Cansız, O. F. (2004). Design and simulation of two wooden-post W-beam guardrails to eliminate wheel snagging, *Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design.*Vol. 11 (1),Inderscience Enterprises Ltd.

Atahan, A. O. (2009), Effect of permanent jersey-shaped concrete barrier height on heavy vehicle post-impact stability, Int. J. Heavy Vehicle Systems. Vol. 16, Nos. 1/2, Inderscience Enterprises Ltd.

Atahan, A.O. ve Bonin, G. (2006), Numerical analysis of an H4a heavy containment level transition, Int. J. Heavy Vehicle Systems. Vol. 13, No. 4, Inderscience Enterprises Ltd.

Atahan, A.O.ve Cansız O.F. (2005), Impact analysis of a vertical flared back bridge rail-to-guardrail transition structure using simulation, Finite Elements in Analysis and Design. 41 (pp.371–396), Elsevier Science Ltd.

Martin, S.O., & Wekezer, J.W. (1998), Crash impact analysis of the G2 guardrail a validation study,*TRB National Research Council 1998 Annual Meeting.*

Ray, M., Engstrand, .K., Plaxico, C. & McGinnis, R.G. (2001), Improvements to the weak Wbeam guardrail, *80th Annual Meeting of the Transportation Research Board,* **01, (**pp. 2282), Washington, D.C.

Vesenjak, M., Borovinsek, M. & Ren Z. (2000), Improving the roadside safety with computational simulations, *Crash / Automotive Applications II,* (Vol. 2**,** pp. 21-32).

Vesenjak, M., Borovinsek, M. & Ren Z. (2007), Computational simulations of road safety barriers using LS-DYNA, *LS-DYNA Anwenderforum,* (**Vol. 3,** pp 11-18).

Bayat, E. (2011), *Farklı aralıklara sahip dikmelerden oluşan çelik otokorkulukların çarpışma davranışının sanal ortamda incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.

Oktay, M. (2010), *Metrobüs güzergâhında kullanılan halatlı otokorkulukların incelenmesi ve alternatif sistemlerin güvenlik dayanımının belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gümrük R. (2006), *Şekil verme işleminin çarpma performansına etkilerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Cansız, O.F. (2003), *Kuvvetli ahşap dikmelere sahip otokorkuluk sistemlerinde çarpışma deneyi davranışının sanal ortamda iyileştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.

Türk Standartları Enstitüsü. (2011), TS EN 1317-1**,** Yol Güvenlik Sistemleri – Bölüm 1: Terminoloji ve Deney Yöntemleri İçin Genel Kriterler.

Türk Standartları Enstitüsü. (2011), TS EN 1317-2**,** Yol Güvenlik Sistemleri – Bölüm 2: Taşıt Parapetleri Dahil Güvenlik Bariyerleri İçin Performans Sınıfları, Çarpma Deneyi Kabul Kriterleri ve Deney Yöntemleri.

Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (2000), A General Purpose Dynamic Finite Element Analysis Program, LS-DYNA Version 960 User's Manual, Livermore Software.

Capsher Technology. (2000), Test Risk Assessment Program (TRAP) Version 2.1, Programmer's Guide.

Capsher Technology. (2002), Test Risk Assessment Program (TRAP) Version 2.2, User's Manual.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mehmet Onur ÖZTEPE

Doğum Tarihi ve Yeri : 1991, Amasya

E-posta : monuroztepe@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü