

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ TAŞIT KAROSERİSİNİN ÇARPIŞMA
MEKANİĞİ AÇISINDAN BİLGİSAYAR
DESTEKLİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Gökçem ÇAPAR KAYNAK

Ekim, 2020

İZMİR

ARAÇ TAŞIT KAROSERİSİNİN ÇARPIŞMA MEKANİĞİ AÇISINDAN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon-İmalat Programı

Gökçem ÇAPAR KAYNAK

Ekim, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

GÖKÇEM ÇAPAR KAYNAK, tarafından **PROF. DR. NUSRET SEFA KURALAY** yönetiminde hazırlanan “**ARAÇ TAŞIT KAROSERİSİNİN ÇARPIŞMA MEKANİĞİ AÇISINDAN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nusret Sefa KURALAY

Yönetici

Prof. Dr. Ali GÜNGÜR

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Melih BELEVİ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Bu çalışmayı hazırlarken, kıymetli yardımlarını esirgemeyen akademik danışmanım Sayın Prof. Dr. N. Sefa KURALAY 'a, Arř. Gör. Dr. Mustafa Umut KARAOĐLAN 'a ve çalışmaya konu olan aracın geliştiricisi ve üreticisi konumunda olan Volkan İtfaiye Araçları San. Tic. A.ř' ye teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca her zaman yanımda olan ve beni her konuda destekleyen aileme ve eşime teőekkürü bir borç bilirim.

Gökçem ÇAPAR KAYNAK

ARAÇ TAŞIT KAROSERİSİNİN ÇARPIŞMA MEKANİĞİ AÇISINDAN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZ

Araçlarda sürücü ve yolcuların güven içerisinde yolculuk yapabilmeleri için, kabin darbe direncinin belirlenmesi ve çarpışma testi prosedürlerinin yerine getirilmesi gün geçtikçe önem kazanmıştır. Bu nedenle araç üreticileri, araç kabini için yaptıkları analiz ve kabin darbe testleri ile daha tasarım aşamasında olası kaza anındaki yapısal davranışını öngörmekte ve bu verilere göre iyileştirme çalışmalarını yürütmektedir. Bu çalışmada, ECE-R29/3 standartlarına uygun olarak test platformu tasarımı ve 4x4, 6x6 ve 8x8 tahrikli özel amaçlı bir ağır hizmet aracı kabininin, önden dik ve yandan açılı çarpma ile üstten statik yükleme koşulları için sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz verileri ile fiziksel test verileri karşılaştırılmış ve kabinin kritik noktaları için tasarım değişikliğine gidilerek iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür. Tasarlanan darbe test düzeneği ile elde edilen kabin deformasyon sonuçlarına göre kabinin darbe dayanımının ağır taşıt için uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağır hizmet aracı, darbe testi, ECE-R29/3, kabin testi, test düzeneği tasarımı

COMPUTER AIDED ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF VEHICLE BODY IN TERMS OF COLLISION MECHANISM

ABSTRACT

Determine the cabin impact resistance and apply the crash test procedures has become considerably important for the drivers and passengers to travel safely in vehicles. Therefore, vehicle manufacturers predict the structural behavior at the time of a possible accident at the design stage with the analysis and cabin impact tests that they make for the vehicle cabin and carry out improvement studies according to these data. In this study, a test platform design in accordance with ECE-R29/3 standards and a finite element analysis for a special purpose heavy-duty vehicle cabin with 4x4, 6x6 and 8x8 drives according to vertical and lateral impact and static loading from the top was performed. Analysis data and physical test data were compared and design changes were made for the critical points of the cabinet and improvements were carried out. According to the cabin deformation results obtained with the designed impact test mechanism, it was determined that the impact resistance of the cabin is suitable for heavy vehicles.

Keywords: Heavy duty vehicle, impact test, ECE-R29/3, cabin test, test apparatus design

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - ECE-R29/3 REGÜLASYONU	6
2.1 ECE-R29/3 Regülasyon Gerekleri	6
2.1.1 Yaşam Alanını Doğrulamak için Kullanılacak Manken.....	7
2.1.2 Aracın Sabitlenme Koşulları.....	9
2.2 ECE-R29/3 Test Aşamaları	10
2.2.1 Önden Darbe Testi (A Testi)	11
2.2.2 Ön A Sütunu Testi (B Testi).....	12
2.2.3 Yan Darbe Testi (C ₁ Testi).....	12
2.2.4 Tavan Dayanımı Testi (C ₂ Testi)	13
BÖLÜM ÜÇ - ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE TEST DÜZENEGİ TASARIMI	14
3.1 Araç Tanıtımı	14
3.2 Test Düzeneği Tasarımı.....	15

BÖLÜM DÖRT - ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ..... 21

4.1 Araç Kabini Tanıtımı.....	21
4.2 Araç Kabininin Matematiksel Olarak Modellenmesi.....	26
4.3 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi Analizi.....	27
4.3.1 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması.....	28
4.3.2 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi Analiz Sonuçları.....	30
4.4 Kabinin “Yandan Darbe” Testi Analizi.....	31
4.4.1 Kabinin “Yandan Darbe” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması.....	31
4.4.2 Kabinin “Yandan Darbe” Testi Sonuçları	34
4.5 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi Analizi	35
4.5.1 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması.....	35
4.5.2 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi Sonuçları.....	37

BÖLÜM BEŞ - ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNE FİZİKSEL TEST AŞAMALARININ UYGULAMASI..... 39

5.1 Ön A Sütunu Testi (B Testi) Uygulaması	39
5.2 Yandan Darbe Testi (C ₁ Testi) Uygulaması.....	41
5.3 Tavan Dayanımı Testi (C ₂ Testi) Uygulaması.....	42

**BÖLÜM ALTI - ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR
AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNİN DENEYSEL VE FİZİKSEL TEST
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI / OPTİMİZASYONU 44**

6.1 Ön A Sütunu Testi (B Testi)..... 44

6.2 Yandan Darbe Testi (C₁ Testi) 45

6.2 Tavan Dayanımı Testi (C₂ Testi)..... 45

BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR..... 47

KAYNAKLAR.....49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çatı deformasyonun analiz sonuçları ve fiziksel test sonuçlarına göre karşılaştırılması.....	2
Şekil 2.1 Test mankeni boyutları	8
Şekil 2.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test aracını sabitleme konumları ve bağlantı açıları a) ön a sütunu çarpma testi yan görünüş, b) ön a sütunu çarpma testi üst görünüşü.....	10
Şekil 2.3 ECE-R29/3 regülasyonu önden darbe testi prosedürü- A testi	11
Şekil 2.4 ECE-R29/3 regülasyonu ön A sütunu testi prosedürü- B testi	12
Şekil 2.5 ECE-R29/3 regülasyonu yan darbe testi prosedürü- C1 testi	13
Şekil 2.6 ECE-R29/3 regülasyonu tavan dayanımı testi prosedürü- C2 testi	13
Şekil 3.1 Hava aracı kurtarma ve acil müdahale aracı kabininin genel görünümü....	15
Şekil 3.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test platformu tasarımı a) B testi, test platformu boyutları ve katı modeli, b) C1 testi, test platformu boyutları ve katı modeli	16
Şekil 3.3 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test düzeneği tasarımı a) ilk tasarım test aparatı için yapısal analiz sonucu (MPa), b) analiz sonucuna göre iyileştirilmiş test düzeneği tasarımı son hali	17
Şekil 3.4 Test düzeneği sabitleme bağlantı noktaları.....	18
Şekil 3.5 Ön A sütunu testi (B testi) düzeneği ve kanca mekanizması.....	18
Şekil 3.6 Yan darbe testi (C1 testi) düzeneği.....	19
Şekil 3.7 Tavan dayanımı testi (C2 testi) düzeneği.....	20
Şekil 4.1 Sandviç kompozit panel bileşenleri	22
Şekil 4.2 Kabin yapımında kullanılan sandviç kompozit malzeme iç yapısı.....	22
Şekil 4.3 0°/90° (solda) ve +45°/-45° (sağda) açılı biaxial cam elyaf örgüler	24
Şekil 4.4 El yatırma yöntemi.....	25
Şekil 4.5 Vakum infüzyon şematik gösterimi	25
Şekil 4.6 Sandviç kompozit malzeme için gerilme – % uzama grafiği	26
Şekil 4.7 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Yer değiştirme sınır şartı c) Kabinin sabitlenmesi d) Yük için ilk hızın tanımı.....	29

Şekil 4.8 Ön A sütunu testi maksimum gerilme değeri (MPa)	30
Şekil 4.9 Ön A sütunu testi maksimum yer değiştirme değeri (mm).....	31
Şekil 4.10 Yandan darbe testi kabin ve yük konumunun gösterimi.....	32
Şekil 4.11 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Yer değiştirme sınır şartı c) Kabinin sabitlenmesi d) Yük için ilk hızın tanımı.....	33
Şekil 4.12 Yandan darbe testi maksimum gerilme değeri (MPa)	34
Şekil 4.13 Yandan darbe testi maksimum yer değiştirme değeri (mm).....	35
Şekil 4.14 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Kabinin sabitlenmesi c) Yükün etki ettirilmesi	36
Şekil 4.15 Tavan dayanımı analizi maksimum gerilme değeri (MPa).....	37
Şekil 4.16 Tavan dayanımı analizi maksimum yer değiştirme değeri (mm)	38
Şekil 5.1 Sabitlenmiş test aracının ön a sütunu çarpma testi uygulaması.....	40
Şekil 5.2 Ön A sütunu testi (B testi) sonrası	40
Şekil 5.3 Sabitlenmiş test aracının yandan darbe testi uygulaması.....	41
Şekil 5.4 Yandan darbe testi (C1 testi) sonrası	42
Şekil 5.5 Test aracının tavan dayanımı testi uygulaması	43
Şekil 5.6 Tavan darbe testi (C2 testi) sonrası.....	43
Şekil 6.1 Ön A sütunu testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm).....	44
Şekil 6.2 Yandan darbe testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm).....	45
Şekil 6.3 Tavan dayanımı testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm).....	46

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Avrupa topluluğu yönetmeliğine göre araç sınıfının dağılımı.....	7
Tablo 2.2 Test mankeni boyutları ve ölçü tanımları	9
Tablo 3.1 Havaalanı acil müdahale araç özellikleri	14
Tablo 3.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test sınırları ve test platformu tasarım parametreleri.....	17
Tablo 4.1 Kabin yapımında kullanılan sandviç kompozit malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri.....	25
Tablo 4.2 Kompozit kabin malzeme özellikleri	28

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

ECE R29/3 regülasyonu, ağır ve hafif ticari araçlarda sürücü ve yolcuların kaza sırasında korunmasını temin eden kabin dayanımı şartları öne sürmektedir. (ECE-R29/3, 2011). Regülasyonda aracın kaza anında, kabin içerisindeki yolcuların önden darbe ve takla atarak yuvarlanma darbe tipleri için minimum düzeyde etkilenmeleri gerektiği belirtilmektedir. Bu durum ise kabin içerisinde oluşturulacak bir yaşam alanı ile mümkün kılınmaktadır. Kabin, araç sınıflarına göre regülasyonda belirtilen aşamalarda sırasıyla test edilmektedir. Test öncesinde kabin içerisine yerleştirilen mankenlerin, kaza sonrasındaki konumlarında yapılan ölçümlerle ve kaza sonrasında sürücü ve yolcuların kabini tahliye edebilme kolaylıkları göz önüne alınarak kabinin regülasyona uygunluğuna karar verilmektedir.

Literatürde kabin dayanımının incelenmesi yapılan çalışmalarda, incelenecek ticari aracın katı modelinin 3 boyutlu tasarım programı ile modellenmesi, modellenen kabin ve kabin bağlantı yapı elemanlarının regülasyonda belirlenen şartlara göre fiziksel test ve sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen analiz verileriyle karşılaştırılması olarak incelenmektedir. Araç kabininin analizlerinin yapılması ve analiz sonuçlarına göre yapılan iyileştirmeler, daha az prototip üretimi ile üreticinin regülasyona uygunluğunun sağlanmasını kolaylaştırmaktadır.

Raich (2003), Daimler Grup firmasının Mercedes Benz Actros Megaspaces ağır ticari taşıt kabininin ECE-R29/02 standardına uygunluğunu incelemiştir. Bu kapsamda kabin, kabin bağlantı elemanları, direksiyon sistemi, radyatör, motor ve şasi modelini LS-Dyna programı ile regülasyonunda belirtilen çarpma enerjilerine göre önden çarpma ve çatıdan statik basma test etaplarına göre analizine tabi tutulmuştur. Mevcut model üzerinde gerçekleştirilen analizde, önden çarpma testi için panel ve pedal kutusunun sürücünün yaşam alanını olumsuz etkilediği görülürken, çatıdan statik basma testinde yaşam alanı korunmuştur. Önden çarpma testinde, yaşam alanını

etkileyen parçalarda optimizasyon çalışması yürütülmüştür. İyileştirmeler sonucunda, kabin ve kabin bağlantı parçalarındaki deformasyonun fiziksel test verileri, analiz sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Çalışmada, ürünün farklı versiyonları için son ürüne daha az sayıda test ve zamanda ulaşılması amaçlanmıştır.



Şekil 1.1 Çatı deformasyonun analiz sonuçları ve fiziksel test sonuçlarına göre karşılaştırılması (Horst, 2003)

Mirzaamiri ve diğer. (2012), Iran Khodro (IKCO) 2624 Kamyon kabini için yapılan kaza analizinde, ECE-R29/03 test etaplarına sadık kalarak regülasyonda belirtilen darbe durumları için kabin içerisindeki yolcuların yaralanma riskini an aza indirecek şekilde güvenli yaşam alanını kabin tasarımını optimize ederek sağlamıştır. Kabin tasarımı 3D modeli, sonlu elemanlar yöntemiyle çarpışma mekaniği açısından incelenmiş ve regülasyona göre çatıdan statik basma testi için yaşam alanının korunmadığı görülmüştür. Bu nedenle, et kalınlığı 0,5 mm arttırılan tavan için yeniden yapılan analizlerde 45 mm daha yaşam alanının korunması sağlanmıştır.

Yaşar (2011), ağır ticari bir aracın 1/1 ölçekli kabin modelini hazırlamış ve sonlu elemanlar programı ile önden darbe durumu için ECE R29 regülasyonuna göre kabinin darbe sonrası kritik deformasyon bölgelerini incelemiştir. Ayrıca, çarpışma sırasında darbeden etkilenen kritik parçaları da tasarıma ekleyerek, modelin analiz sonuçlarını gerçeğe yaklaştırmıştır. Analiz sonucuna göre, taşıt modeli üzerindeki kritik bölgelerde yapılan iyileştirmelerle, regülasyon isteklerini yerine getiren verilere ulaşılmıştır.

Pasha ve diğer. (2018), hafif ticari bir taşıt için ECE-R29/3 regülasyonunu ANSA ve LS-DYNA sonlu elemanlar programlarını kullanarak analizini gerçekleştirmiştir. Regülasyon gereği N₂ araç sınıfındaki yandan çarpma ve üstten statik basma test adımları için araç kabininde çarpışma analizleri hazırlanmış ve yolcuların çarpışma anında ölümcül yara almamaları için yapılan analiz sonuçlarına göre kabin ana yapısı, darbeden etkilenen bölgelerinden desteklenmiştir. Kabin yapısının farklı davranışları için tasarımlar ve analizler yapılmış ve analiz sonuçları mukayese edilerek regülasyon gereklerini sağlayan iyileştirilmiş kabin tasarımı belirlenmiştir.

Büyük ve diğer. (2018), trafik yoğunluğunun ve taşıtları ana yollara yönlendiren göstergelerin fazla olduğu yollarda, bariyerlere ve yol üzerindeki sert objelere çarparak yaşanabilecek bir kaza durumu için sürücü ve yolcuların yaralanma riskini azaltmak için, hava tüpü topluluklarından oluşan metallerle desteklenmiş, darbeyi sönümleyici hava yastığı sistemi geliştirmişlerdir. LS-Dyna programı ile bariyerlerin ve yol üzerindeki sert objelerin önüne yerleştirilen sönümleyiciler için değişik çarpma pozisyonlarına göre 1/1 ölçekli çarpışma analizleri yapılmıştır. Fiziksel olarak gerçekleştirilen test sonuçları ile çarpışma analizi yapılan veriler aralarında uyum olduğu gözlenmiştir.

Gendar (2007), bir kamyon kabini için ECE-R29 regülasyonuna göre fiziksel ve analiz test verilerini karşılaştırmıştır. Analizde, regülasyon test aşamalarına göre yapılan darbe durumlarına göre kabin ve kabinin kritik bağlantı elemanları elastik ve

plastik şekil değiştirme verileri doğrusal olmayan çarpışma çözümü kullanılarak belirlenmiştir. ECE R29'a göre gerçekleştirilen fiziksel test sonuçları ve analiz verilerinin, çarpışma öncesi ve sonrasında manken yer değiştirmelerinin benzer olduğu görülmüştür. Bu verilere göre, analiz verilerinin doğruluğu ile daha az sayıda fiziksel testlere ihtiyaç duyulacağı ve analiz verilerini ile regülasyona uygunluğun sağlanabileceği gözlemlenmiştir.

Sharma ve diğer. (2015), ECE-R29 regülasyon içeriği ile aynı konuları kapsayan AIS029 (Automotive Industry Standards, Amendment 1, 2004) standardına göre ağır ticari bir kamyon kabininin 1/1 katı modelini, sonlu elemanlar programı olan LS-Dyna çarpışma modülüne tanımlanmıştır. Darbe için kullanılan yükün önden çarpma kaza durumu için, kabine yük aktarımının zamana bağlı grafiği çıkartılmıştır. Kabin darbe bölgelerinden ve kabinin şasiye bağlandığı süspansiyon konumlarından, darbe için kullanılan yükün darbe etkisine göre veriler toplanmıştır. Toplanan verilere göre; darbe için kullanılan yükün kinetik enerjisinin %70' den fazlasının kabinin ön darbe kısmında ve araç şasisinin kalan enerjiyi sönmüldüğü saptanmıştır. Çalışma, farklı kabin tasarımları için ağır ticari araçlarda referans olarak değerlendirilmiştir.

Dwivedi ve diğer. (2011), ECE-R29 ve AIS029 regülasyonlarına göre, ağır ticari bir yolcu kabininin ve kabin bağlantı parçalarında çarpma etkisiyle oluşan deformasyonlar incelemiştir. Kaza anında darbe etkisiyle kabinde ve bağlantılarında oluşabilecek deformasyonları minimize etmek için (kabinin çarpma etkisiyle, kabin bağlantı bileşenlerinin kopması v.b), maliyeti az olan güçlendirici parça kullanımları üzerinde durulmuştur. Çalışma neticesinde, kabinin şasiye yanlış montajının yapılamaması, kabinin darbe bölgelerinden güçlendirilecek şekilde tasarımının iyileştirilmesi, kabin şasi bağlantısının desteklenmesi v.b önlemler ile olası kaza durumunda yolcuların en az zararla kazayı atlatabilecekleri öngörülmüştür.

Honiball ve diğer. (2000), arkasındaki kanopide yolcu taşıyan hafif ticari bir aracın, E/ECE/324 (1986) regülasyonlarına göre analiz ve fiziksel test sonuçlarını

karşılaştırılmıştır. Regülasyona darbe durumlarına göre analizi yapılan kanopi üzerinde kritik darbe noktaları belirlenmiş ve bu noktadan alınan verilerle fiziksel test sonuçlarının benzerlik gösterdiği görülmüştür. Kütle ve geometrisi değiştirilmiş üç kanopi modeli ile hazırlanan araçlara, kaza sırasında takla atarak yuvarlanma durumları göre minimum yanal hız değerleri belirlenmiştir. Yapılan analiz ve kaza testleri neticesinde, ölüm ve yaralanma durumunu en alt seviyede tutan kanopi tipi belirlenmiştir.

Mohamed ve diğer. (2014), cam elyaf ve poliüretan köpük ile oluşturdukları üç farklı tip matris yapısı için, fiziksel test sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemi ile Abaqus programını kullanarak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Üç farklı tip matris yapısı; yüksek yoğunluklu poliüretan levha takviyesi, düşük yoğunluklu trapez örgü takviyesi ve hasır örgü takviyesi ile oluşturulmuştur. Üretilen numunelere mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için üç nokta basma testi, yanal basma testi ve enine basma testleri uygulanmıştır. Analiz sonuçları ve fiziksel test sonuçlarına göre tip 2 (düşük yoğunluklu trapez örgü tipi) matris yanal ve enine basma testlerinde en yüksek dayanımı göstermiştir. Üç tip sandviç panel numunesi için de fiziksel ve analiz sonuçlarının tutarlılığı testleri doğrulamaktadır.

Bu çalışmada diğer literatür çalışmalarından farklı olarak, özel bir amaca hizmet etmek için tasarlanan, karayolları standartlarının dışında boyuta sahip, ağır hizmet aracının kompozit kabinine ECE-R29/3 regülasyonu test aşamalarının fiziksel testle ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak uygulanması ile kabin dayanımının regülasyon test aşamalarına uygunluğu incelenmiştir. Ayrıca, aracın özel boyutları nedeniyle ECE-R29/3 regülasyonu içerisinde sınır şartları verilen test düzeneği tasarımı da araç için özel olarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM İKİ

ECE-R29/3 REGÜLASYONU

ECE-R29/3 regülasyonu, ağır ticari bir araç kabinini önden tam çarpma ve takla atarak yuvarlanma durumunda yolcuların yaralanma riskini en alt seviyeye indirmek için değerlendirmektedir. Bu değerlendirme ile kaza anında, sürücü ve yolculara bir yaşam alanının garanti edilmesi hedeflenmektedir. Regülasyona göre test edilen kabinin başarısı; test sırasında tüm koltuklara yerleştirilen mankenlerin kaza öncesi ve sonrası yer değiştirmelerinin sınır değerleri içerisinde kalmasına, kabin içerisinde esnek olmayan parçaların mankenlerle temas halinde olmamasına ve araç kapılarının kaza anında darbeye açılmaması ve kaza sonrasında kapının sıkışmamasından açılıp sürücü ve yolcuların araçtan kolayca tahliye edilmesine bağlanmıştır.

2.1 ECE-R29/3 Regülasyon Gerekleri

Günümüzde taşıtlar Avrupa Topluluğu Yönetmeliği 'nde (EG-71/320 ve ECE-R13) tekerlek sayısı ve aks taşıma kapasitelerine göre sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.1). Bu sınıflandırmaya göre toplam ağırlığı minimum 3,5 ton ve üzeri olan araçlar, ağır ticari araç sınıfı olan “N” sınıfına girmektedir. ECE-R29/3 regülasyonu, ağır ticari araç kabini için önden çarpma ve takla atarak yuvarlanma kaza durumlarını gerçekleştirecek şekilde araç sınıfı ve motorunun araç üzerinde bulunan konumuna bağlı olarak, test etaplarından oluşmaktadır. Test etaplarının gerçekleşme koşulları bulunmaktadır. Bu koşullar;

- Testlerden önce kabin kapılarının kapalı olması gerekmektedir. Fakat kapılar kilitli olmayacaktır.
- Testler kabin, kabin bağlantı parçaları, önden motorlu araçlar için motor, radyatör v.b ekipmanlarıyla birlikte test edilmelidir. Motor, radyatör gibi parçalar için bu parçaları boyutsal, ağırlık ve montaj yönünden eşlenik parçalarla değiştirilebilmektedir.

- Kabini direksiyon sistemi, direksiyon simidi, kabin içi göğüslük, sürücü ve yolcu koltuklarının tamamını içermelidir. Direksiyon simidi konumu, üretici firma tarafından verilen normal kullanım koşullarında olmalıdır.
- Tüm koltuklarda emniyet kemeri olmalıdır.
- Kabin içerisinde bulunan tüm koltuklarda, regülasyonda ölçüleri verilen mankenler yer almalıdır. (bakınız Bölüm 2.1.1)
- Araç test etapları için regülasyonda belirtilen bağlantı elemanlarıyla zemine sabitlenmelidir.

Tablo 2.1 Avrupa topluluğu yönetmeliğine göre araç sınıfının dağılımı (Kuralay, 2008)

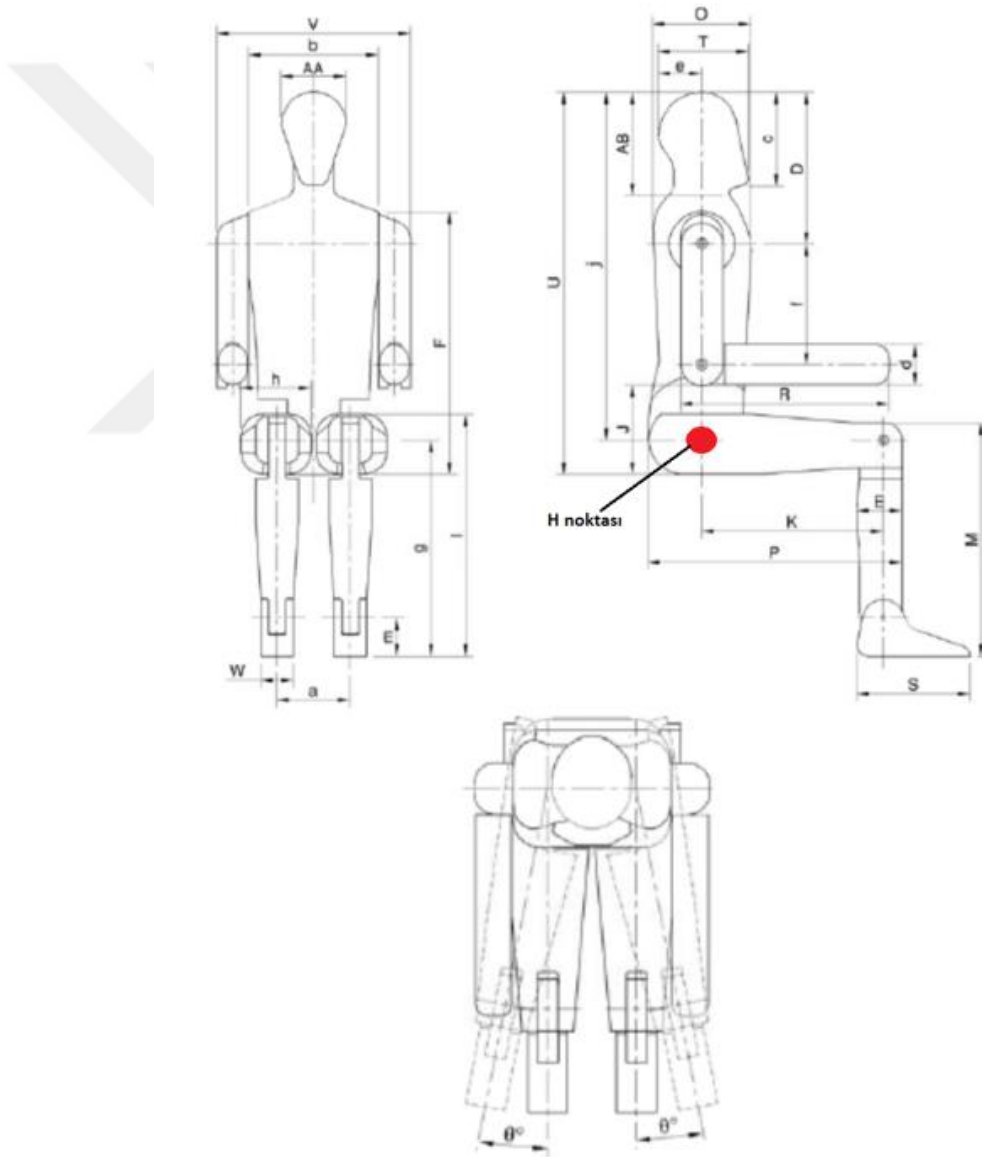
Araç Sınıfı		Tarifi	
L		Tekerlek sayısı<4 olan araçlar	Diğer alt sınıf dağılımlar L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ , L ₅ için EG 71/320 bakınız!
M	M ₁	İnsan taşımak amacıyla yapılmış, tekerlek sayısı> 4 olan araçlar veya 3 tekerlekli ve toplam ağırlığı 1 t üzerine çıkan araçlar (otomobil ve otobüsler)	Sürücü koltuğu dahil 8 oturma koltuğuna ve azami yülü ağırlığı 3500 kg kadar olanlar
	M ₂		Sürücü koltuğu dışında koltuk sayısı>8 ve azami yüklü ağırlığı 5000 kg kadar olanlar
	M ₃		Sürücü koltuğu dışında 8'den fazla koltuğu olan ve müsaade edilen toplam ağırlığı 5 t'dan fazla olanlar
N	N ₁	Yük taşımak için belirlenmiş en az 4 tekerleği veya 3 tekerleği ve toplam ağırlığı 1t'u aşan araçlar (Kamyonlar)	Maksimum 3,5 t müsaade edilen toplam ağırlığa sahip araçlar
	N ₂		3,5 t üzerinde ve maksimum 12 t müsaade edilen toplam ağırlığa sahip araçlar
	N ₃		12 t'un üzerinde müsaade edilen toplam ağırlığa sahip araçlar
O		Römorklar (Dorseler de dahil)	Diğer alt sınıf dağılımlar O ₁ , O ₂ , O ₃ , O ₄ için EG 71/320 bakınız!

2.1.1 Yaşam Alanını Doğrulamak için Kullanılacak Manken

ECE-R29/3 regülasyonu, kaza durumundaki ağır ticari bir araç için sürücü ve yolcuların yaşam alanının sağlanıp, sağlanmaması durumlarına göre testi değerlendirmektedir. Regülasyon test etaplarında, sürücü ve yolcuların kaza öncesi ve

kaza sonrası yer değiştirmeleri bu durumlar için önemlidir. Ayrıca test aparatının, araçla çarpışma noktası da manken üzerinde bulunan “H” noktası üzerinden alınan ölçüye göre belirlenmektedir. Bu nedenle regülasyonda verilen ölçülere göre, kabin içerisindeki koltuk sayısı kadar test mankeni kullanılmaktadır (şekil 2.1).

H noktası, bir yolcu kaçasının teorik grelı konumudur. Vücudun gövde ve st bacak kısımları arasındaki pivot noktasıdır. Test regülasyonları ve araç tasarımlarında bu nokta referans noktası olarak kullanılmaktadır. (H point,2020)



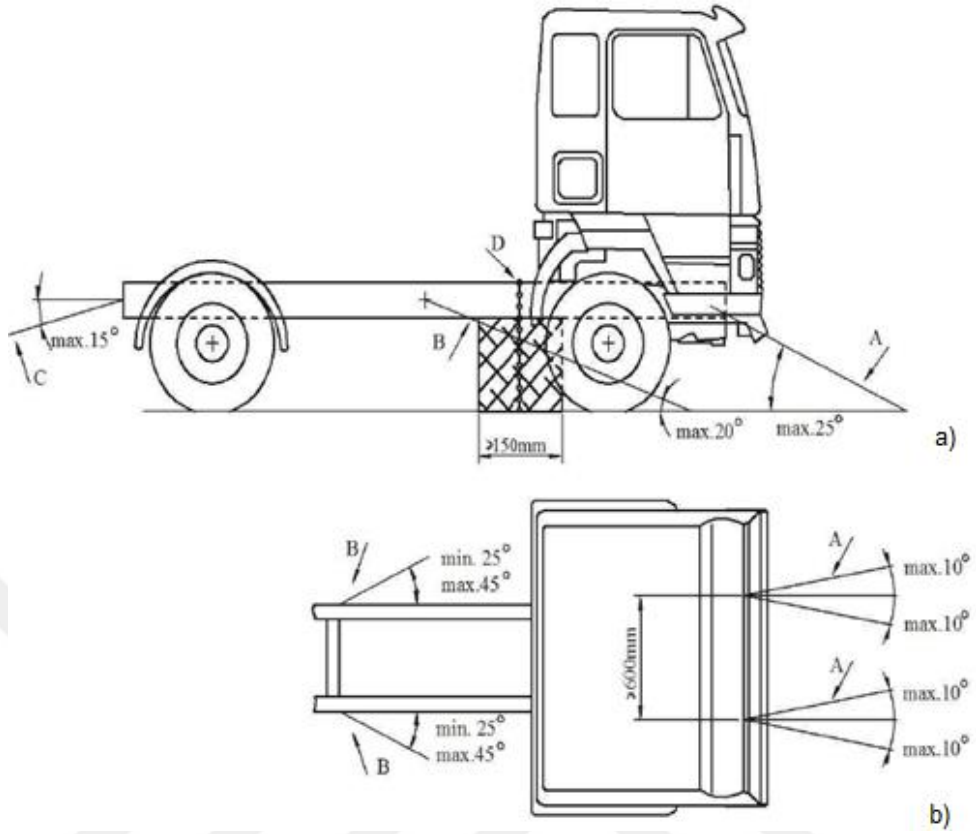
şekil 2.1 Test mankeni boyutları (ECE-R29/3, 2011)

Tablo 2.2 Test mankeni boyutları ve ölçü tanımları (ECE-R29/3, 2011)

Sembol	Tanım	Ölçü (mm)	Sembol	Tanım	Ölçü (mm)
AA	Baş genişliği	153	W	Ayak genişliği	770
AB	Boyunla beraber baş yüksekliği	244	a	Diz merkezleri arasındaki mesafe	172
D	Baş üstünün omuz merkezine uzaklığı	359	b	Göğüs genişliği	305
E	Baldır derinliği	106	c	Baş üstü ile çene arasındaki mesafe	221
F	Oturak ile omuz arasındaki mesafe	620	d	Ön kol kalınlığı	940
J	Dirsek ile oturak mesafesi	210	e	Baş arkası ile omuz merkezi arasındaki mesafe	102
M	Diz yüksekliği	546	f	Omuz merkezi ile dirsek merkezi arasındaki mesafe	283
O	Göğüs derinliği	230	g	Diz merkezinin yerden yüksekliği	505
P	Sırt ile diz arasındaki mesafe	595	h	Kalça genişliği	165
R	Dirsek ile parmak ucu mesafesi	490	ı	Oturur durumdaki bel yüksekliği	565
S	Ayak uzunluğu	266	j	Baş üstü ile H noktası arasındaki mesafe	819
T	Baş en uzunluğu	211	k	Kalça uyluğu ile diz merkezi arasındaki mesafe	426
U	Baş üstü ile oturak arasındaki mesafe	900	m	Bilek merkezi yüksekliği	890
V	Omuz genişliği	453	θ	Bacakların yanal dönme hareketi	20 °

2.1.2 Aracın Sabitlenme Koşulları

Testlerde araca gelen enerjinin tamamının araç kabine ve araç bağlantı elemanlarına aktarılabilmesi için araç kompleksinin zemine sabitlenme bağlantı detayları verilmiştir. Her ankraj zinciri veya ipi çelikten ve en az 10 tonluk bir çekiş yüküne dayanabilecek şekilde şekil 2.2’de verilen açılarda araca ve yere bağlanmalıdır. Bağlantıların gergin olduğu kontrol edilmeli ve çarpışma sırasında kopma yaşanmamalıdır. Ayrıca, şasi çerçevesinin uzunlamasına elemanları, tam genişlikleri 150 mm’den az olmayan bir uzunluk boyunca ahşap bloklar üzerinde desteklenmeli ve park freni yapılmış haliyle konumlandırılmalıdır.



Şekil 2.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test aracını sabitleme konumları ve bağlantı açıları a) ön a sütunu çarpma testi yan görünüş, b) ön a sütunu çarpma testi üst görünüşü (ECE-R29/3, 2011)

2.2 ECE-R29/3 Test Aşamaları

Regülasyonda önden çarpma ve takla atarak yuvarlanma kaza durumlarında kabinin değerlendirilebilmesi adına test aşamaları A, B ve C olacak şekilde üçe ayrılmıştır. A testi önden tam çarpma durumunu; B testi, aracın ön kısmından kabininin A sütununa (araçların orta gövdesinin önünde yükselen, tavanı taşıyan sağ ve sol köşede bulunan ve içinde pasif güvenlik unsuru destekleri olan sütun.) çarpma durumunu ve C testi de kendi içerisinde ikiye ayrılarak; C1 testi, yer düzleminde 20 derece açıda konumlandırılan aracın kabinine yandan tam çarpma, C₂ araç kabinine üstten statik basma durumlarını içermektedir. Regülasyonda ağır ticari araç alt sınıfları (N₁, N₂, N₃) ve toplam araç ağırlıklarına bağlı olarak yapılacak test etapları ayrılmıştır. Araç sınıfı ayırımına göre;

- Toplam ağırlığı 7,5 tonu aşmayan N₁ ve N₂ araç sınıfları için A ve C testleri

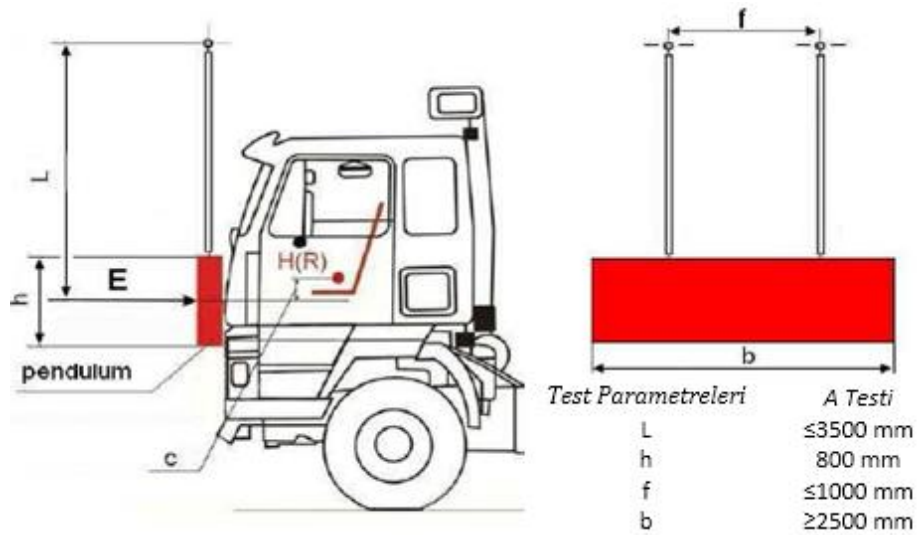
- Toplam ağırlığı 7,5 tonu aşan N₂ ve N₃ araç sınıfları için A, B ve C testleri
- A testinin sadece kabinin ön kısmında motor bulunan araçlarda olması

Gibi uygun testler yapılmaktadır. Üretici firma tüm test etaplarını, kendi içerisinde C test etapları hariç, farklı kabinler üzerinde gerçekleştirilmek zorundadır.

2.2.1 Önden Darbe Testi (A Testi)

A testi, araçların kafa kafaya çarpışma durumunun incelenmesi için gerçekleştirilmektedir. Test rijit yapıdaki 1500 kg'dan fazla olma şartını sağlayan ve boyutları regülasyon tarafından belirlenmiş yükün ağırlık merkezinin, "H" noktasının $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ altına yükün orta eksenini ile aracın orta eksenini paralel olacak şekilde hizalanması ve çarpıtılması şeklinde gerçekleştirilmektedir.

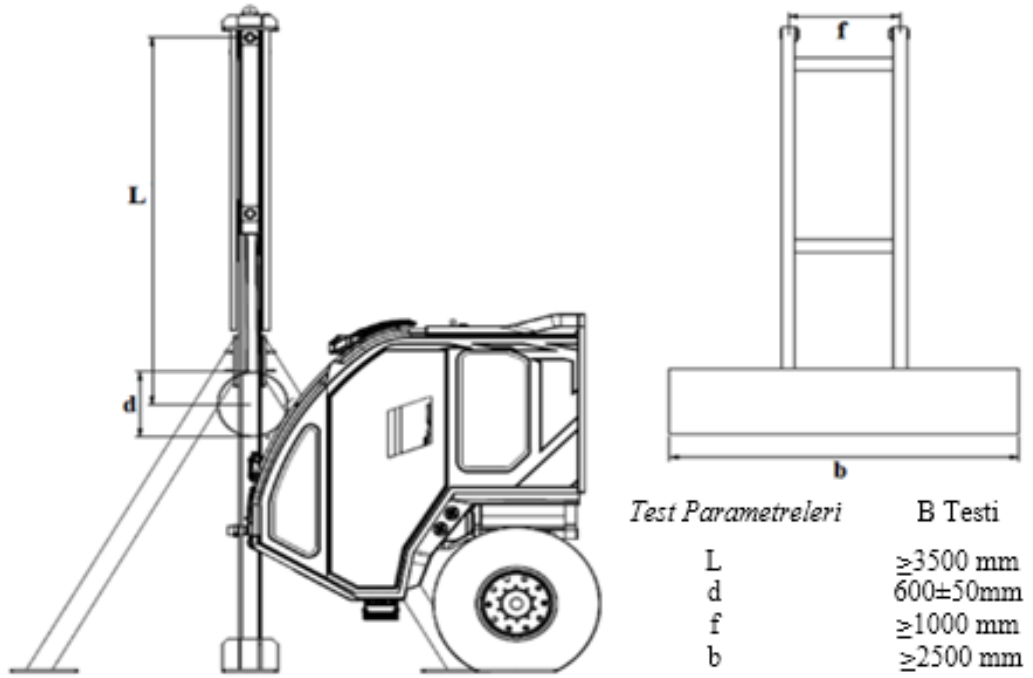
Yükün çarpma enerji değeri araç sınıfına göre belirlenmektedir. Toplam ağırlığı 7,5 tonu aşmayan N₁ ve N₂ araç sınıfları için 29,4 kJ çarpma enerjisi gerekirken, toplam ağırlığı 7,5 tonu aşan N₂ ve N₃ araç sınıfları için 55 kJ çarpma enerjiyle test gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.3 ECE-R29/3 regülasyonu önden darbe testi prosedürü- A testi (ECE-R29/3, 2011)

2.2.2 Ön A Sütunu Testi (B Testi)

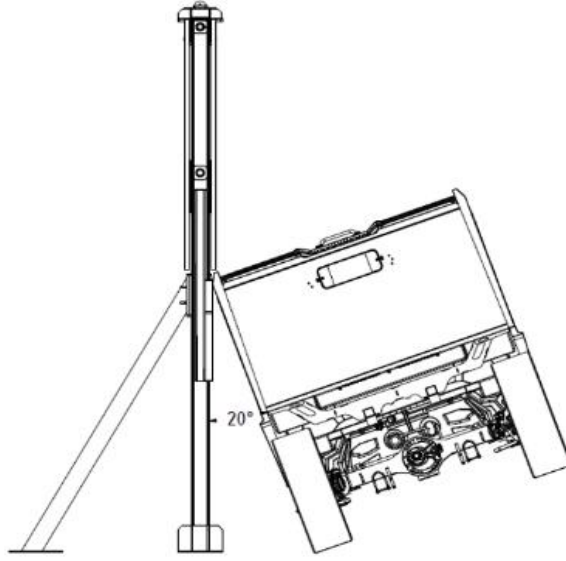
B testi, araç kabininin A sütununa ve kabin ön camının yatayda alt ve üst noktaları ortasına dik etki edecek şekilde 1000 kg'dan fazla sert ve homojen bir kütlenin etki ettirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Yükün çarpma enerji değeri araç sınıfından bağımsız olarak 29,4 kJ olarak verilmiştir.



Şekil 2.4 ECE-R29/3 regülasyonu ön A sütunu testi prosedürü- B testi (ECE-R29/3, 2011)

2.2.3 Yan Darbe Testi (C₁ Testi)

C₁ testi prosedürü, 20 derece açıda (yer düzlemine göre) test platformuna yerleştirilen aracın kabinine tam yandan 1500 kg' dan fazla rijit ve homojen bir kütlenin çarpıtılması ile gerçekleştirilmektedir. Testte aracın takla atarak yuvarlanma durumu incelendiği için, etki ettirilen yük kabin köşesini saracak şekildedir (Şekil 2.5). Yükün çarpma enerjisi minimum 17,6 kJ olarak verilmiştir.



Şekil 2.5 ECE-R29/3 regülasyonu yan darbe testi prosedürü- C₁ testi (ECE-R29/3, 2011)

2.2.4 Tavan Dayanımı Testi (C₂ Testi)

C₂ test prosedürü, aracın bir dingilinin sahip olduğu maksimum yük taşıma sınırını aşacak, maksimum 98 kN olarak regülasyonda belirtilen rijit bir yükün araç kabini üzerine tüm yük serbest kalana kadar yavaşça bırakılması şeklindedir. Yükün tüm tavanı kaplaması beklenmektedir. Sonrasında yükün etkisiyle oluşan deformasyon incelenmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 ECE-R29/3 regülasyonu tavan dayanımı testi prosedürü- C₂ testi (ECE-R29/3, 2011)

BÖLÜM ÜÇ

ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE TEST DÜZENEĞİ TASARIMI

ECE-R29/3 regülasyonu gereği, kabin dayanımının regülasyon şartlarına uygunluğunun incelenebilmesi adına, teze konu olan özel boyutlara ve amaca sahip ağır hizmet aracı için test düzeneği yine ECE-R29/3 regülasyonu içerisinde verilen test düzeneği sınır tasarım koşullarına göre özel olarak tasarlanmıştır.

3.1 Araç Tanıtımı

Darbe testinde kullanılan kabine ait araç, hava aracı kurtarma ve acil müdahale ekiplerinin tabi olduğu sivil havacılık kuralları gereği NFPA-414 (National Fire Protection Association) standardına göre imal edilen ağır ticari hizmet aracıdır. Tahrik tiplerine göre 4x4, 6x6 ve 8x8 olarak imal edilen araçta, sırasıyla 26 ton, 39 ton ve 52 ton toplam taşıma kapasitesine sahiptir. Karayolları trafik yönetmeliği araç sınıflarına göre maksimum yük taşıma kapasitesi 7,5 ton üzeri olan N₃ araç sınıfında (Karayolları Trafik Yönetmeliği, 1997) bulunan ve 135 km/h ile sınırlanmış maksimum hızı ile aracın farklı tahrik tipleri için genel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. (Çapar ve diğer., 2020)

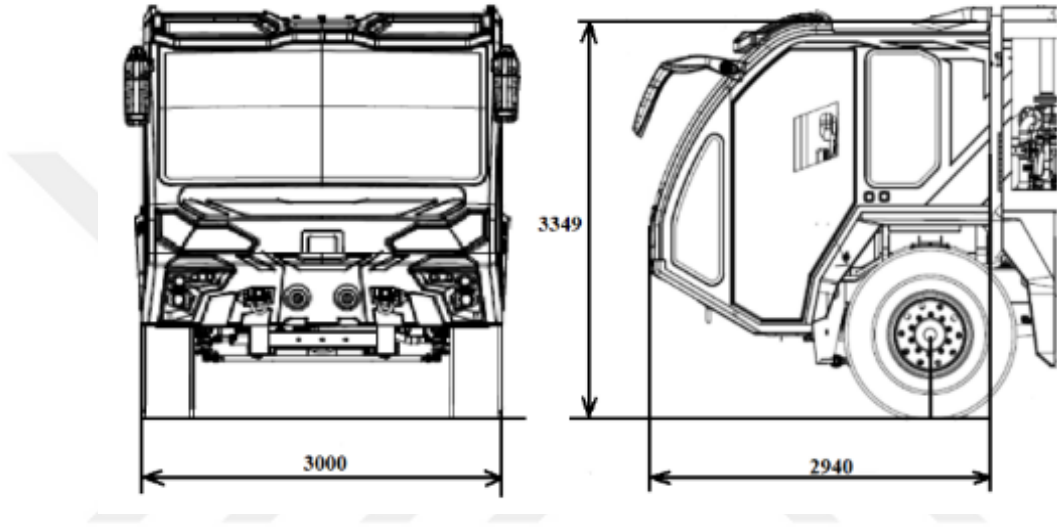
Tablo 3.1 Havaalanı acil müdahale araç özellikleri (Çapar ve diğer., 2020)

Tahrik	Toplam Ağırlık	Araç Uzunluğu	Motor Konumu	Araç Sınıfı
8x8	45 ton	12,4 m	Arkada	N ₃
6x6	39 ton	11,5 m	Arkada	N ₃
4x4	26 ton	9,5 m	Arkada	N ₃

Araç üst yapı bileşenleri; kabin, ekipmanların ve su pompasının bulunduğu ön modül, su tankı, yangın söndürücü köpük tankı, araç motorunun ve tahrik sistemlerini içeren arka modül grubundan oluşmaktadır. Aracın toplam ağırlığına göre su ve sentetik köpük tankı kapasiteleri değişiklik göstermektedir. Su tankı yaklaşık 10-12

ton ve sentetik köpük 1-2 ton olarak imal edilmektedir. Araçta direksiyon konumu sağ, sol ve orta olmak üzere üretilebilmektedir.

Araca ait kabinin genel görünümü ve temel boyutlarıyla birlikte Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yolcu konforu nedeniyle, kabin yoldan gelen titreşimlerin sönümlemesi için araç ana şasisine esnek ve titreşim sönümleyen takozlarla bağlanmaktadır.



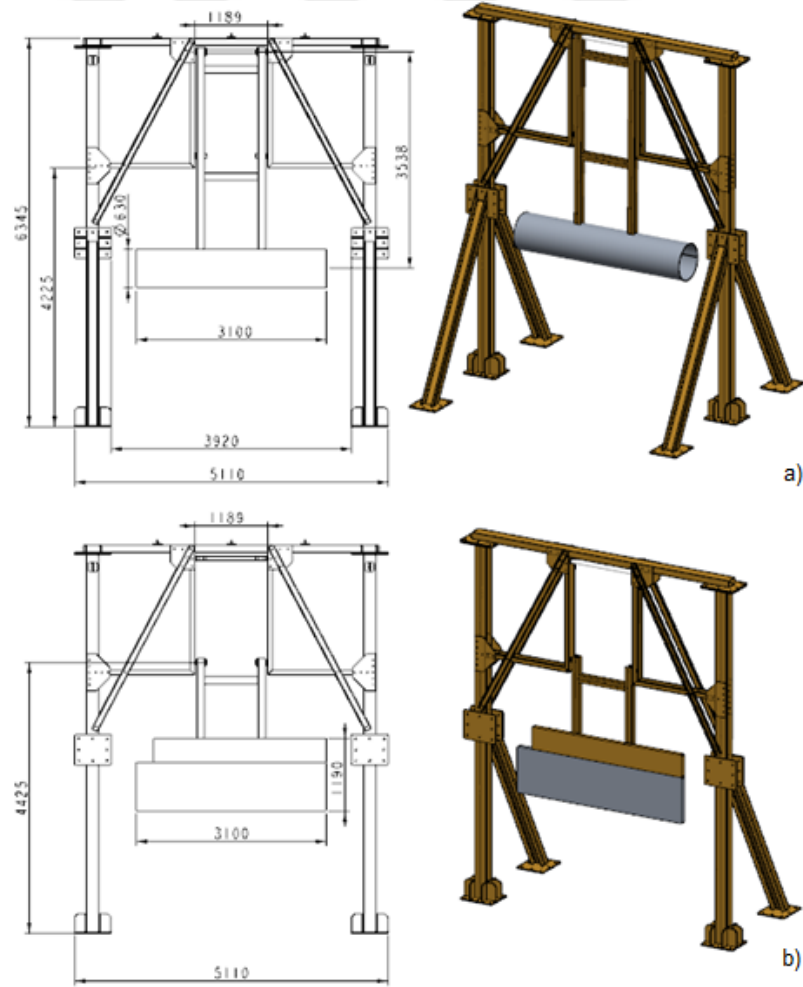
Şekil 3.1 Hava aracı kurtarma ve acil müdahale aracı kabininin genel görünümü (Volkan İtfaiye, 2018)

Kabin içerisinde ve dışarısında kullanılan tüm bağlantı ve yapı elamanları da regülasyon gereklerini karşılayacak şekilde üretimi ve tedarigi yapılmaktadır. Sürücü koltuğu ve solunum tüpü erişimine izin veren yolcu koltukları üç nokta emniyet kemerli olarak kullanılmaktadır.

3.2 Test Düzeneği Tasarımı

Hava aracı acil müdahale ve kurtarma araçlarının tabi olduğu NFPA-414 standardı kapsamında, araç kabininin ECE R29/3 regülasyonuna göre testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Normal bir ağır ticari taşıta göre farklı boyutlara sahip bu araç için test platformu tasarımı araca göre özelleştirilmiştir. Regülasyon, A

(ön darbe testi), B (ön A sütunu testi), C (tavan dayanımı testi) olmak üzere üç ana test bölümünden oluşmaktadır. Ayrıca C testi de kendi içinde ikiye ayrılarak C₁ (yan darbe testi) ve C₂ (tavan dayanımı testi) testlerini içermektedir. Araç sınıfı ve motorun araç üzerindeki konumuna göre, aracın hangi testlerden geçmesi gerektiği regülasyonda belirtmektedir. Üzerinde test gerçekleştirilecek araç, N₃ araç sınıfında yer alması nedeniyle ECE R29/3 regülasyonuna göre A, B ve C testlerine tabidir. Fakat 4x4, 6x6 ve 8x8 modellerin tamamında, araç motorunun arkada yer alması sebebiyle regülasyonda belirtilene göre motoru önde bulunan araçlara uygulanan A testi gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle kabine uygulanacak test aşamaları sırasıyla B, C₁ ve C₂ olacak şekilde, regülasyonda belirtilen tasarım sınırlarına göre (Tablo 3.1), B (Şekil 3.2.a) ve C₁ (Şekil 3.2.b) testleri aynı test düzeneğinde yapılacak şekilde sökülüp takılır test düzeneği tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).

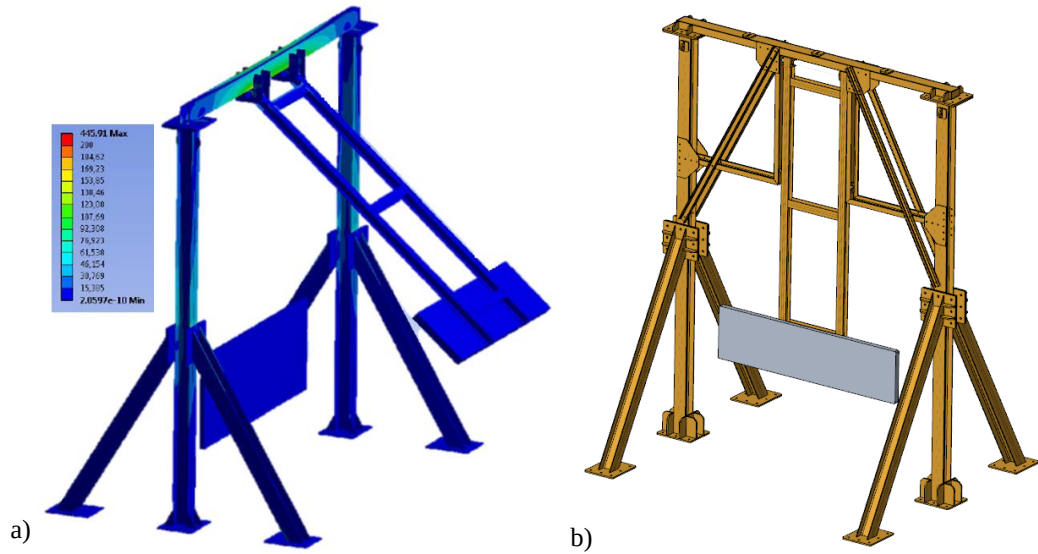


Şekil 3.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test platformu tasarımı a) B testi, test platformu boyutları ve katı modeli, b) C1 testi, test platformu boyutları ve katı modeli (Volkan İtfaiye, 2018)

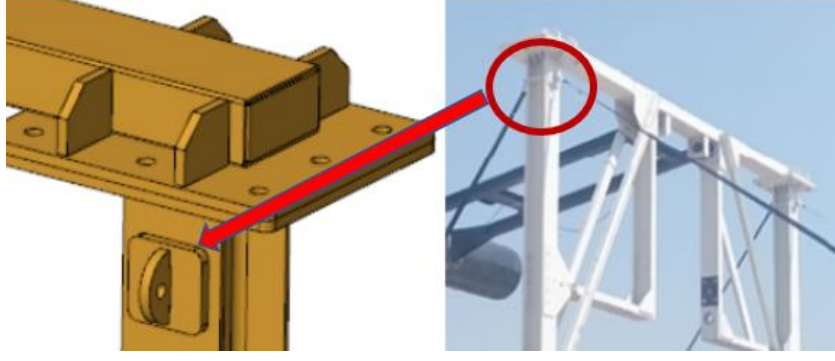
Tablo 3.2 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test sınırları ve test platformu tasarım parametreleri (Çapar ve diğer., 2020)

Test Parametreleri	ECE-R29 Test Sınırları		Tasarım Değerleri	
	B Testi	C ₁ Testi	B Testi	C ₁ Testi
Darbe enerjisi	Min. 29,4 kJ	Min. 17,6 kJ	29,4 kJ	17,9 kJ
L	L _≥ 3500 mm	-	3562,5 mm	-
d	600±50mm	-	630 mm	-
f	1000 mm	1000 mm	1000 mm	1000 mm
b	b _≥ 2500 mm	b _≥ 2500 mm	3100 mm	3100 mm
Kütle	m _≥ 1000kg	m _≥ 1500kg	1040 kg	2300kg

Test düzeneği 200x200 mm ve 120x120 mm S355 J2 “H” çelik profillerden kaynaklı ve cıvatalı birleştirme imalat yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Test düzeneği tasarımı, Ansys Workbench® sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan yapısal analize göre, test aparatının yükün bağlantı bölgelerinde düzeneği zorladığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.3.a). Analiz sonucuna göre yapılan tasarımsal iyileştirmeler ve test düzeneği orta eksenine için B ve C₁ test etaplarına göre ayrı ayrı yüklerin bağlanması şeklinde tasarlanan düzenek nedeniyle, yanlardan ve çapraz şekilde tasarım desteklenmiştir (Şekil 3.3.b). Yüklerin hareket yönü nedeniyle, test aparatı önlerden ve arkalarından bağlantı ayakları konularak yere sabitlenmiştir. B testi için serbest bırakılan yükün, yükü tutan kolun uzun olması nedeniyle oluşturduğu moment etkisi ve titreşimler yine test platformunun en yüksek noktalarından açılı olarak yere bağlanan kayışlarla sönmülmektedir.



Şekil 3.3 ECE-R29/3 regülasyonuna göre test düzeneği tasarımı a) ilk tasarım test aparatı için yapısal analiz sonucu (MPa), b) analiz sonucuna göre iyileştirilmiş test düzeneği tasarımı son hali



Şekil 3.4 Test düzeneği sabitleme bağlantı noktaları (Kişisel arşiv, 2019)

B testi gereği, aracın orta ekseninin test düzeneği orta eksenine paralel olması nedeniyle çarpışma esnasında test düzeneğinin hareketi, ön ve arkalarda kullanılan destek ayaklarının kullanımıyla engellenmiştir. Fakat C_1 testi için araç orta ekseninin, test düzeneği orta eksenine dik olması nedeniyle, test düzeneğinde arka destek ayakları sökülecek şekilde modüler tasarım yapılmıştır. Çarpışma sırasında düzenek salınımının engellenmesini önlemek için yine Şekil 3.4’ de gösterilen bağlantılar kullanılarak desteklenmiştir.



Şekil 3.5 Ön A sütunu testi (B testi) düzeneği ve kanca mekanizması (Kişisel arşiv, 2019)

B testi için, rijit ve homojen yapıyı sağlayacak şekilde, 1040 kg ağırlığında, St 37 plakanın 630 mm bükülerek silindir haline getirilmesi ile oluşturulan yapı tasarlanmıştır. Yük ve test düzeneği bağlantıları arasındaki merkezden merkeze ölçü 3500 mm'den büyük olacak şekilde ve aracın test düzeneğine göre regülasyonda belirtilen konumu göz önüne alınarak konumlandırılmıştır. Yükün bağlantı kolunun serbest düşüşte salınımının önlenmesi ve aracın kabinine paralel çarpabilmesi için kol aralarına destekler atılmıştır (Şekil 3.5).

C₁ testi için, rijit ve homojen yapıyı sağlayacak şekilde, 2300 kg ağırlığında St 37 plakadan, 1190x3100x80 mm boyutlarındaki yapı tasarlanmıştır. Aracın 20 derece açılı duruşu için, kabin köşesini çarpma anında tam kaplayacak şekilde düzeneğe yükün bağlantı noktası konumlandırılmıştır. Kabinin test düzeneğine 20 derece açılı duruşu ise sağ tarafta bulunan tüm tekerleklerin, profillerle örülmüş bir karkas üzerine çıkarılması ile sağlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Yan darbe testi (C₁ testi) düzeneği (Kişisel arşiv, 2019)

C₂ testi için, araç kabin tavanını tamamen kaplayacak ve kabin kenarlarından dışa taşacak şekilde 10 ton ağırlığa sahip betonarme yapı tasarlanmıştır (Şekil 3.7).

Test etapları için, yükün istenilen açıya kaldırılması ve açıdaki yükün serbest bırakılmasını sağlayan hidrolik silindir kullanılarak desteklenmiş kanca mekanizması da tasarlanarak, test düzeneği tasarımı tamamlanmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.7 Tavan dayanımı testi (C2 testi) düzeneği (Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM DÖRT

ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Bu çalışmada “N” sınıfı özel amaçlı bir ağır hizmet aracı kompozit kabinine, ECE R29/3 regülasyonu test etaplarından B (önden A sütunu testi), C₁ (yandan çarpma testi), C₂ (tavan dayanımı testi) testlerinin lineer olmayan çarpışma ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi yapılmıştır.

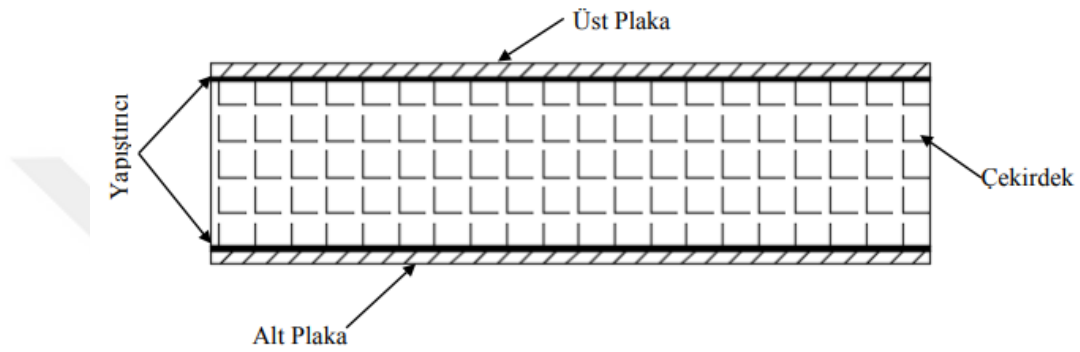
4.1 Araç Kabini Tanıtımı

Hava aracı kurtarma ve acil müdahale araçları, acil müdahale ekibini olay yerine hızlı ve güvenli şekilde taşımak ve olay yerine ulaşıldığında araç üzerinde bulunan donanım ve söndürücülerle olaya müdahaleye başlamak için tasarlanmaktadır. Hız ve müdahale sırasında yaşanabilecek beklenmeyen bir olayın etkileri için en önemli faktörün güvenlik olması nedeniyle, herhangi bir kaza durumunda araç kabinin güvenliği ECE R29/3 regülasyonu göz önüne alınarak tasarım yapılmaktadır.

Özel amaçlı ağır hizmet aracı olarak 4x4, 6x6 ve 8x8 tahrik tipleriyle üretilen aracın tüm modelleri için, sadece kabin içerisinde, direksiyon konumu (sağ, sol, orta) ve koltuk yerleşimleri farklılık gösterecek şekilde kompozit malzemeden üretilmiş tüm araç tipleri için aynı kabin kullanılmaktadır. Kabin; hafifliği, yüksek enerji sönümleme etkisi, eğilme dayanımlarının yüksek olması, farklı kalınlılarda ve ses-ısı yalıtımlı ürün elde edilebiliyor olması ve üretim yönteminin yaygın olması nedeniyle sandviç kompozit malzemeden imal edilmiştir.

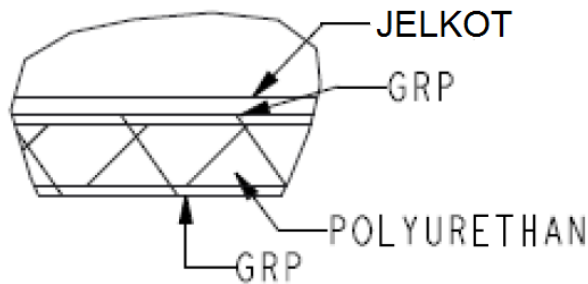
Sandviç kompozit malzemeler; alt-üst plaka, çekirdek ve tüm katmanları birleştirecek bir yapışkandan oluşmaktadır. Burada yapıştırıcı eleman, tüm katmanları

tutması ve kenetleyici bir yapı oluşturmaları nedeniyle oldukça önemlidir. Alt – üst plakalar malzemenin kullanım şartlarına göre cam, aramid, karbon vb. elyaf çeşitleri ve yine kullanım amacına göre seçilmiş polyester, epoksi, vinylesterler gibi yapıştırıcılar kullanılarak üretilmektedir. Çekirdek malzemesi olarak da PVC köpükler, bal peteği vb. kullanılmaktadır. Sandviç kompozit panellerin üretimi için; el yatırma yöntemi, elyaf sarma yöntemi, vakum infüzyon yöntemi, püskürtme yöntemi, sıcak pres kalıplama ve otoklav pişirme gibi birçok üretim yöntemi bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Sandviç kompozit panel bileşenleri

Özel hizmet aracı kabini; alt-üst plakalarında yanmaz, çekmeye ve gerilmeye dayanıklı, emici olmayan bir iplik olan cam elyafı ve polyester reçine tercih edilirken, çekirdek malzemesi olarak poliüretan köpüğün infüzyon ve el yatırması yöntemiyle kalıba alınması ile imal edilmektedir (Şekil 4.2). Elde edilen sandviç kompozit malzeme kalınlığı 50 mm olmaktadır. Araç kabini üretim kolaylığı ve imalat yöntemi nedeniyle parçalı olarak imal edilmekte ve sonrasında yapıştırma ile birleştirilmektedir. Kabinde yüzey kalitesinin yüksek olması istenilen bölgelerde yüksek performans polyester reçinelerinden üretilen jelkot malzeme kullanılmaktadır.



Şekil 4.2 Kabin yapımında kullanılan sandviç kompozit malzeme iç yapısı

Kompozit yapının içinde yer alan elyaf takviyeler temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarıyla birlikte yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde sürekli elyaflar kompozit yapılardaki en önemli takviye malzemeleridir. Bu elyaflar, üretim teknolojileri ve kullanım alanları nedeniyle modern kompozit sanayisinde önemli yere sahiptirler. Bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan son yıllarda geliştirilmiş olan elyaf tipleridir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Elyaflar aşağıdaki özellikler de dikkate alınarak yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar;

- Üstün mikro yapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri,
- Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması,
- Çok yüksek elastite modülüne sahip olması.

Elyaflarda dokuma örgü, tiplerine göre 0° ve 90° açılı örgüler iplerin birbirleri üzerinden geçirilerek, başka bir bileşen olmadan birbirlerine tutmasıyla oluşturulmaktadır. Teknolojiyle birlikte artan malzeme isteğine göre tek ve çift katlı çok yönlü örgü tipleri de geliştirilmiştir. Örgü tipinin geliştirilmesi, elyafların farklı açılarda da mekanik özelliklerinin iyileşmesinin sağlamıştır. Üretilen parçanın kullanım koşullarına göre; mekanik dayanım, yüzey direnci, korozyon değerlerine v.b uygun bir elyaf bulunabilmektedir. Tek yönlü, çift yönlü, üç veya dört yönlü olabilmektedirler. Teze konu olan özel hizmet aracında çift yönlü örgü tipi kullanılmıştır (Cam Elyaf San.yay., 2003).

Çift yönlü örgüler, farklı açılarda ($0^\circ/90^\circ$ veya $+45^\circ/-45^\circ$) uzanan ipliklerin 2 katman olacak şekilde birbiri üzerine dikilmesi sonucu oluşan örgülerdir (Şekil 4.3). Standart açılı örgü kullanımları dışında, farklı açılarda istenilen mukavemet

değerlerinin sağlamak için başka örgü çeşitleri de kullanılmaktadır. (örneğin $+30^{\circ}/-30^{\circ}$).

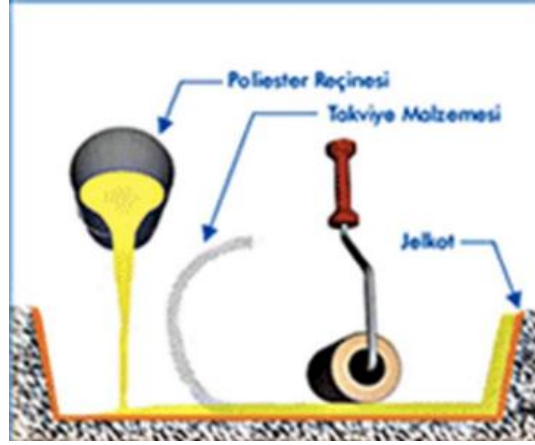


Şekil 4.3 $0^{\circ}/90^{\circ}$ (solda) ve $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ (sağda) açılı biaxial cam elyaf örgüler (Cam Elyaf San., 2003)

Alt-üst plakaların çekirdeğe yapışmasını sağlayan ve matrisi oluşturan polyester reçinelerin; kimyasal tepkimelere ve ortam koşullarına direnci oldukça yüksektir.

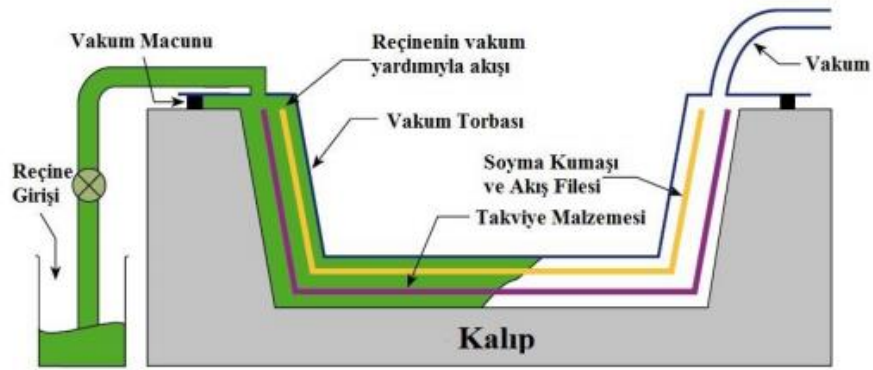
Çekirdek malzemesi olarak kullanılan poliüretan, karbamat bağlantılarının birleştirilmesiyle elde edilen organik bileşen zincirinden oluşan bir polimerdir. Isıl direncinin yüksek olması, neme karşı dayanaklılığı ve ses yalıtımı sağlaması nedeniyle otomotiv sektöründe fazlaca kullanılmaktadır.

El yatırma yöntemi, bir kalıp içerisine kumaşların yerleştirilmesi ve elle fırça veya rulo kullanarak reçinenin kumaşa emdirilmesi şeklinde uygulanır. Daha sonra kalıba serilen reçine emdirilmiş kumaşlar genellikle oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında kurumaya bırakılır. Reçineler kumaşlara kat kat yedirilir. Bu nedenle kumaşın özelliklerine göre çoklu katmanlara da aynı anda reçine sürülebilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 El yatırma yöntemi (Cam Elyaf San., 2003)

Vakumlanmış ortamda reçinenin kalıp içerisinde yürütülmesi ve ürünün kalıptan nihai ürün olarak çıkarılması şeklinde üretilmektedir. Reçine, tüm kanallara ve boşluklara vakum yardımıyla yürütülür. Kullanılan üretim yöntemi parça boyutlarından bağımsızdır. (Şekil 4.5).



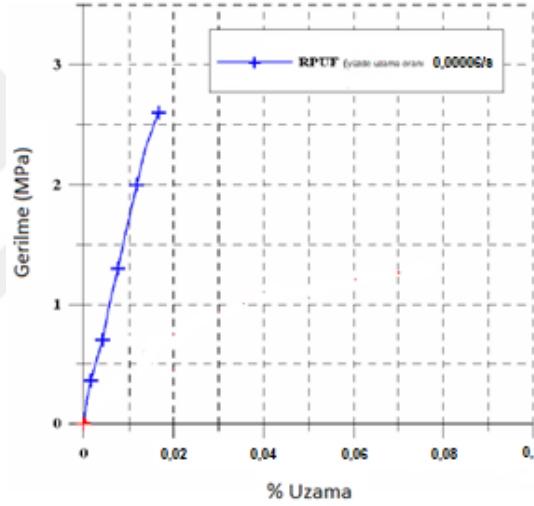
Şekil 4.5 Vakum infüzyon şematik gösterimi (Çağar ve diğer., 2016)

Tablo 4.1 Kabin yapımında kullanılan sandviç kompozit malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri

Özellik	polyester	cam elyaf	poliüretan
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,1 – 1,4	1,8	0,06
Çekme Mod. (GPa)	1,2 - 4	-	-
Kayma Mod. (GPa)	1 - 2	-	-
Çekme Muk. (MPa)	45 - 95	3450-4830	0,49
Basma Muk. (MPa)	140 - 90	-	0,423
Poisson Oranı	0,35 -0,36	0,316	0,3
Kopma uzaması (%)	2 - 6	1,5-2,2	-

Kompozit sandviç kabinde kullanılan bileşenlerin mekanik özellikleri ayrı ayrı Tablo 4.1 de belirtilmiştir. Ayrıca kabinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin gerçekleştirilmesi için, kompozit sandviç malzeme mekanik özellikleri ise daha önce yapılan bir çalışma referans alınarak sisteme eklenmiştir.

Dae-Suk ve diğer. (2010) cam elyaf takviyenin, poliüretan köpüğün mekanik davranışına etkisini incelemişlerdir. 50 mm kalınlığa sahip, çekirdek malzemesi poliüretan köpük ve alt-üst plakaları cam elyaf ile takviyelenmiş kompozit sandviç malzeme üzerinde çekme ve basma testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda cam elyaf takviyeli sandviç kompozit malzeme için gerilme – % uzama grafiği çıkarılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Sandviç kompozit malzeme için gerilme – % uzama grafiği (Dae-Suk ve diğer., 2010)

4.2 Araç Kabininin Matematiksel Olarak Modellenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi, karışık problemleri, anlaması ve yorumlaması daha kolay basit problemler haline getirir. Parçalara ayrılmış bu problemler ayrı ayrı incelenerek bir sonuca varılır ve sonrasında ana problemin çözümü için parçalar birleştirilir. Ana problem için elde edilen veriler genellikle yaklaşık çözümdür veya bu veriler bir kat sayı ile çarpılarak düzeltilirler (Güldemet, 2006).

Kompozit olarak imal edilmiş olan araç kabini, ECE R29/3 regülasyonu test aşamaları için, Ansys Workbench LS-Dyna programı kullanılarak lineer olmayan dinamik sistem olarak modellenmiştir. Sisteme etkiyen gerilme değerleri, malzemenin akma sınırını aştığı için sistem plastik olarak deforme olmaktadır. Plastik deformasyonlar çoğunlukla kalıcı deformasyonlardır ve malzeme lineer olmayan bir davranış gösterir. Bu nedenle lineer olmayan çözüm yöntemi uygulanmıştır.

Sistem zamana bağlı olduğu için sonlu elemanlar çözümünde açık yöntem kullanılmaktadır. Açık yöntemde merkezi fark zaman entegrasyonu (Central Difference Time Integration, CDTI), düğüm noktalarında alan değişkenlerini hesaplamaktadır. Doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem için sadece bir sayısal çözüm mümkün olduğundan, bu yöntem doğrusal olmayan problemler için özellikle uygundur. Açık yöntemlerde küresel rijitlik matrisinin yerine, kütle matrisinin tersinin hesaplanması gerekir. CDTI’da, hareket denklemi bir önceki zaman adımında hesaplanır (burada t_n şu anki zaman adımıysa, t_{n-1} bir önceki zaman adımıdır). İteratif çözümün aksine düğüm noktasındaki ivmeler, direkt yöntem kullanılarak hesaplanmaktadır (Korkut, 2017).

4.3 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi Analizi

Bu çalışmada ECE R29/3 regülasyonunda belirtilen test aşamalarına uygun olarak, araca çarpacak yük ve ağır hizmet aracına ait kompozit kabin “ön A sütunu” testi için modellenmiştir. Sonlu elemanlar programında öncelikle malzeme tanımları, sonrasında yine regülasyonda belirtilen şekilde test aşaması için sınır şartları belirlenmiş, veriler sisteme eklenmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile ECE R29/3 “ön A sütunu” testi sonrası kabinin regülasyona uygunluğu kontrol edilmiş ve darbe sonrasında kabindeki kritik bölgeler belirlenmiştir.

4.3.1 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan kabin 3 boyutlu tasarlanan gerçek ölçekli katı model üzerinden, kabini oluşturan tüm dış bölgelerin, yüzey olarak PTC Creo programı ile modellenip birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Sonrasında, analiz sonucunu etkilemeyecek tüm detaylar ve bileşenler modelden temizlenmiştir.

Kabin analizi, Ansys Workbench LS-DYNA® sonlu elemanlar programı kullanılarak sırasıyla; kabin geometrisinin programa tanıtılması, kabin ve yük için malzeme tanımlarının yapılması, modelin eleman ve düğüm noktalarının ayrılması, sınır şartlarının sisteme işlenmesi ve analiz sonuçlarının alınması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

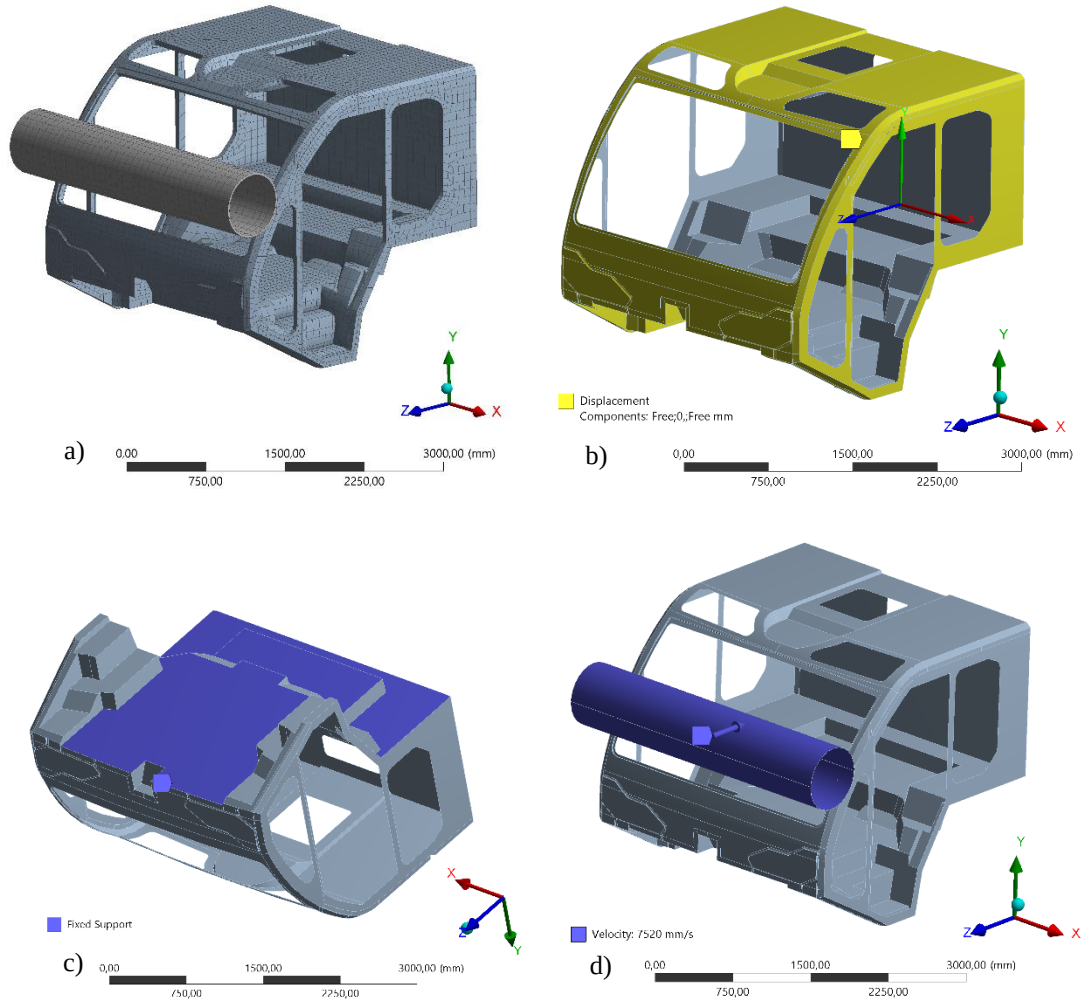
Yük geometrisi regülasyonda ön A sütunu testi için belirtilen konuma (Bölüm 2.2.2) yerleştirilmiş ve kabin ile birlikte sisteme tanıtılarak aralarındaki tüm bağlantı yüzeyleri silinmiştir. Sonrasında regülasyonda verilen değerlere uygun olarak tasarlanan yükün malzeme özellikleri St37 ve 1040 kg olacak şekilde Ø 630 mm, et kalınlığı 20 mm olacak şekilde sisteme entegre edilmiştir. Kabin malzeme özellikleri Bölüm 4.1’de verilen lineer olamayan kompozit malzeme olarak et kalınlığı 50 mm olarak şekilde sisteme işlenmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Kompozit kabin malzeme özellikleri

Özellik	Değer
Density (kg/m ³)	1330
Elastise Modülü (MPa)	433
Poisson Oranı	0,316
Bulk Modülü (Pa)	3,9248E+09
Kayma Modülü (MPa)	1646,3

Yükün etki edeceği kritik bölgelerde eleman ve düğüm sayısı artırılarak daha gerçeğe yakın verilerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Analizi basitleştirme için, kritik olmayan bölgelerde daha büyük eleman ve düğüm noktaları tercih edilmiştir. Yapılan bölme işlemine göre eleman kalitesi %80 şartı sağlayacak şekilde model; 8108 eleman ve 8532 düğüm noktasında oluşmaktadır.

Sınır şartlarında; araç kabinin, yükün etkisiyle y ekseninde hareketini engellemek için y eksenindeki yer değiştirme sıfır olarak tanımlanmış ve kabin şasi bağlantı noktalarından sabitlenmiştir. Yükün ilk hızı, regülasyonda verilen 29,4 kJ enerjiyi sağlayacak şekilde -z yönünde 7520 mm/s olarak tanımlanmıştır.

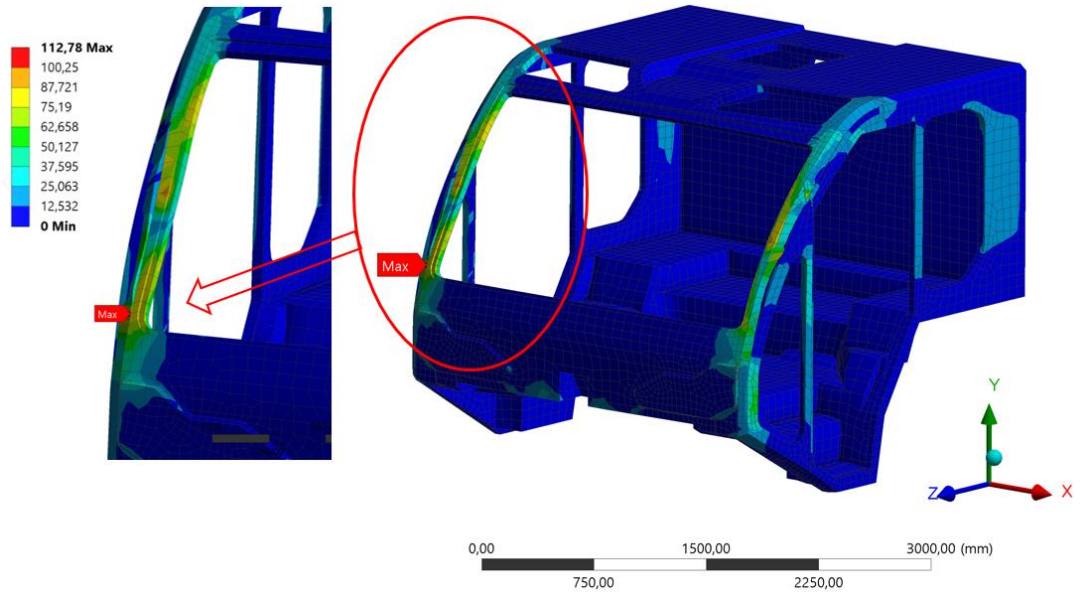


Şekil 4.7 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Yer değiştirme sınır şartı c) Kabinin sabitlenmesi d) Yük için ilk hızın tanımı

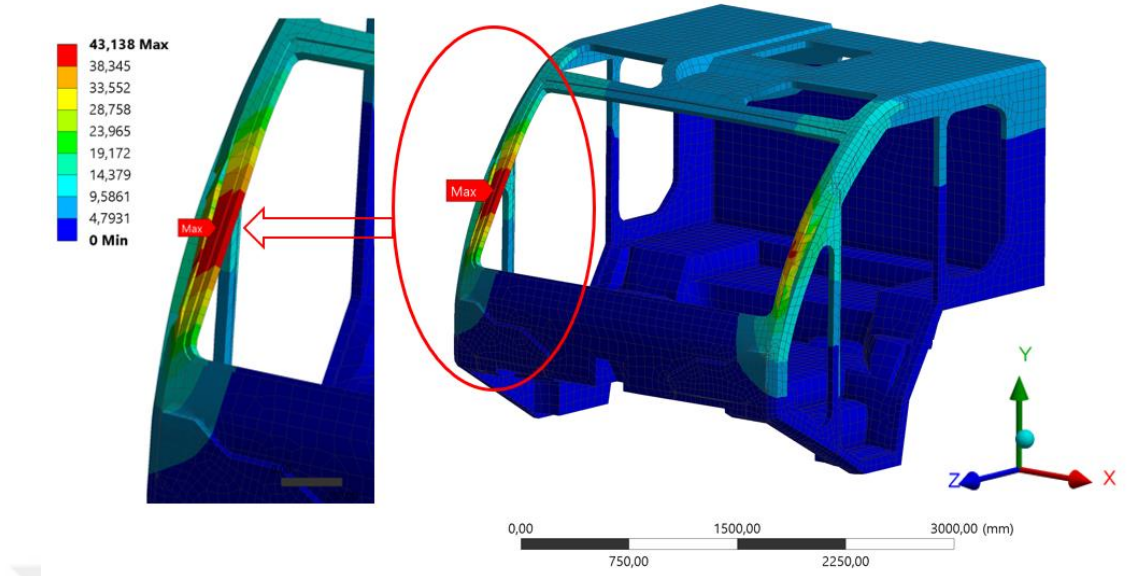
4.3.2 Kabinin “Ön A Sütunu” Testi Analiz Sonuçları

“Ön A sütunu” testi regülasyonda belirtilen sınır şartlarını ve çarpışma enerji değerini sağlayacak şekilde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Kabine etkiyen yük ile oluşan maksimum gerilme değeri 112,78 MPa (Şekil 4.8) ile kabin A sütunu ile ön yüzey bağlantı bölgesinden okunmuştur. Yükün etkisiyle kabinin yer değiştirmesi ise, 43,138 mm (Şekil 4.9) olarak yine A sütununda okunmaktadır. Analizde görülen maksimum yer değiştirme ve gerilme konumlarının, kabin kapı çerçevelerini etkilemediği görülmüştür. Böylece kaza anında kabinde meydana gelen deformasyonun, kabin içerisinde bulunan sürücü ve yolcuların hayatlarını tehlikeye atmadığı ve kaza sonrasında kabinden tahliye engeli olmadığı görülmektedir. Analiz sonrasında kabinden elde edilen maksimum gerilme ve toplam yer değiştirme verileri kabinin regülasyona uygun olarak tasarlandığını kanıtlamaktadır.

Yapılan simülasyon, darbenin A sütununda meydana getirdiği deformasyonun şekline göre, kabin dayanım güvenlik katsayısını arttırmak için fikir vermektedir. Kompozit kabin için bu darbe bölgelerinin metal çerçeve ile desteklenmesi, darbe dayanımını daha da arttıracaktır.



Şekil 4.8 Ön A sütunu testi maksimum gerilme değeri (MPa)



Şekil 4.9 Ön A sütunu testi maksimum yer değiştirme değeri (mm)

4.4 Kabinin “Yandan Darbe” Testi Analizi

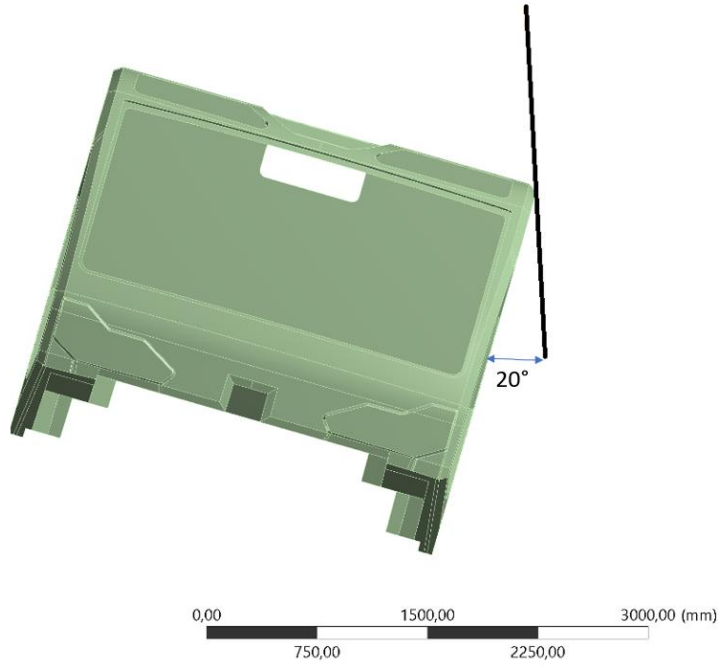
Çalışmada ECE R29/3 regülasyonunda belirtilen test aşamalarına uygun olarak, yandan darbe testi modellenmiştir. Sonlu elemanlar programında regülasyonda belirtilmiş sınır şartları sağlanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile ECE R29/3 “yandan darbe” testi sonrası, kabinin regülasyona uygunluğu kontrol edilmiş ve yandan darbe testi sonrasında kabindeki kritik bölgeler belirlenmiştir.

4.4.1 Kabinin “Yandan Darbe” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan kabin ve yük, PTC Creo programı ile 3 boyutlu olarak tasarlanmıştır. Sonrasında, Ansys Workbench LS-DYNA® sonlu elemanlar programı kullanılarak sırasıyla; kabin geometrisinin programa tanıtılması, kabin ve yük için malzeme tanımlarının yapılması, modelin eleman ve düğüm noktalarının ayrılması,

sınır şartlarının sisteme işlenmesi ve analiz sonuçlarının alınması şeklinde analiz gerçekleştirilmiştir.

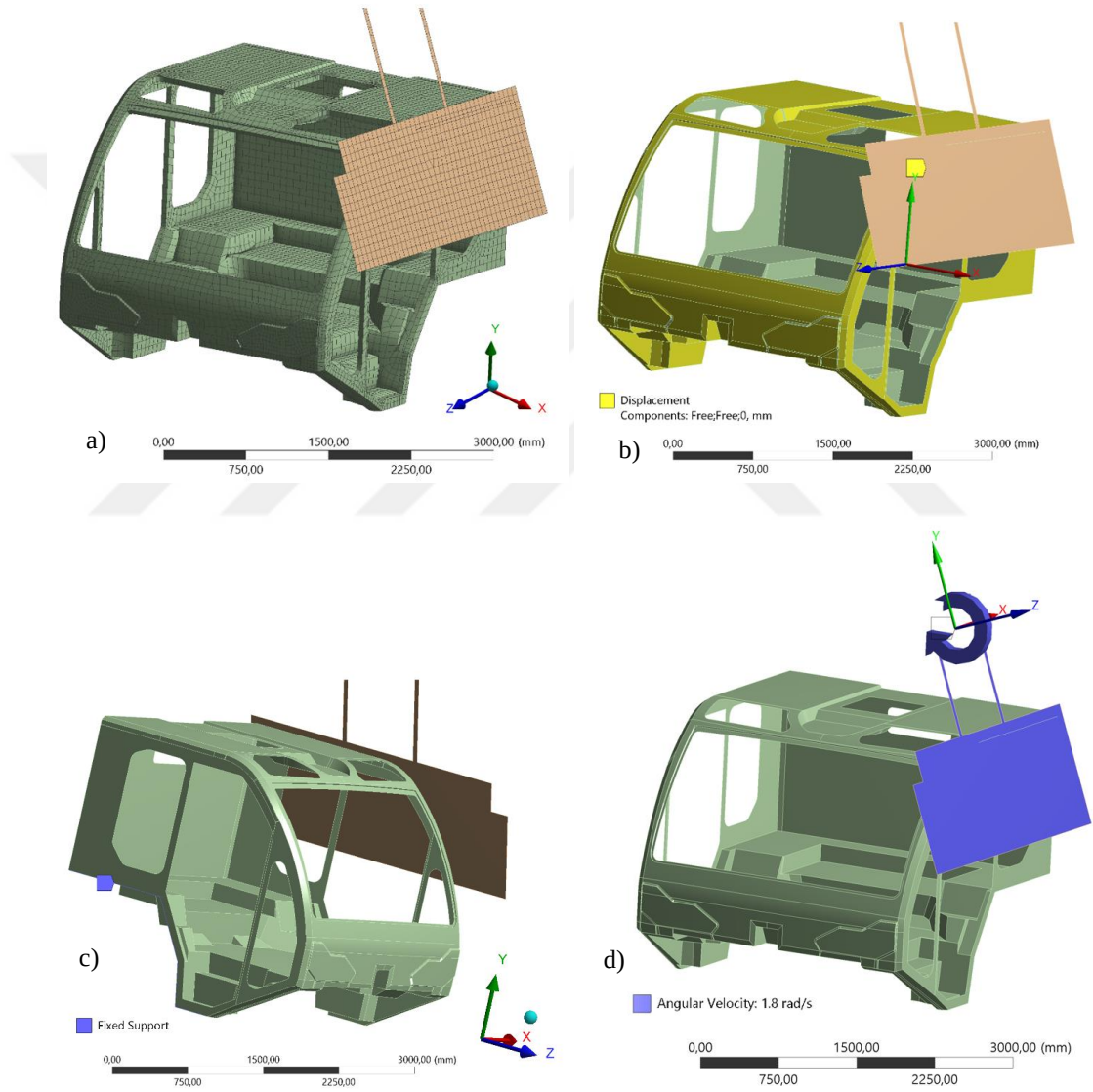
Yük geometrisi regülasyonda yandan darbe testi için belirtilen konuma (Bölüm 2.2.3), kabin yan duvarını ve kabin üst köşesini kaplayacak şekilde ve kabin ile yük arasında 20° olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sisteme tanıtılan yük ve kabin arasındaki tüm bağlantı yüzeyleri silinmiştir. Sonrasında regülasyonda verilen değerlere uygun olarak tasarlanan yükün malzeme özellikleri ST37 ve 2300 kg olacak şekilde 1190x3100, et kalınlığı 80mm olacak şekilde sisteme entegre edilmiştir. Kabin malzeme özellikleri Bölüm 4.1’de verilen lineer olamayan kompozit malzeme olarak et kalınlığı 50 mm olarak şekilde sisteme işlenmiştir.



Şekil 4.10 Yandan darbe testi kabin ve yük konumunun gösterimi

Yükün etki edeceği kritik bölgelerde eleman ve düğüm sayısı artırılarak daha gerçeğe yakın verilerin elde edilmesi hedeflenerek, kritik olmayan bölgelerde daha büyük eleman ve düğüm noktaları tercih edilmiştir. Yapılan bölme işlemine göre eleman kalitesi %80’nin üzerinde kalacak şekilde model; 10723 eleman ve 11443 düğüm noktasında oluşmaktadır.

Sınır şartlarında; araç kabinin, yükün etkisiyle z ekseninde hareketini engellemek için z eksenindeki yer değiştirme sıfır olarak tanımlanmış ve yandan gelen darbe ile kabinin darbeyi sönümleyebilmesi için kabin darbe yönünün aksi yönünde alt köşeden sabitlenmiştir. Ayrıca yük; sadece x eksenı çevresinde dönebilecek şekilde serbest bırakılmış, y ve z eksenlerindeki dönme hareketi kısıtlanmıştır. Yükün ilk hızı, regülasyonda verilen 17,9 kJ enerjiyi sağlayacak şekilde yük koordinat sistemine göre -z yönünde 3950 mm/s olacak şekilde, açısal hız olarak tanımlanmıştır.

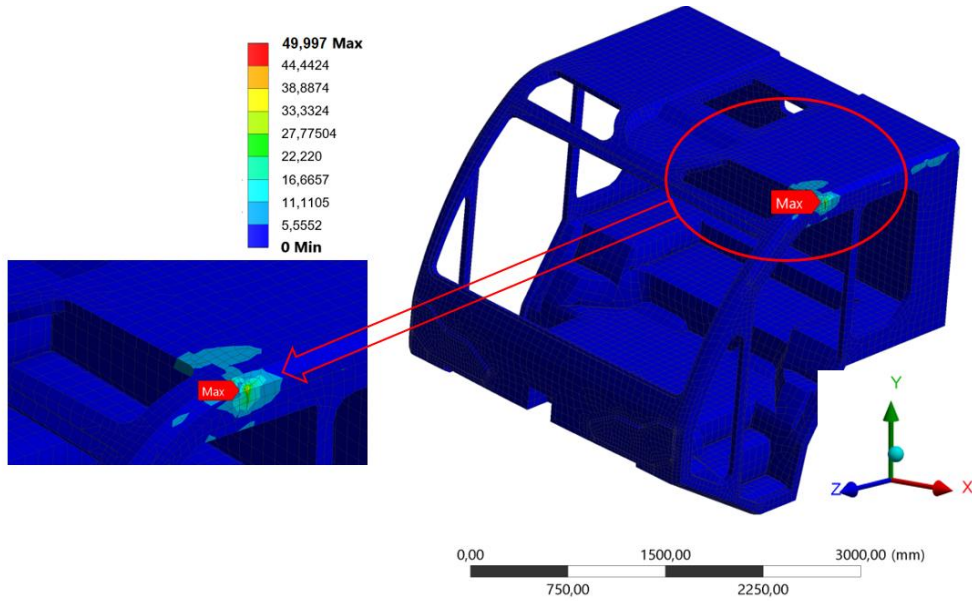


Şekil 4.11 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Yer değiştirme sınır şartı c) Kabinin sabitlenmesi d) Yük için ilk hızın tanımı

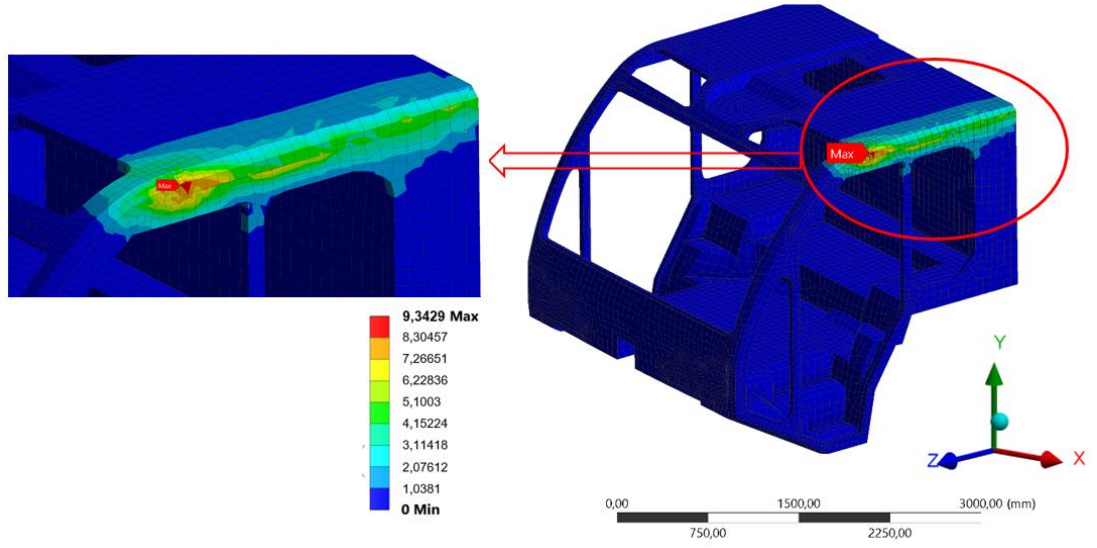
4.4.2 Kabinin “Yandan Darbe” Testi Sonuçları

“Yandan darbe” testi regülasyonda belirtilen sınır şartlarını ve çarpışma enerji değerini sağlayacak şekilde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Kabine etkiyen yük ile oluşan maksimum gerilme değeri 49,997 MPa (Şekil 4.12) ile kabine yükün direkt etkideği köşe bölgesinden okunmuştur. Yükün etkisiyle kabinin yer değiştirmesi ise, 9,3429 mm (Şekil 4.13) olarak yine kabin köşe bölgesinden okunmaktadır. Analizde görülen maksimum yer değiştirme ve gerilme konumlarının, sadece kabinin darbeye maruz kalan kenar bölgesinde olduğu gözlemlenmektedir. Böylece kaza anında kabinde meydana gelen deformasyonun, kabin içerisinde bulunan sürücü ve yolcuların hayatlarını tehlikeye atmadığı ve kaza sonrasında kabinden tahliyeye engel olmadığı görülmektedir. Analiz sonucuna göre kabinden elde edilen maksimum gerilme ve toplam yer değiştirme verileri, kabinin regülasyona uygun olarak tasarlandığını kanıtlamaktadır.

Yapılan simülasyon, deformasyonun şekline göre, kabin dayanım güvenlik katsayısını arttırmak için fikir vermektedir. Kompozit kabin için bu darbe bölgelerinin metal çerçeve ile desteklenmesi, hem yuvarlanarak takla atma kaza durumları için hem de önden ve üstten darbe dayanımını daha da arttıracaktır.



Şekil 4.12 Yandan darbe testi maksimum gerilme değeri (MPa)



Şekil 4.13 Yandan darbe testi maksimum yer değıştirme değeri (mm)

4.5 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi Analizi

Çalışmada ECE-R29/3 regülasyonunda belirtilen test aşamalarına uygun olarak, araca statik olarak etkiyen yük ve ağır hizmet aracına ait kompozit kabin tavan dayanımı testi için modellenmiştir. Sonlu elemanlar programında regülasyonda belirtilmiş sınır şartları sağlanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile ECE-R29/3 “tavan dayanımı” testi sonrası kabinin regülasyona uygunluğu kontrol edilmiş ve statik yükleme sonrasında kabindeki kritik bölgeler belirlenmiştir.

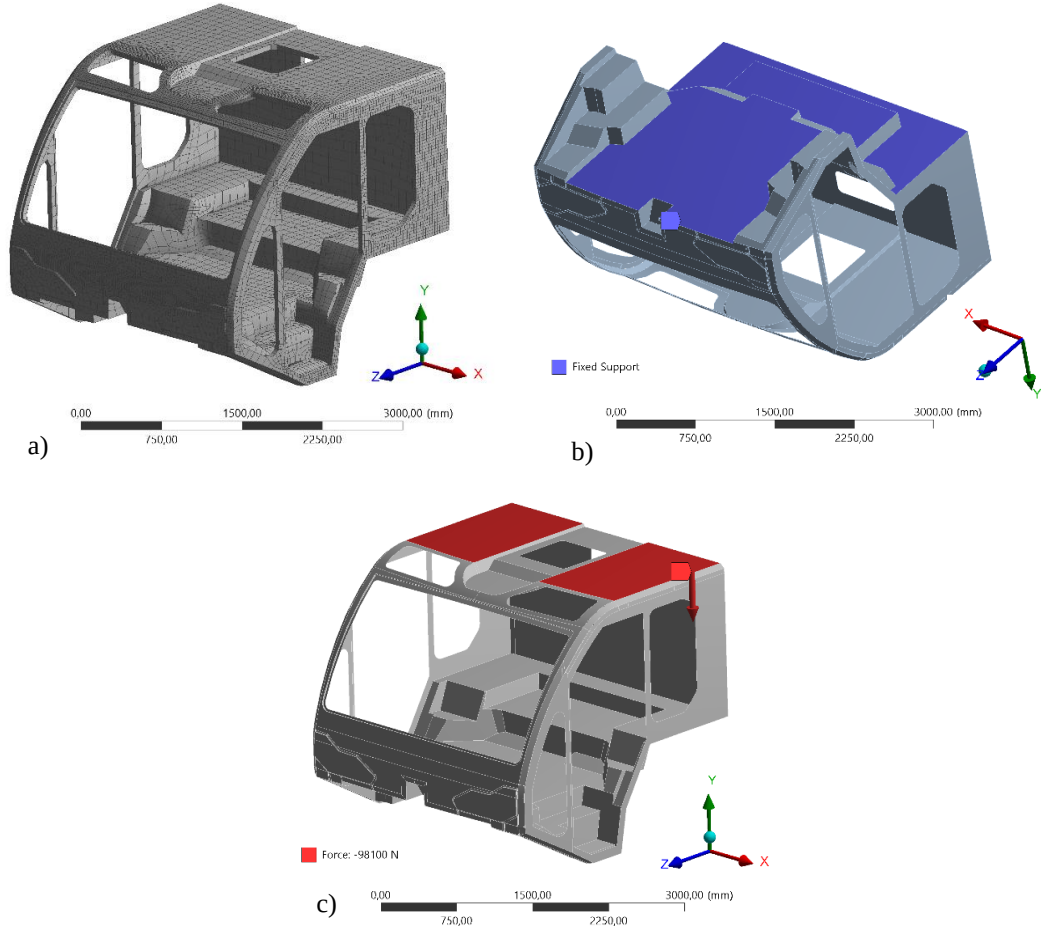
4.5.1 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi için Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması

Çalışmada 3 boyutlu tasarlanan gerçek ölçekli katı model üzerinden, Ansys Workbench sonlu elemanlar programı kullanılarak statik yapısal dayanım kabin analizi yapılmıştır. Sırasıyla; kabin geometrisinin programa tanıtılması, kabin için malzeme

tanımlarının yapılması, modelin eleman ve düğüm noktalarının ayrılması, sınır şartlarının sisteme işlenmesi ve analiz sonuçlarının alınması şeklinde gerçekleştirilmiş.

Tavan dayanımı analizinde, kabin malzeme özellikleri Bölüm 4.6’da verilen şekilde sisteme işlenmiştir. Tavandan etki edecek yükün, kritik kabin bölgelerini etkilemediği bölgelerde eleman ve düğüm sayısı azaltılmış ve analizin sadeleştirilmesi hedeflenmiştir. Kabinde yapılan bölme işlemine göre eleman kalitesi %80 şartı sağlayacak şekilde model; 12294 eleman ve 12736 düğüm noktasında oluşmaktadır.

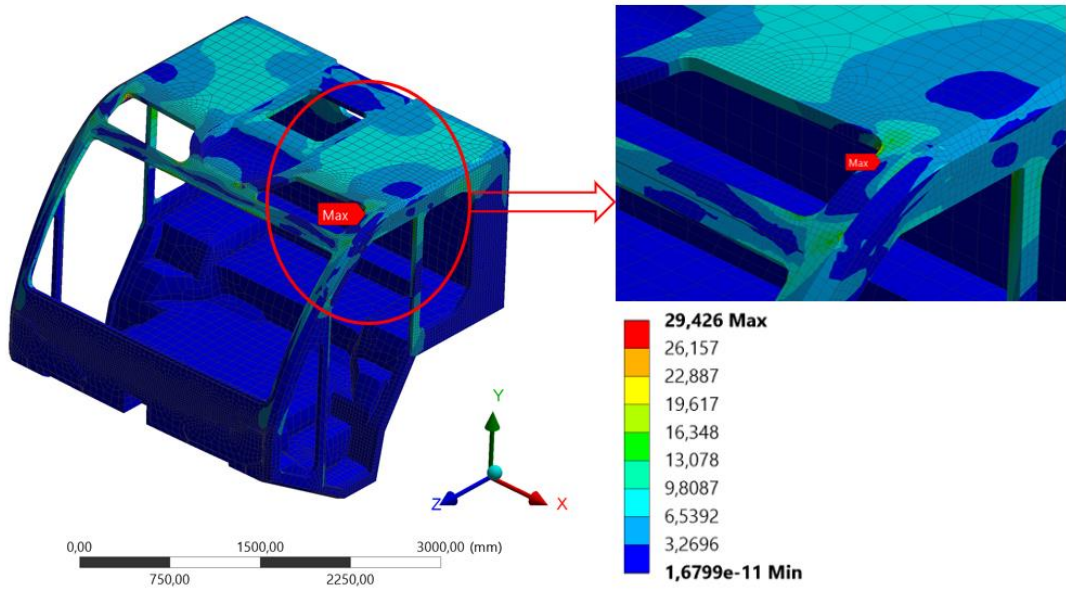
Sınır şartlarında; kabin şasi bağlantı noktalarından sabitlenmiş ve regülasyonda belirtilen şekilde kabine tavan bölgesinden 10 ton statik yayılı yük etki ettirilmiştir. Yük 20 saniye etkileyecek şekilde, -y yönünde sisteme tanımlanmıştır.



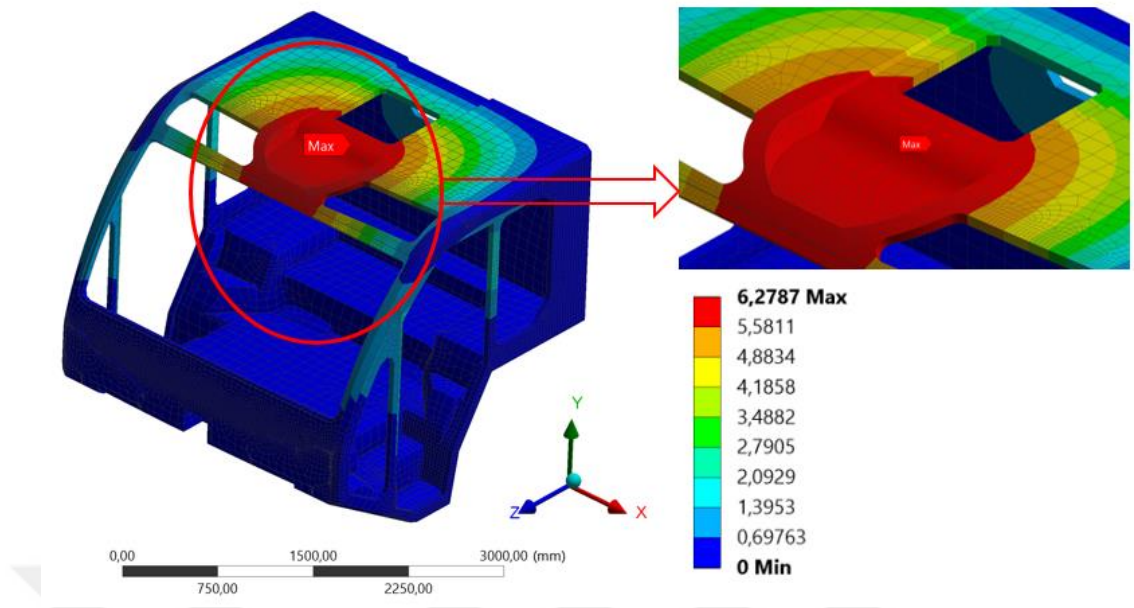
Şekil 4.14 a) Kabin modeli eleman ve düğüm noktaları b) Kabinin sabitlenmesi c) Yükün etki ettirilmesi

4.5.2 Kabinin “Tavan Dayanımı” Testi Sonuçları

Tavan dayanımı testi regülasyonda belirtilen sınır şartlarını ve statik yük ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonrasında kabin tavanına etkiyen yük ile oluşan maksimum gerilme değeri 29,426 MPa (Şekil 4.15) ile kabin tavan bölgesinden okunmuştur. Statik yükün etkisiyle kabinin yer değiştirmesi ise, 6,278 mm (Şekil 4.16) olarak yine tavan bölgesinden okunmaktadır. Analizde görülen maksimum yer değiştirme ve gerilme konumlarının, kabin malzeme özelliklerine göre çok küçük olduğu ve kabinin ana yapısını etkilemediği görülmüştür. Etkiyen yük kabin sütunlarında ve kapı çerçevesinde 1 mm kadar esnemeye sebep olmaktadır. Bu nedenle kaza anında kabinde meydana gelen deformasyon, kabin içerisinde bulunan sürücü ve yolcuların hayatlarını tehlikeye atmadığı ve kaza sonrasında kabinden tahliyeye engel olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.15 Tavan dayanımı analizi maksimum gerilme değeri (MPa)



Şekil 4.16 Tavan dayanımı analizi maksimum yer değıştirme değeri (mm)

BÖLÜM BEŞ

ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNE FİZİKSEL TEST AŞAMALARININ UYGULAMASI

Regülasyona göre özel amaçlı ağır hizmet aracı kabini, araç için özel olarak tasarlanan test platformu kullanılarak, B, C₁ ve C₂ test aşamalarına tabi tutulmuştur. B testi ve C testleri için iki kabin kullanılmıştır. Regülasyonda belirtilen enerji değerlerini sağlayacak şekilde serbest olarak belirli bir açıyla düşen yükün, kabine etkisi incelenmiştir. Enerjinin korunumu kanununa göre potansiyel ve kinetik enerji dönüşü formüllerinden B ve C₁ testleri için enerji değerleri sırasıyla 29,4 kJ ve 17,9 kJ olacak şekilde, vuruş açıları hesaplanmıştır. Bu açı değerleri B testi 74⁰ (Şekil 5.1.a), C₁ testi için ise 66⁰ (Şekil 5.1.b) olacak şekilde hesaplanmıştır.

5.1 Ön A Sütunu Testi (B Testi) Uygulaması

B testi için; araç kabini, şasi, tekerlekler, direksiyon mekanizması, kabin içi donanımların tamamının yer aldığı test aracı, araç orta eksenini ile test platformu orta eksenini kesişecek şekilde test platformuna göre konumlandırılmıştır. Araç, test platformuna serbest yük ile A sütunu temas edecek şekilde yaklaştırılmıştır. Aracın çarpma etkisiyle serbest hareketinin engellenmesi ve kabine iletilmesi gereken enerjinin tamamının aktarılması için, regülasyonda belirtilen şekilde çelik zincir ve spanzetler yardımıyla zemine bağlanmıştır (bakınız Bölüm 2.1.2).

A sütununa, 74⁰ derece ile yüke kazandırılan 29,4 kJ enerjiyle darbe gerçekleşmiştir. Bu darbe kabin üzerinde yaşam alanını etkileyecek bir değişikliğe sebep olmamıştır (Şekil 5.1). Bu deformasyon sonucunda regülasyon şartlarına göre kabin içerisindeki yolcuların yer değiştirmeleri incelenmiştir. Kompozit kabininin A sütunun ve ön cam çerçevesinin, metal çubuklarla desteklenerek üretilmiş olması,

kabinin önden darbe için mukavemetini arttırılmıştır. Sandviç kompozit yapının fiber ve reçineyle takviye edilmiş iç yapısı, darbe enerjisinin önemli bir kısmını emmiş ve sürücü ve yolcuların çarpışmadan daha az etkilenmesini sağlamıştır. Çarpışma anında ve sonrasında, kabin içerisindeki esnek olmayan yapı elemanlarının sürücü ve yolculara zarar vermediği ve yaşam alanının olumsuz etkilenmediği gözlemlenmiştir. Darbe sonucunda araçta bulunan yan ve ön camlar deforme olmuş, fakat araç standartlarına uygun olarak seçilmesi nedeniyle kaza sırasında sürücü ve yolculara zarar vermemiştir. Test sırasında araç kapılarının darbe etkisiyle açılmamış olması ve test sonrasında kapıların sıkışmadan açılarak tahliyeyi sağlaması, kabinin regülasyona uygunluğunu sağlamıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1 Sabitlenmiş test aracının ön a sütunu çarpma testi uygulaması (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 5.2 Ön A sütunu testi (B testi) sonrası (Kişisel arşiv, 2019)

5.2 Yandan Darbe Testi (C₁ Testi) Uygulaması

C₁ testi için; aracın orta eksenini ile test platformunun orta ekseninin dik olarak yerleştirilebilmesi için, test aparatının ön destek ayakları aparattan çıkarılmıştır. Araç kabininin test platformuna göre 20° açılı olarak konumlandırılabilmesi için, aracın sağ tarafında bulunan tüm tekerlekler, profil karkastan örülen platform üzerine çıkarılmıştır. Böylece araç; serbest yük, kabin köşesini kaplayacak ve temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Zemine sağ-sol yanlarından bağlanan araca, 66° açıda kaldırılarak 17,9 kJ enerjiye sahip yük etki ettirilmiştir (Şekil 5.3). Etki eden yük, öncelikle kabin tüm köşesini, sonrasında da kabin yan duvarını etkilemiştir.



Şekil 5.3 Sabitlenmiş test aracının yandan darbe testi uygulaması (Kişisel arşiv, 2019)

Darbe etkisiyle kabin karkası üzerinde yatay/ dikey bağlantı ve destek parçaları, kabin köşesinin ezilmesi gibi durum yaşanmamıştır. Metal çubuklarla kabine yapılan takviyeler ve kompozit malzeme özelliği gereği kabin çarpma enerjisini sönümlenmiştir. Parçalı olarak imal edilen kabinin birleşme bölgelerinde de aksi bir durum gözlemlenmemiştir. Yanal olarak etkiyen yük, kabinin şasi bağlantı elemanlarında da çarpılma, çatlak vb. durum yaratmamıştır (Şekil 5.4). Korunması gereken yaşam alanı, mankenlerin durumu ve kapıların kaza öncesi ve sonrası durumları incelenerek kabinin regülasyona uygunluğuna karar verilmiştir.



Şekil 5.4 Yandan darbe testi (C1 testi) sonrası (Kişisel arşiv, 2019)

5.3 Tavan Dayanımı Testi (C₂ Testi) Uygulaması

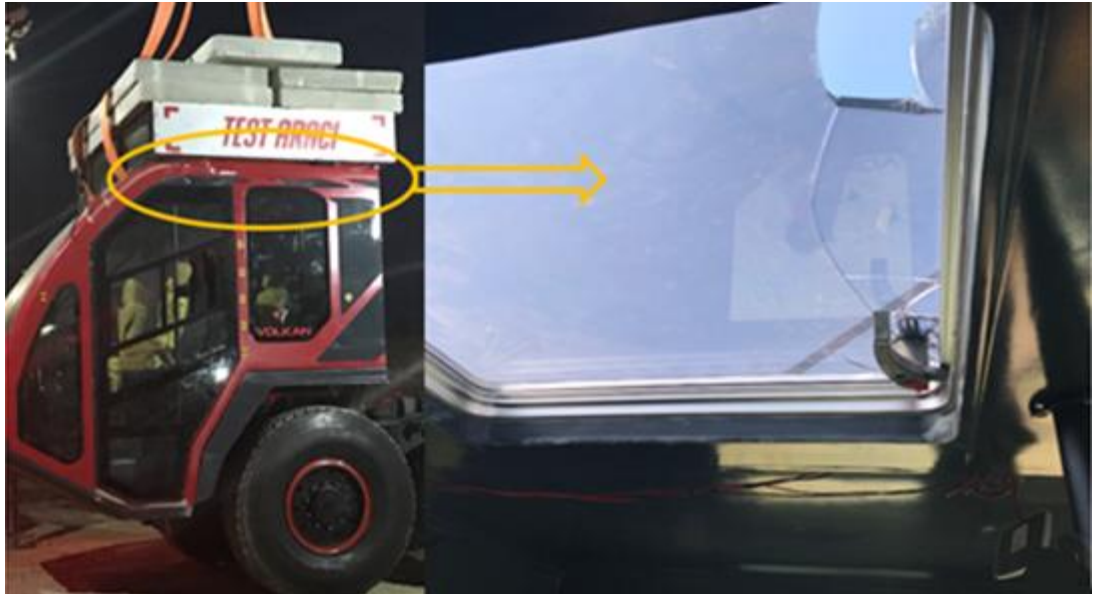
C₂ testi için; C₁ testinde kullanılan aynı kabin ve test aracı üzerine beton bloklardan hazırlanan 10 ton yük, araç kabinin tavanına tüm tavanı kaplayacak şekilde yavaşça bırakılmıştır. Kabinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir (Şekil 5.5).

C₂ testi için kabin üzerine bırakılan 10 ton yük, öncelikle araçta ön askı sistemi yayları çökmüş ve yükün tamamının kabin üzerine bırakılması sonucunda, çatıda bulunan erişim penceresi kırılmış ve bunun dışında bir deformasyon oluşmamıştır.

Çatı ve destek kolonlarında yük nedeniyle bozulma söz konusu değildir. Kabinde ECE normlarına uygun cam kullanılması, darbe etkisiyle kırılan cam parçalarının kişilere zarar vermesini engellemiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.5 Test aracının tavan dayanımı testi uygulaması (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 5.6 Tavan darbe testi (C2 testi) sonrası (Kişisel arşiv, 2019)

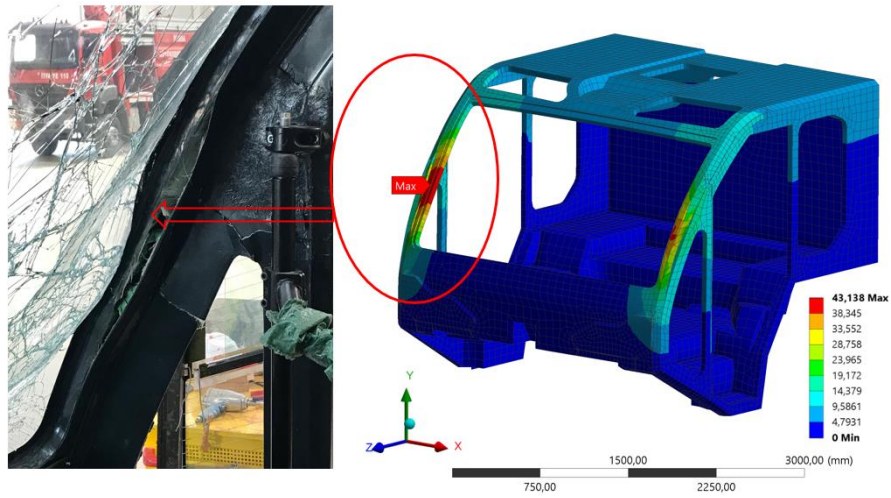
BÖLÜM ALTI

ECE-R29/3 REGÜLASYONUNA GÖRE ÖZEL AMAÇLI BİR AĞIR HİZMET ARACI KABİNİNİN DENEYSEL VE FİZİKSEL TEST SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI / OPTİMİZASYONU

Bu bölümde; özel amaç için kullanılan ağır ticari araç kabini için, ECE R29/3 regülasyonuna uygun olarak yapılan simülasyon ve fiziksel test sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; ön A sütunu testi, yandan darbe testi ve tavan dayanımı test etapları ayrı ayrı incelenmiştir.

6.1 Ön A Sütunu Testi (B Testi)

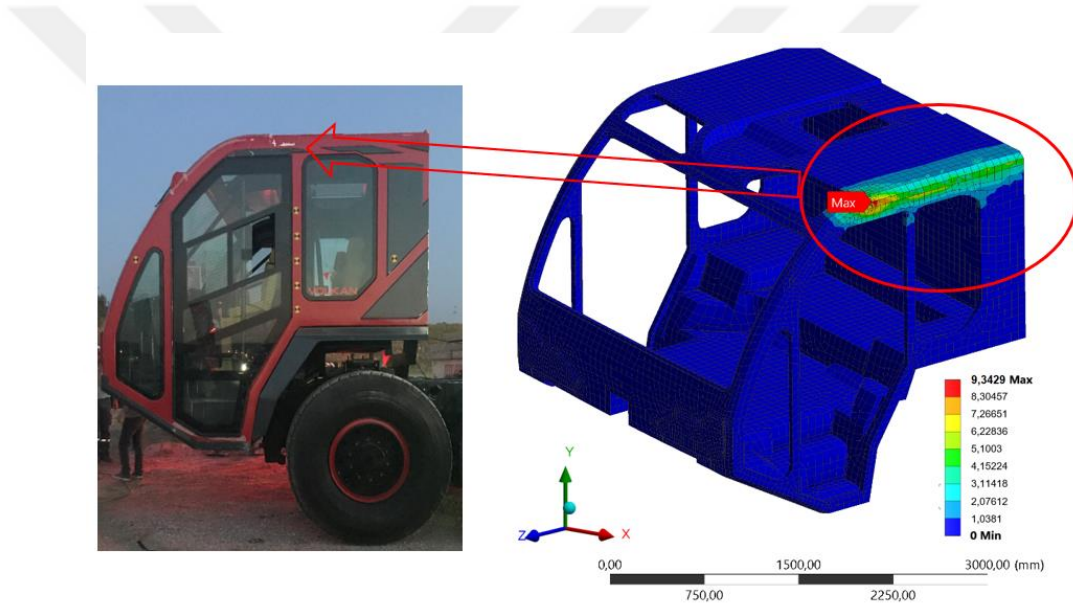
Kompozit kabin için, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre (bakınız Bölüm 4.3.2), darbe sonrasında A sütunu üzerindeki kritik noktalara göre, daha tasarım aşamasında, A sütununu içine alan bir metal çerçevenin darbe dayanımını arttıracakları öngörülmüştür. Bu verilere göre, A sütunu metal çerçeve ile desteklenmiş bir kabin üzerinde yapılan fiziksel test, yapılan öngörüğü desteklemektedir. Kritik bölgelerin mukavemetinin artırılması, z yönündeki yer değiştirme miktarını yaklaşık %55 azaltmıştır.



Şekil 6.1 Ön A sütunu testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm)
(Kişisel arşiv, 2019)

6.2 Yandan Darbe Testi (C₁ Testi)

Kompozit kabin için, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre (bakınız Bölüm 4.4.2), darbe sonrasında yan duvar ve kabin köşe bölgeleri üzerindeki kritik noktalara göre, daha tasarım aşamasında, yan duvar ve kabin sütunlarını içine alan bir metal çerçevenin darbe dayanımını arttıracakları öngörülmüştür. Bu verilere göre, kabin sütunları metal çerçeve ile desteklenmiştir. Kabin üzerinde yapılan fiziksel test, yapılan öngörüğü desteklemektedir. Kritik bölgelerin mukavemetinin artırılması, -x yönündeki yer değiştirme miktarını yaklaşık %45 azaltmıştır.

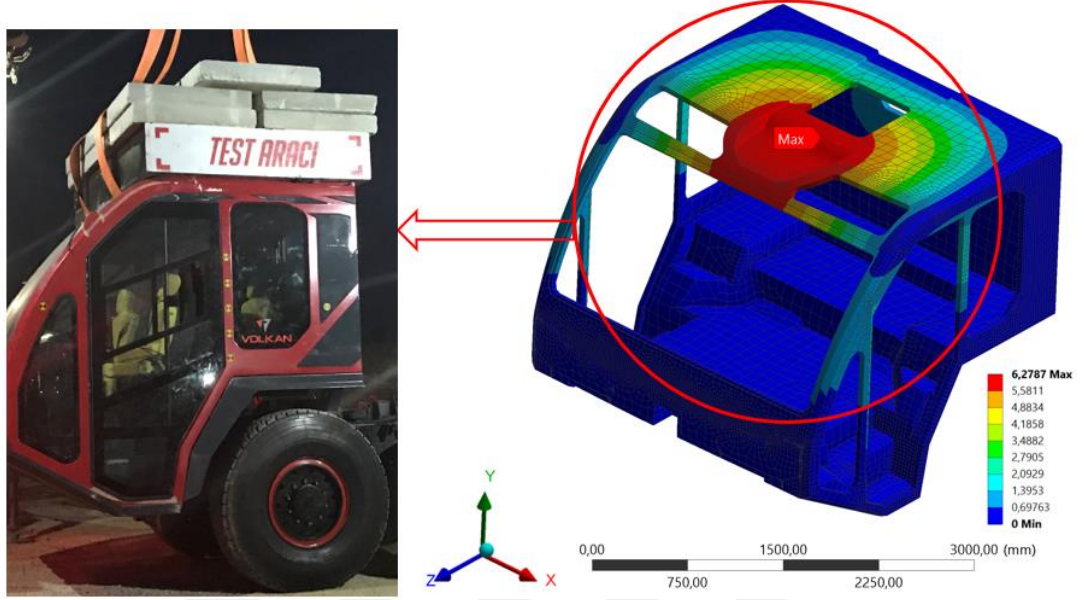


Şekil 6. 2 Yandan darbe testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm) (Kişisel arşiv, 2019)

6.2 Tavan Dayanımı Testi (C₂ Testi)

Kompozit kabin için, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre (bakınız Bölüm 4.5.2), statik yükleme sonrasında elde edilen -y yönündeki yer değiştirme değeri ve gerilme değerlerinin, kabin mukavemet değerlerine göre oldukça etkisiz olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kabinin yanal

ve önden çarpma durumunda kritik bölgelere ilave edilen destekler, tavan dayanımı testi için kabin dayanımını daha da arttırmıştır. Bu nedenle kabin hem deneysel hem de fiziksel test sonuçlarına göre regülasyona uymaktadır.



Şekil 6.3 Tavan dayanımı testi fiziksel ve deneysel deformasyon test sonuçlarının karşılaştırılması (mm)
(Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

Günümüzde hem binek araçlarda hem de hafif/ağır ticari araçlarda, sürücü ve yolcuların güven içerisinde yolculuk yapabilmeleri için, araç çarpışma testi prosedürlerinin yerine getirilmesi gün geçtikçe önem kazanmıştır. Bu nedenle araç üreticileri, olası kaza durumu için araç kabini içerisindeki yaşam alanının korunmasını sağlayacak şekilde çalışmalar yürütmektedirler. Tasarım aşamasında ve sonrasında yapılan analizler ve fiziksel testler ile kabin darbe direnci incelenmekte ve kabinde gerekli iyileştirmeler yapılmaktadır. Hafif/ağır ticari araçlarda, kabin direncinin belirlenmesi ve yaşam alanının korunması test prosedürleri ECE-R29/3 standartlarına uygun olarak yapılmaktadır.

ECE-R29/3 regülasyonu, bir ticari aracın kabininde bulunan sürücü ve yolcuların olası kaza durumlarında korunmasını sağlayacak bir yaşam alanından bahsetmektedir. Araç kabini, araç sınıflarına göre regülasyonda belirtilen aşamalarda sırasıyla test edilmektedir. Test öncesinde kabin içerisine yerleştirilen mankenlerin, kaza sonrasındaki konumlarında yapılan ölçümlerle ve kaza sonrasında sürücü ve yolcuların kabini tahliye edebilme durumları göz önüne alınarak kabinin regülasyona uygunluğuna karar verilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, N₃ araç sınıfında bulunan, arkadan motorlu ve kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş bir kabine sahip özel amaçlı kullanılan bir hizmet aracının, deneysel ve fiziksel ECE R29/3 test aşamaları gerçekleştirilmiştir. Bu araç için üretilen kompozit kabin için; tasarım aşamasında yapılan deneysel testler ile kritik darbe bölgeleri belirlenmiş ve bu bölgelere metal çubuk destekler ile yapılan iyileştirmeler, kompozit yapının güçlenmesini sağlamıştır. Kompozit malzeme özelliği gereği, darbe etkisiyle darbe enerjisinin büyük çoğunluğu malzeme iç yapısı tarafından emilmiştir. Bu da yolcuların yaralanma riskini azaltmaktadır.

ECE R29/3 regölasyonunda, kaza sırasında araç kapılarının darbe etkisiyle açılmaması ve kaza sonrasında ise sürücü ve yolcuların kolay tahliye edilebilmesi için sıkışmaması gerektiği belirtilmiştir. Hem deneysel hem de fiziksel testler sırasında bu durum yaşanmamıştır. Herhangi bir kaza anında kabin içerisindeki yaşam alanının korunması ve regölasyon isteklerinin tamamının karşılaması nedeniyle, kabinin ECE R29/3 regölasyonuna uygun olduğu kanıtlanmıştır. Çalışmamda, sandviç kompozit malzemeden infüzyon ve el yatırması yöntemi ile üretilmiş kabin kullanılması diğer çalışmalara göre farklılık oluşturmaktadır. Bu kompozit kabinin analiz ve testleri ile regölasyon koşulları sağlanmıştır. Analiz ve deney sonuçlarının birbirini doğruladığı görülmüştür Kabin testlerini gerçekleştirmek için kullanılan test platformu da araca göre tasarlanarak üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Büyük M., Atahan A.O. ve Kurucuoęlu K., (2018). Impact performance evaluation of a crash cushion design using finite element simulation and full-scale crash testing, *Safety*, 4(4), 48.

Cam Elyaf Sanayii A.Ş., (2003). *CTP teknolojisi*. Gebze: Cam Elyaf Sanayii Yayınları.

Cengiz A. (2007). *Kompozit ubukların enerji sönümleyici özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

aęar P. ve Yalkın H., (2016). Polimer matrisli kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi ve ürünlerin tahribatsız muayenesi, *VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, 1-8.

apar G., Kuralay N.S.ve Karaoęlan M.U., (2020). zel maksatlı bir ağır hizmet aracı için kabin darbe test dzeneğinin tasarımı ve uygulanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mhendislik Fakültesi, Fen ve Mhendislik Dergisi*, 22(65), 611- 618.

Dwivedi, P., Kulkarni, A., Chalipat, S. ve Pardeshi, M. (2011). *Protection devices to improve frontal pendulum impact performance of heavy commercial vehicles* (No. 2011-26-0099). *SAE Technical Paper*, India.

Gendar D., (2007). Numerical simulations for testing of commercial vehicle as per ECE R29 regulations, symposium on international automotive technology. *SAE Paper No. 26-045*, India.

Gldemet D. (2006). *Kompozitlerin darbe davranışına,impektr hızı, plaka boyutu ve oryantasyon açısının etkisi*. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Han D. ve Lee J., (2010). The effects of glass fiber reinforcement on the mechanical behavior of polyurethane foam, journal of mechanical science and technology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(1), 263-266.

H-point, (2020). 29 Mayıs, 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/H-point>

Honiball, E. J. ve Van Niekerk, J. L. (2001). The development of a test specification to determine the rollover protection of passengers in light commercial vehicles fitted with canopies. *Accident Analysis & Prevention*, 33(5), 621-628.

Karayolları trafik yönetmeliği mevzuat bilgi sistemi, (1997). 20 Ocak 2020, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Korkut S. (2017). *Implicit ve explicit arasındaki farklar*. 15 Mayıs 2019, <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/11/implicit-ve-explicit-arasindaki-farklar/>.

Kuralay, N. S. (2008). *Motorlu taşıtlar; temel ve tasarım esasları, yapı elemanları, fren ve direksiyon sistemleri*. İzmir: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.

Mirzaamiri R., Esfahanian M. ve Ziaei-Rad S. (2012). Crash test simulation and structure improvement of IKCO 2624 truck according to ECE-R29 Regulation. *International Journal of Automotive Engineering*, 2 (3), 180-192.

Mohamed M., Anandan S., Huo Z., Birman V., Volz J.ve Chandrashekhara K., (2014). Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures. *Composite Structures*, 123, 169–179.

NFPA-414, Standard for aircraft rescue and fire-fighting vehicles, (2015).

Pasha H., Madhuchandra, K.S., Rajesh P.ve Basavaraja J, (2018). Reinforcement design and crash analysis of medium duty trucks for rollover crash accidents. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering*, 3, (5), 247-252.

Philip J. ve Munga S. (2013). Correlation of test results for ECE R 29 load cases with CAE Simulation. *Altair Technology Conference, India*, 05 Mart, 2020, https://moam.info/correlation-of-test-results-for-ece-r-29-load-cases-with-cae-_598098201723ddf156c8b6c1.html

Raich H., (2003). Safety analysis of the new actros megaspace cabin according to ECE-R29/02. *4th European LS-DYNA Users Conference*, 22-23.

Regulation No 29 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), (2011). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle.

Sharma, S., Sharma, S., Tiwari, S., ve Gupta, U., (2015). Finite element simulation and validation of fully suspended heavy duty commercial vehicle (HCV) as per AIS029 pendulum impact Test. *SAE Technical Paper 01-2873*, Michigan.

Yaşar F. (2011). *N3 sınıfı ağır ticari bir aracın ECE R29 standardına uygun önden çarpma analizi ve iyileştirme çalışmaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.