

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**YUVARLANMAYA KARŞI KORUYUCU YAPILARA (ROPS) UYGULANAN
SİMÜLASYON TEKNİKLERİNDE ETKİLİ PARAMETRELERİN
BELİRLENMESİ**

Mehmet YAŞARTEKİN

**TARIM MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

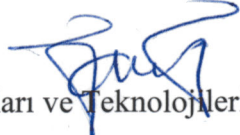
ANKARA

2019


Her hakkı saklıdır


TEZ ONAYI

Mehmet YAŞARTEKİN tarafından hazırlanan “**Yuvarlanmaya Karşı Koruyucu Yapılara (ROPS) Uygulanan Simülasyon Tekniklerinde Etkili Parametrelerin Belirlenmesi**” adlı tez çalışması 11/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları ve Teknolojileri Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Hasan Hüseyin SİLLELİ 
Ankara Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği
Anabilim Dalı


Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Ali İhsan ACAR 
Ankara Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim
Dalı

Üye : Prof. Dr. Hasan Hüseyin SİLLELİ 
Ankara Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim
Dalı

Üye : Prof. Dr. Bora YILDIRIM 
Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. SARP KORKUT SÜMER 
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri
Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Caner KOÇ 
Ankara Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim
Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

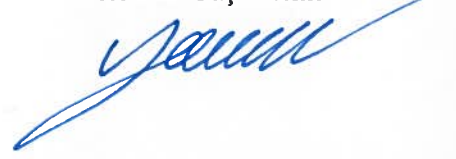
Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür V.

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

11/04/2019

Mehmet Yaşartekin



ÖZET
Doktora Tezi

**YUVARLANMAYA KARŞI KORUYUCU YAPILARA (ROPS) UYGULANAN
SİMÜLASYON TEKNİKLERİNDE ETKİLİ PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ**

Mehmet YAŞARTEKİN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan Hüseyin SİLLELİ

Tarımda, traktör devrilmesi en büyük risklerden biridir ve genellikle çok ciddi yaralanma ya da ölümlerle sonuçlanmaktadır. Yuvarlanmaya karşı koruyucu yapıların emniyet kemeri ile birlikte kullanımı kazalarda ölümlerin önlenmesinde bilinen en iyi yöntemdir. Standartlar ve yönetmelikler, ilgili yapının bir test platformunda doğrudan test edilmesini zorunlu tutmaktadır. Ancak son yıllarda gelişen sanal simülasyon teknikleri, maliyet ve zaman açısından yarar sağlamanın yanı sıra farklı koşullarda birden çok simülasyon yapılabilmesine de olanak sağlayabilmektedir. Genel olarak sanal simülasyon metodlarının geçerlilikleri, teknik içeriklerinin ne kadar iyi tanımlandığı ve doğrulama tekniklerinin ne kadar gerçek test sonuçlarıyla uyumlu olduğuyula yakından ilişkilidir. Bu çalışmada, gerçek test sonuçları ile uyumlu sanal simülasyon test yöntemleri ortaya koyulması hedeflenmiştir. Farklı modelleme yaklaşımları ve farklı çözüm yaklaşımlarından dolayı simülasyon sonuçlarında ortaya çıkan hataları azaltmak ya da yok etmek açısından, sanal simülasyon yöntemlerinin standart yöntemler ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan gerçek fiziksel testleri gerçekleştirilmiş 2 adet koruyucu kabin için farklı parametrelere sahip sanal simülasyonlar gerçekleştirilerek; gerçek test sonuçları ile sanal simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve farklı parametrenin sanal simülasyon sonuçları üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, analiz sonuçları üzerindeki en önemli etkilerin malzeme modellenmesine, kullanılan sonlu eleman tipine ve sınır koşullarının gerçekçi modellenmesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Koruyucu kabin direngenliği, yüklemenin her adımında değiştiği için, simülasyonlarda da kabin yapısı direngenliğinin deformasyona bağlı olarak değişken olarak modellenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Nisan 2019, 163 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bilgisayar Destekli Yapısal Analiz, Sanal Simülasyon Metodu, OECD Code 4, Sonlu Elemanlar Analizi



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE DETERMINATION OF INFLUENTIAL PARAMETERS OF SIMULATION TECHNICS APPLIED ON ROLL OVER PROTECTIVE STRUCTURES (ROPS)

Mehmet YAŞARTEKİN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Agricultural Machinery Technology and Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Hasan Hüseyin SİLLELİ

In agriculture, over tuning of tractor is one of the biggest risks and generally it results as injury and death. The use of roll over protective structures in conjunction with the safety belt is the best-known method for preventing deaths in the accident. Testing of given structure on a test platform is obligatory according to standards and regulations. However, the implementation of reliable simulation techniques developed in recent years, as can provide cost and time benefits may allow multiple simulations can be done in different conditions. Overall validity of virtual simulation methods is closely related to how to defined the technical contents and how compatible of the verification techniques with actual test results. In this study, it is aimed to introduce a virtual simulation test method that is compatible with the actual test results. In terms of reducing, the errors on a simulation arising different modelling and solution approaches should be carried out by standard methods of virtual simulation methods. In this respect, virtual simulations with different parameters have been performed for 2 roll over protective cabins that have real physical tests results; real simulation results and virtual simulation results were compared and the effects of different parameters on virtual simulation results were observed. As a result, it has been observed that the most important effects on the results of simulation depend on material modeling, type of finite element used and the realistic modeling of boundary conditions. It has been revealed in the simulations that the stiffness of the cabin structure should be modeled variable depending on the deformation steps since the stiffness of the protective cabin changes at every step of the loading.

April 2019, 163 pages

Key Words: Computer Aided Structural Analysis, Virtual Tests, OECD Code 4, Finite Element Methods

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan SİLLELİ'ye, çalışmalarım süresince önemli katkılarda bulunan ve yönlendiren Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a ve Ankara Üniversitesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Ali İhsan ACAR'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmalarım süresince birçok fedakarlıklar göstererek beni her zaman destekleyen eşim Yüksel YAŞARTEKİN'e en derin duygularla teşekkür ederim.

Bu tez çalışması için her türlü desteğini esirgemeyen ERKUNT Traktör A.Ş. ve çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Mehmet YAŞARTEKİN

Ankara, Nisan 2019

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Traktörün Devrilme Riski	2
1.2. Traktör Koruyucu Yapıları.....	3
1.3. Koruyucu Yapı Enerji Absorbe Yeteneği	4
1.4. Kabin - Şase Bağlantı Konseptleri.....	6
1.4.1 Pim bağlantı	6
1.4.2 Plaka bağlantı	7
1.4.3 Rijit bağlantı	7
2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Materyal	17
3.1.1 Erkunt Traktör yuvarlanmaya karşı koruyucu yapıları.....	20
3.1.2 Koruyucu yapı devrilme testleri	22
3.2. Yöntem	25
3.3. Sonlu Elemanlar Metodu.....	29
3.3.1 Doğrusal statik analiz varsayımları ve limitleri	31
3.3.2 Doğrusal olmayan statik analizler	32
3.4. Sonlu Elemanlar Modeli Oluşturma Yöntemleri	35
3.5. Sanal Simülasyon Malzeme Oluşturma Yöntemi.....	40
3.5.1 1. malzeme.....	41
3.5.2 2. malzeme.....	42
3.5.3 3. malzeme	43
3.5.4 4. malzeme.....	44
3.5.5 5. malzeme.....	45
3.5.6 6. malzeme.....	46
3.5.7 Parçalı doğrusal malzeme modelleme yaklaşımı.....	48
3.5.8 RAMBERG-OSGOOD yaklaşımı.....	48
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	49
4.1. İki Direkli YKKY - Arkadan Yükleme Yük Durumu	49
4.2. İki Direkli YKKY - Önden Yükleme Yük Durumu	54
4.3. İki Direkli YKKY - Yandan Yükleme Yük Durumu	58
4.4. Dört Direkli YKKY - Arkadan Yükleme Yük Durumu	62
4.4.1 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 1.....	63
4.4.2 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 2.....	66
4.4.3 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 3.....	68
4.4.4 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 4.....	72
4.4.5 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 5.....	74
4.4.6 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 6.....	77
4.4.7 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 7.....	79

4.4.8	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 8.....	82
4.4.9	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 9.....	85
4.4.10	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 10.....	88
4.4.11	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 11.....	91
4.4.12	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 12.....	93
4.4.13	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 13.....	96
4.4.14	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 14.....	99
4.4.15	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 15.....	102
4.4.16	Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 16.....	106
4.5.	Dört Direkli YKKY - Yandan Yükleme Yük Durumu.....	109
4.5.1	Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 1.....	110
4.5.2	Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 2.....	112
4.5.3	Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 3.....	115
4.5.4	Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 4.....	118
4.6.	İstatiksel Bulgular ve Genel Değerlendirme.....	124
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	125
	KAYNAKLAR.....	130
	EKLER.....	133
	ÖZGEÇMİŞ.....	162

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c	Ağırlık merkezine olan mesafe
CAD	Computer Aided Design
E	Elastiklik modülü (Young modülü)
F	İzin verilebilir yük
F_{cr}	Kritik yük
F_{yield}	İzin verilebilir akma yükü
FEM	Finite Element Method
g	Yük faktörü
G	Rijitlik modülü
G.F.	Güvenlik Faktörü
I	Atalet momenti
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	İzin verilebilir gerilme
P_{yield}	İzin verilebilir akma gerilmesi
p	Uygulanan nihai yük
P_{limit}	Uygulanan limit yük
ROPS	Roll Over Protective Structures
SEM	Sonlu Elemanlar Modeli
t	Kalınlık
YKKY	Yuvarlanmaya Karşı Koruyucu Yapı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Kaza sonucu devrilmiş bir traktör (Murphy, D. and Buckmaster, D., 2003).....	1
Şekil 1.2 Traktör devrilme tipleri (http://safer-omur.net)	2
Şekil 1.3 Traktör YKKY tipleri (http://iloencyclopaedia.org/component/k2/94-58-safety-applications/rollover)	3
Şekil 1.4 Traktör koruyucu çerçevenin devrilmedeki önleyici etkisi (Anonymous, 1995)	3
Şekil 1.5 Koruyucu kabin yapısal elemanların görevleri (Mavi oklar: Uygulanan kuvvetler, Kırmızı oklar: Reaksiyon kuvvetleri)	4
Şekil 1.6 Koruyucu yapı enerji emme yeteneği (Anonymous, 2014)	5
Şekil 1.7 Koruyucu kabin enerji grafiği (Anonymous, 2014).....	6
Şekil 1.8 Koruyucu yapı şase bağlantı tipleri (Anonymous, 2014)	6
Şekil 1.9 Koruyucu kabin şase plaka bağlantısı (Anonymous, 2014).....	7
Şekil 1.10 Koruyucu kabin şase rijit bağlantısı (Anonymous, 2014)	7
Şekil 2.1 1990-2001 yılları arasında Türkiye’de gerçekleşen traktör devrilme kazaları (Gölbaşı, 2002).....	8
Şekil 2.2 Düz yüzeyde devrilme	9
Şekil 2.3 Yana devrilme nedenleri (Chisholm, 1979a).....	9
Şekil 2.4 Modellemeye esas traktör temas noktaları (Chisholm,1979b)	11
Şekil 2.5 Sanal (virtual) test ve deformasyon-yük grafikleri (Anonymous, 2015a)	14
Şekil 3.1 İki direkli yuvarlanma karşı koruyucu yapı modeli.....	20
Şekil 3.2 Dört direkli yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı modeli	21
Şekil 3.3 Traktör koruyucu yapı statik testleri (Anonymous, 2013).....	22
Şekil 3.4 Güvenli yaşam bölgesi (Anonymous, 2018).....	23
Şekil 3.5 Arkadan yatay yükleme (Anonymous, 2018)	23
Şekil 3.6 Arkadan ezme testi (Anonymous, 2018)	24
Şekil 3.7 Yandan yükleme testi (Anonymous, 2018)	25
Şekil 3.8 Sanal simülasyon testlerinin kullanılma diyagramı (Anonymous, 2015c)	26
Şekil 3.9 Sanal simülasyon test yol haritası (Anonymous, 2015a)	27
Şekil 3.10 Mühendislik analiz yöntemleri (Anonymous, 2005)	29
Şekil 3.11 Sonlu elemanlar yöntemi akış diyagramı (Anonymous, 2005)	31
Şekil 3.12 Geometrik doğrusalsızlıktan dolayı takipçi kuvvet (Anonymous, 2005)	35
Şekil 3.13 1 Boyutlu (Bar Elements) FEM	36
Şekil 3.14 Yükleme ve sınır koşulları	37
Şekil 3.15 2 Boyutlu (Quad Elements) FEM	38
Şekil 3.16 3 Boyutlu (Tet10 Elements) FEM.....	39
Şekil 3.17 2 Boyutlu (Quad Elements) FEM	40
Şekil 3.18 Malzeme 1 gerinme-gerilme eğrisi	42
Şekil 3.19 Malzeme 2 gerinme-gerilme eğrisi	43
Şekil 3.20 Malzeme 3 gerinme-gerilme eğrisi	44
Şekil 3.21 Malzeme 4 gerinme-gerilme eğrisi	45
Şekil 3.22 Malzeme 5 gerinme-gerilme eğrisi	46
Şekil 3.23 Malzeme 6 gerinme-gerilme eğrisi	47
Şekil 3.24 ST-37 doğrusal olmayan malzeme verileri.....	47
Şekil 3.25 Parçalı doğrusal malzeme tanımlama	48
Şekil 4.1 Arkadan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları.....	50

Şekil 4.2 Arkadan yükleme FEM Von Mises gerilme (stress) sonuçları.....	50
Şekil 4.3 Tamtest arkadan yükleme kuvvet-deformasyon grafiği	52
Şekil 4.4 Arkadan yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri	52
Şekil 4.5 Önden yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları.....	54
Şekil 4.6 Önden yükleme FEM Von Mises gerilme (stress) sonuçları	54
Şekil 4.7 Tamtest önden yükleme kuvvet-deformasyon grafiği	56
Şekil 4.8 Önden yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri	56
Şekil 4.9 Yandan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları.....	58
Şekil 4.10 Yandan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları.....	58
Şekil 4.11 Tamtest yandan yükleme kuvvet-deformasyon grafiği.....	60
Şekil 4.12 Yandan yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri	60
Şekil 4.13 TAMTEST arkadan yükleme test sonucu.....	62
Şekil 4.14 Simülasyon 1 sınır koşulları.....	63
Şekil 4.15 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	64
Şekil 4.16 Reaksiyon kuvvetleri	65
Şekil 4.17 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	65
Şekil 4.18 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	67
Şekil 4.19 Simülasyon 3 sınır koşulları.....	68
Şekil 4.20 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	69
Şekil 4.21 Reaksiyon kuvvetleri	70
Şekil 4.22 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	71
Şekil 4.23 Arka süspansiyon deformasyonu	71
Şekil 4.24 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	73
Şekil 4.25 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi.....	73
Şekil 4.26 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	75
Şekil 4.27 Malzeme 1 ve malzeme 2 gerinme-gerilme grafikleri.....	76
Şekil 4.28 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi.....	76
Şekil 4.29 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	78
Şekil 4.30 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	78
Şekil 4.31 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 3 gerinme-gerilme grafikleri	79
Şekil 4.32 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	81
Şekil 4.33 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	82
Şekil 4.34 Malzeme 3 ve malzeme 4 gerinme-gerilme grafikleri.....	83
Şekil 4.35 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	84
Şekil 4.36 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	85
Şekil 4.37 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 5 gerinme-gerilme grafikleri	86
Şekil 4.38 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	87
Şekil 4.39 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi.....	88
Şekil 4.40 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 6 gerinme-gerilme grafikleri	89
Şekil 4.41 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	90
Şekil 4.42 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi.....	91
Şekil 4.43 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 6 gerinme-gerilme grafikleri	92
Şekil 4.44 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	93
Şekil 4.45 Simülasyon 12 sınır koşulları.....	94
Şekil 4.46 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	95
Şekil 4.47 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	96
Şekil 4.48 Simülasyon 13 sınır koşulları.....	97

Şekil 4.49 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	98
Şekil 4.50 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	99
Şekil 4.51 Simülasyon 14 sınır koşulları.....	100
Şekil 4.52 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	101
Şekil 4.53 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	102
Şekil 4.54 Gap elemanı özellikleri	103
Şekil 4.55 Simülasyon 15 sınır koşulları.....	104
Şekil 4.56 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	105
Şekil 4.57 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	105
Şekil 4.58 Simülasyon 16 sınır koşulları.....	107
Şekil 4.59 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	108
Şekil 4.60 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	108
Şekil 4.61 TAMTEST yandan yükleme test sonucu	109
Şekil 4.62 Simülasyon 1 sınır koşulları.....	110
Şekil 4.63 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	111
Şekil 4.64 Reaksiyon kuvvetleri	112
Şekil 4.65 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi.....	112
Şekil 4.66 Simülasyon 2 sınır koşulları.....	113
Şekil 4.67 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	114
Şekil 4.68 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	115
Şekil 4.69 Simülasyon 3 sınır koşulları.....	116
Şekil 4.70 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	117
Şekil 4.71 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	118
Şekil 4.72 SOL400 (implicit non-linear analysis) yük senaryo sıralaması.....	120
Şekil 4.73 Simülasyon 4 arka yükleme (110 mm) yük durumu sınır koşulları	120
Şekil 4.74 Simülasyon 4 arka yükleme (110 mm) yük durumu sınır koşulları	121
Şekil 4.75 Simülasyon 4 yandan yükleme yük durumu sınır koşulları.....	121
Şekil 4.76 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği	122
Şekil 4.77 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi	123
Şekil 5.1 Kabin testi simülasyon benzetişimi	125
Şekil 5.2 Elastik bölge yüklemesi kuvvet-deformasyon grafiği	126
Şekil 5.3 Plastik bölge yüklemesi kuvvet-deformasyon grafiği.....	126
Şekil 5.4 Kabin yapısı direngenlik (stiffness) grafiği	127
Şekil 5.5 Kabin arka süspansiyon bağlantısı.....	127
Şekil 5.6 Süspansiyonlu çerçeve iskeleti arkadan yükleme test sonucu	128
Şekil 5.7 Süspansiyonsuz çerçeve iskeleti arkadan yükleme test sonucu.....	128
Şekil 5.8 Süspansiyonlu çerçeve iskeleti yandan yükleme test sonucu	129
Şekil 5.9 Süspansiyonsuz çerçeve iskeleti yandan yükleme test sonucu	129

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Sanal simülasyon yöntemlerinin potansiyel kullanım alanları (Trade and Agriculture Directorate Committee for Agriculture, 2010)	15
Çizelge 3.1 İki direkli YKKY arkadan yükleme simülasyon sonuçları.....	17
Çizelge 3.2 İki direkli YKKY önden yükleme simülasyon sonuçları.....	18
Çizelge 3.3 İki direkli YKKY yandan yükleme simülasyon sonuçları	18
Çizelge 3.4 Dört direkli YKKY arkadan yükleme simülasyon sonuçları	19
Çizelge 3.5 Dört direkli YKKY yandan yükleme simülasyon sonuçları	19
Çizelge 3.6 ST 37 Çelik malzeme özellikleri.....	41
Çizelge 3.7 Malzeme 1 mekanik özellikler.....	41
Çizelge 3.8 Malzeme 2 mekanik özellikler.....	42
Çizelge 3.9 Malzeme 3 mekanik özellikler.....	43
Çizelge 3.10 Malzeme 4 mekanik özellikler.....	44
Çizelge 3.11 Malzeme 5 mekanik özellikler.....	45
Çizelge 3.12 Malzeme 6 mekanik özellikler.....	46
Çizelge 4.1 Arkadan yükleme reaksiyon kuvvetleri	50
Çizelge 4.2 Arkadan yükleme enerji miktarı	51
Çizelge 4.3 Önden yükleme reaksiyon kuvvetleri	55
Çizelge 4.4 Önden yükleme enerji miktarı	55
Çizelge 4.5 Yandan yükleme reaksiyon kuvvetleri.....	59
Çizelge 4.6 Yandan yükleme enerji miktarı.....	59
Çizelge 4.7 TAMTEST arkadan yükleme test sonucu.....	62
Çizelge 4.8 Simülasyon 1 parametreleri	63
Çizelge 4.9 Simülasyon 1 reaksiyon kuvvetleri.....	64
Çizelge 4.10 Simülasyon 2 parametreleri	66
Çizelge 4.11 Simülasyon 2 reaksiyon kuvvetleri.....	66
Çizelge 4.12 Simülasyon 3 parametreleri	68
Çizelge 4.13 Simülasyon 3 reaksiyon kuvvetleri.....	69
Çizelge 4.14 Simülasyon 4 parametreleri	72
Çizelge 4.15 Simülasyon 4 reaksiyon kuvvetleri.....	72
Çizelge 4.16 Simülasyon 5 parametreleri	74
Çizelge 4.17 Simülasyon 5 reaksiyon kuvvetleri.....	74
Çizelge 4.18 Simülasyon 6 parametreleri	77
Çizelge 4.19 Simülasyon 6 reaksiyon kuvvetleri.....	77
Çizelge 4.20 Simülasyon 7 parametreleri	79
Çizelge 4.21 Simülasyon 7 reaksiyon kuvvetleri.....	80
Çizelge 4.22 Simülasyon 8 parametreleri	82
Çizelge 4.23 Simülasyon 8 reaksiyon kuvvetleri.....	83
Çizelge 4.24 Simülasyon 9 parametreleri	85
Çizelge 4.25 Simülasyon 9 reaksiyon kuvvetleri.....	86
Çizelge 4.26 Simülasyon 10 parametreleri	88
Çizelge 4.27 Simülasyon 10 reaksiyon kuvvetleri.....	89
Çizelge 4.28 Simülasyon 11 parametreleri	91
Çizelge 4.29 Simülasyon 11 reaksiyon kuvvetleri.....	92
Çizelge 4.30 Simülasyon 12 parametreleri	93
Çizelge 4.31 Simülasyon 12 reaksiyon kuvvetleri.....	94

Çizelge 4.32 Simülasyon 13 parametreleri	96
Çizelge 4.33 Simülasyon 13 reaksiyon kuvvetleri	98
Çizelge 4.34 Simülasyon 14 parametreleri	99
Çizelge 4.35 Simülasyon 14 reaksiyon kuvvetleri	100
Çizelge 4.36 Simülasyon 15 parametreleri	102
Çizelge 4.37 Simülasyon 15 reaksiyon kuvvetleri	104
Çizelge 4.38 Simülasyon 16 parametreleri	106
Çizelge 4.39 Simülasyon 16 reaksiyon kuvvetleri	107
Çizelge 4.40 TAMTEST yandan yükleme test sonucu	109
Çizelge 4.41 Simülasyon 1 parametreleri	110
Çizelge 4.42 Simülasyon 1 reaksiyon kuvvetleri	110
Çizelge 4.43 Simülasyon 2 parametreleri	112
Çizelge 4.44 Simülasyon 2 reaksiyon kuvvetleri	114
Çizelge 4.45 Simülasyon 3 parametreleri	115
Çizelge 4.46 Simülasyon 3 reaksiyon kuvvetleri	116
Çizelge 4.47 Simülasyon 4 parametreleri	118
Çizelge 4.48 Simülasyon 4 reaksiyon kuvvetleri	122

1. GİRİŞ

Tarım kesiminde oluşan kazaların çoğunluğu tarım traktörlerinde görülmektedir. Traktör devrilmesi bu kazalar arasında %58 ile önemli yer tutmaktadır. Amerikan ulusal istatistiklerine göre ise her 100 000 tarım işçinden 20-25'i ölümcül kazalarla karşılaşmaktadır. Traktör devrilmeleri ise ölümcül kazalar arasında %36 ile önemli yer almaktadır. Diğer bir ifadeyle, 100 000 tarım işçisinin 7-9'u tek tip kaza nedeniyle hayatını kaybetmektedir. Bu değer tek başına Amerika'daki tüm ulusal mesleki ölüm oranlarından daha büyüktür. Traktör devrilmesi sadece ölüm ya da yaralanmaya değil aynı zamanda temel makine hasarına ve zaman kaybına da sebep olmaktadır (Hard et al., 2002). Şekil 1.1'de devrilmiş traktör örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Kaza sonucu devrilmiş bir traktör (Murphy, D. and Buckmaster, D., 2003)

1.1. Traktörün Devrilme Riski

Engebeli zeminlerde ilerlemek her zaman risk barındırmaktadır. Taş, yoldan çıkma, hendek, yoldaki seviye farkı dengesizliği artırır ve devrilmeye neden olur. Devrilme esnasında traktör dengesini kaybetmekte olup, bu durum akslar arası mesafe ve iz genişlikleri ile ilgilidir. Tekerlekler arası mesafe (iz genişliği) ne kadar fazla ise devrilme o kadar zor olacaktır. Bu varsayımla dar iz genişliğine sahip traktörler daha yüksek devrilme riski taşımaktadır. Ancak, traktör devrilmeleri daha çok sürücü hata ve dikkatsizliğinden kaynaklanmaktadır (<http://safer-omur.net>).

Şekil 1.2’de devrilme örnekleri gösterilmiştir. En yaygın devrilme tipleri şu şekildedir (<http://safer-omur.net>) :

- %85 yana devrilme (Yuvarlanma)
- %14 arkaya devrilme (Şahlanma)
- % 1 den az öne devrilme



Şekil 1.2 Traktör devrilme tipleri (<http://safer-omur.net>)

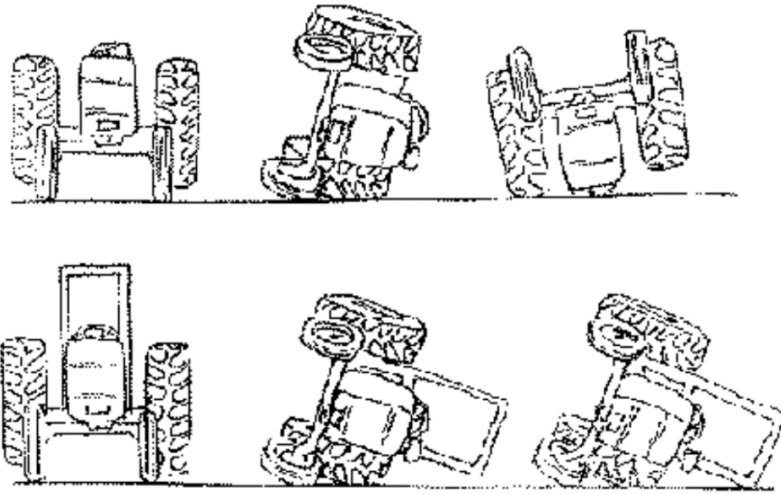
1.2. Traktör Koruyucu Yapıları

Özellikle Yuvarlanmaya Karşı Koruyucu Yapıların-(YKKY) emniyet kemeri ile birlikte kullanımı kazalarda ölümlerin önlenmesinde bilinen en iyi yöntemdir. Yaygın olarak kullanılan 3 tip yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı mevcuttur ve Şekil 1.3'te gösterilmiştir: İki-direkli yapı (two-post ROPS), dört-direkli yapı (four-post ROPS) ve dört-direkli kapalı yapı (four-post with an enclosed cab).



Şekil 1.3 Traktör YKKY tipleri (<http://iloencyclopaedia.org/component/k2/94-58-safety-applications/rollover>)

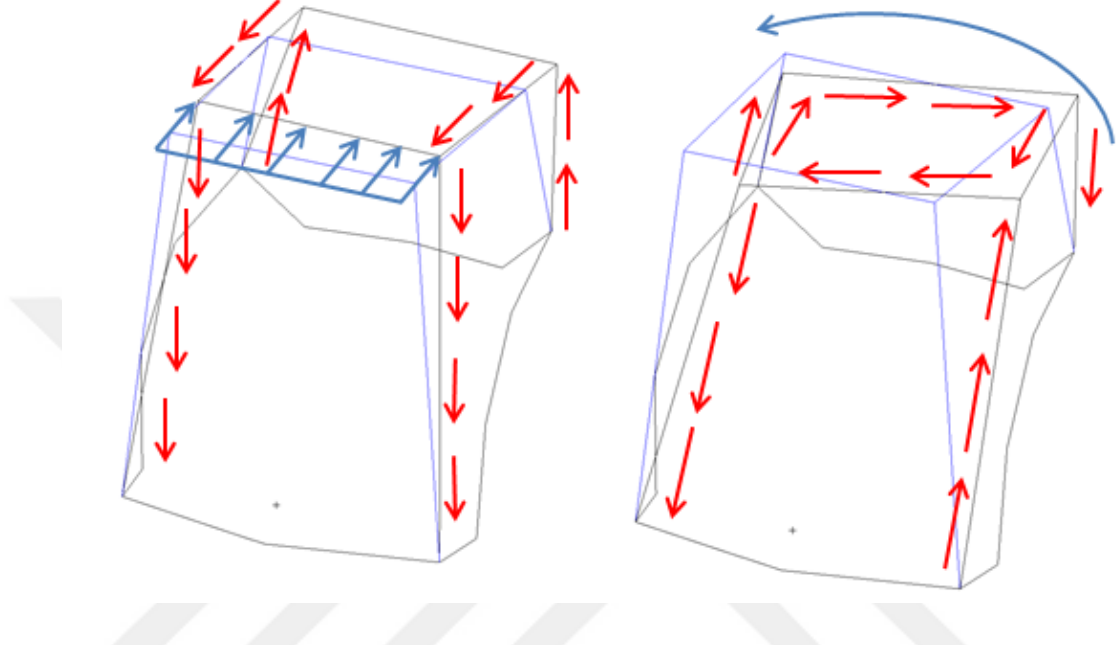
Koruyucu yapılar ilk olarak 1950'li yıllarda İsveç'te geliştirilmiştir. Ulusal standartlarda ilk kabulü İskandinav ülkelerinde olurken daha sonrasında OECD kodları, EEC/EC yönetmelikleri ve ISO standartları olarak uluslararası düzeyde yerini almıştır. Standart ve yönetmeliklerin uygulanmaya başlamasıyla traktör tasarımları değişmiş, yeni düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler kabinlerde olduğu gibi konforlu ve pahalı çözümlerin yanı sıra, emniyet çerçevesi gibi bazı basit ve ucuz uygulamalar şeklinde de görülmüştür (Stellman and J. Mager, 1998). Koruyucu çerçevenin devrilmedeki önleyici etkisi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Traktör koruyucu çerçevenin devrilmedeki önleyici etkisi (Anonymous, 1995)

Koruyucu çerçevelerde yapısal elamanların 2 temel görevi vardır (Şekil 1.5):

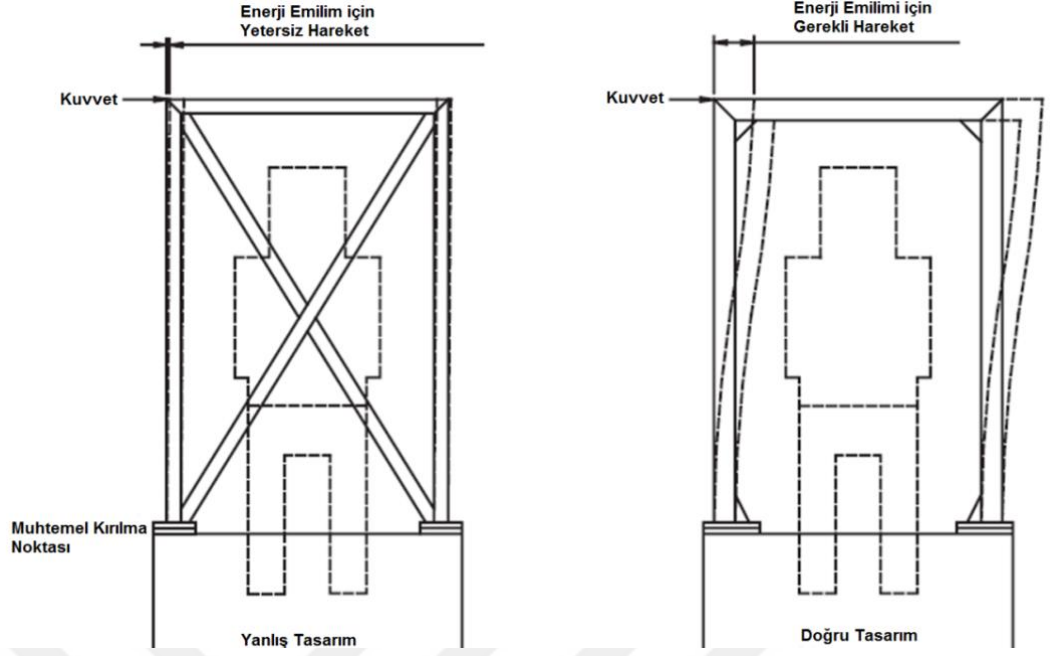
1. Yapıya etkiyen kuvvetleri taşımak ve iletmek
2. Uygulanan eğme momentlerini ve eksenel kuvvetleri, boylamsal kirişlerle birlikte dengelemek



Şekil 1.5 Koruyucu kabin yapısal elemanların görevleri (Mavi oklar: Uygulanan kuvvetler, Kırmızı oklar: Reaksiyon kuvvetleri)

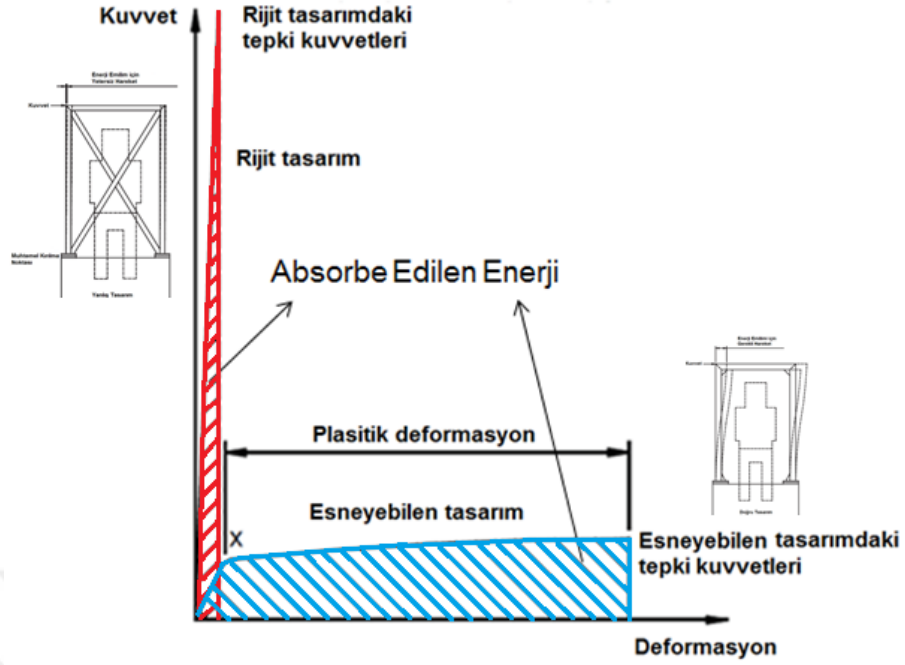
1.3. Koruyucu Yapı Enerji Absorbe Yeteneği

Yuvarlanmaya karşı koruyucu yapılarda en önemli konu, yapının maruz kaldığı yükler altında sürücü bölgesine girmeden ve maruz kaldığı yüklere dayanacak şekilde yapısal tasarımın gerçekleştirilmesidir. Bu koşul devrilme sırasında yapının maruz kalacağı kinetik enerjiyi en iyi şekilde absorbe edebilen yapısal tasarımla gerçekleştirilebilir. Bu nedenle yapılabilecek en büyük tasarım yanlışı “en güçlü yapı en iyi yapıdır” yaklaşımıdır. Diyagonal çapraz destekler veya paneller kullanmak yapının mukavemetini önemli ölçüde artırıyor olsa da yapının yüklemeye altında deformasyon yeteneğini ortadan kaldırması açısından yapı üzerinde aşırı büyüklükte tepki kuvvetleri oluşmasına neden olmaktadır. (Anonymous, 2014) (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Koruyucu yapı enerji emme yeteneği (Anonymous, 2014)

Şekil 1.7’de deforme olabilen esneyebilen tasarım ile rijit yanlış tasarımın bağlantı noktasında oluşan deformasyon-yük karşılaştırması yapılmıştır. Buna göre esneyebilen tasarımda maksimum momentin olduğu bağlantı noktalarındaki kuvvetler malzemenin elastik limitine ulaştıktan sonra plastik deformasyona girerek bütün enerjii absorbe edebilecek kadar deforme olmaktadır. Deforme olarak esneyebilen tasarım, elastik limit noktasında (x noktasında) plastisite limitine ulaştığı halde yapısal olarak halen sağlam kalmakta ve kademeli olarak artan tepki kuvvetlerine deforme olarak karşı koyabilmektedir. Buna rağmen, rijit yapı elastik limit noktasında yüksek deformasyon yeteneğine sahip olmadığı için yükleme altında enerjii absorbe edebilmek adına yüksek tepki kuvvetlerine maruz kalmaktadır (Şekil 1.7) (Anonymous, 2014).

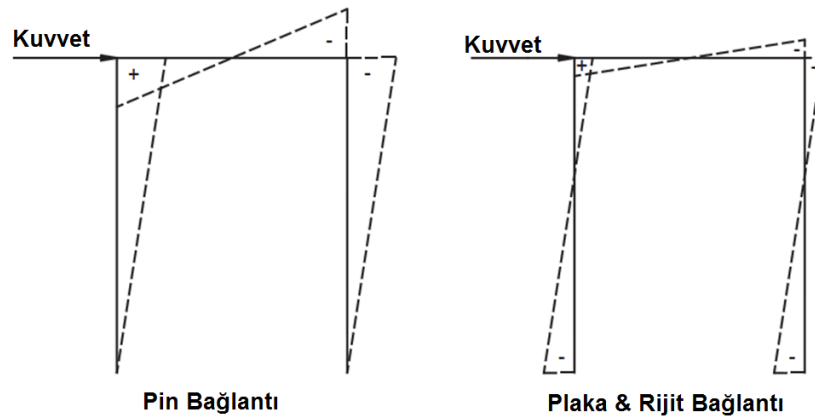


Şekil 1.7 Koruyucu kabin enerji grafiği (Anonymous, 2014)

1.4. Kabin - Şase Bağlantı Konseptleri

1.4.1 Pim bağlantı

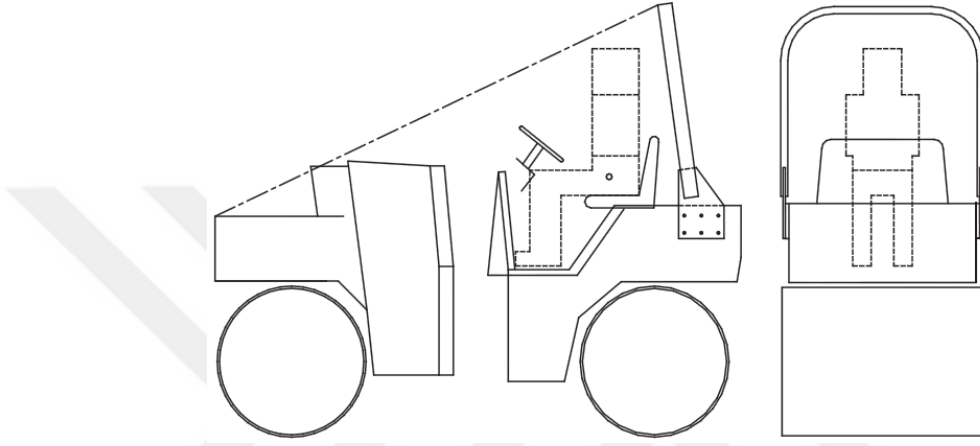
Bu bağlantı yapının mekanizma şeklinde hareket etmesini engellemek için sadece dört-direkli YKKY kullanılabilir. Esnek tasarım sayesinde bağlantı noktalarına moment oluşmadığı için çok küçük tepki kuvvetleri şaseye aktarılır. Yapıya az tepki kuvvetleri aktarıldığı için yapının üst köşelerinde yüksek bükme kuvvetleri oluşur. Bu nedenle güçlü kabin tasarımı ihtiyacı ortaya çıkar (Şekil 1.8) (Anonymous, 2014).



Şekil 1.8 Koruyucu yapı şase bağlantı tipleri (Anonymous, 2014)

1.4.2 Plaka bağlantı

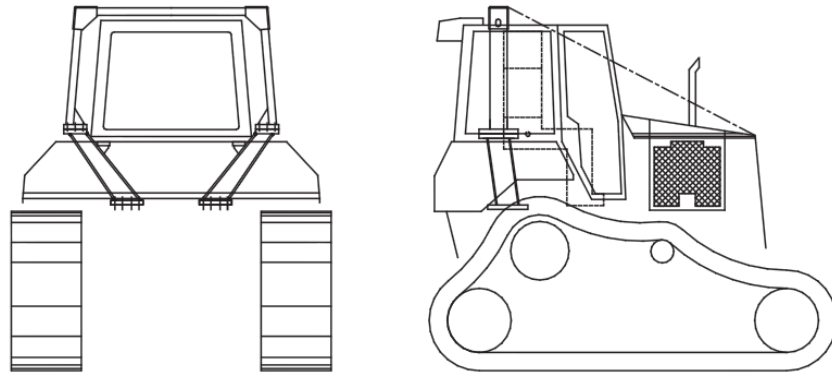
YKKY düzleminde yerleştirilen plaka bağlantı konseptli tasarım, rijit bağlantı tasarım konseptine göre daha küçük miktarda tepki kuvvetlerini yapıya iletir (Şekil 1.9). Yapıya iletilecek olan moment, yapı üzerinde izin verilen tepki kuvvetlerine göre plakanın istenilen düzeyde plastik menteşe gibi biçimlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, yapıya aktarılması planlanan tepki kuvvetlerinin miktarına göre tasarım gerçekleştirilmelidir. Hem iki direkli hem de dört direkli kabinlerde kullanılabilir.



Şekil 1.9 Koruyucu kabin şase plaka bağlantısı (Anonymous, 2014)

1.4.3 Rijit bağlantı

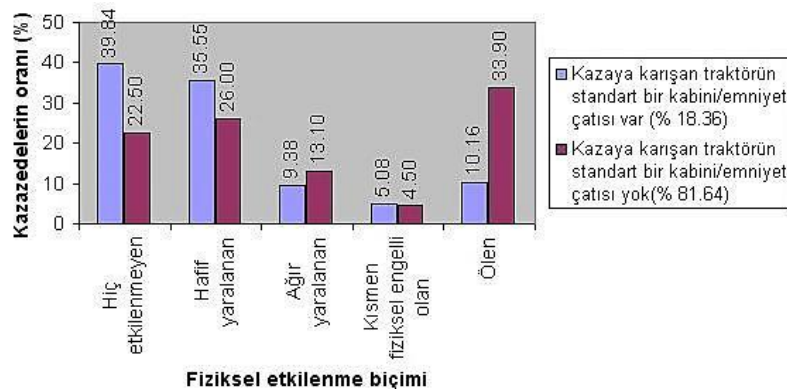
Bu tip bağlantı konsepti yapı üzerine en yüksek tepki kuvvetlerini ileten tasarım konseptidir (Şekil 1.10). Bu bağlantı, şase bağlantı noktalarındaki yapının yüksek tepki kuvvetlerine dayanabilecek mukavemette olması durumunda yararlıdır. Yapının üst köşelerinde daha düşük seviyede momentler oluşacağı için daha hafif tasarıma olanak sağlayabilmektedir.



Şekil 1.10 Koruyucu kabin şase rijit bağlantısı (Anonymous, 2014)

2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER

Son yıllarda tarımsal mekanizasyondaki gelişme kendini en hızlı olarak traktör üretiminde göstermiştir. 1960’larda 40.000 civarında olan traktör parkımız bugünlerde 1.600.000 civarına yükselmiştir (TÜİK 2019). 2000’li yıllardan itibaren “Avrupa Tip Onay” prosedürlerine uyma zorunluluğumuz traktörleri geçmişe göre daha güvenli hale getirmiştir. Ne var ki kazalar tarım kesiminde halen devam etmekte ve çoğunluğu da tarım traktörlerinde görülmektedir. Traktör devrilmesi bu kazalar arasında %58 ile önemli yer tutmaktadır (Peker ve Özkan 1994, Onurbaş 1996). Türkiye’de 1990-2001 yıllarını kapsayan bir araştırma sonucuna göre devrilme, takla atma, şarmpole yuvarlanma şeklinde gerçekleşen 746 traktör kazasında, traktörlerin %81,64’ünün standart bir kabini veya emniyet çatısının olmadığı, sadece %18,36’sında böyle bir yapının olduğu belirlenmiştir. Koruyucu yapı bulunan traktörlerde ölüm oranı %10,16 iken koruyucu yapı bulunmayanlarda bu oran %33,90’a çıkmıştır (Şekil 2.1) (Gölbaşı, 2002). Amerikan ulusal istatistiklerine göre ise her 100.000 tarım işçisinden 20-25’i ölümcül kazalarla karşılaşmaktadır. Traktör devrilmeleri ise ölümcül kazalar arasında %36 ile önemli yeri almaktadır. Diğer bir deyişle, 100.000 tarım işçisinin 7-9’u tek tip kazadan yani traktör devrilmesinden ölmektedir. Bu değer tek başına Amerika’daki tüm ulusal mesleki ölüm oranlarından daha büyüktür. Traktör devrilmeleri sadece ölüm ya da yaralanmaya değil aynı zamanda temel makina hasarına ve zaman kaybına da sebep olmaktadır (Murphy and Sommer, 2004). Özellikle Yuvarlanmaya Karşı Koruyucu Yapıların (YKKY) emniyet kemeri ile birlikte kullanımı kazalarda ölümlerin önlenmesinde bilinen en iyi yöntemdir.



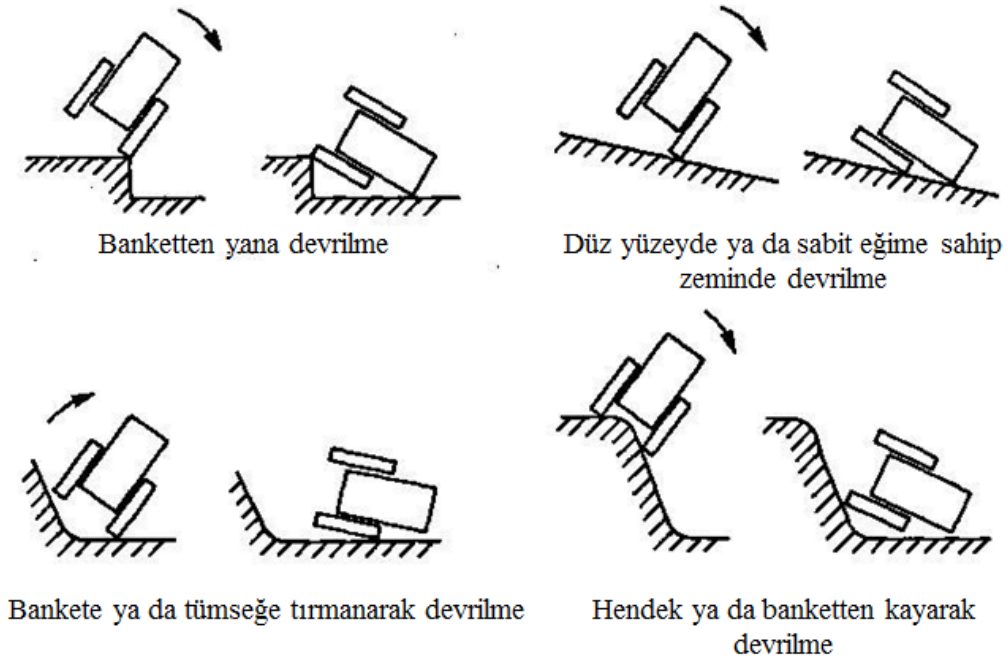
Şekil 2.1 1990-2001 yılları arasında Türkiye’de gerçekleşen traktör devrilme kazaları (Gölbaşı, 2002).

Traktörün kullanım koşulları ve asli görevi olan tarla tarımı dikkate alındığında öncelikle, tarlada çalışırken ulaşacağı maksimum hız koşulları dikkate alınmalı, tarla yolu ve karayolunda ulaşabileceği hızlar ayrıca değerlendirilmelidir. Traktörler zaman içerisinde daha stabil, sürücüler daha eğitilmiş hale gelseler de yapılan kontrolsüz bir hareket nedeniyle devrilme olabilmektedir. Örneğin; toprak işlemede, silaj hazırlarken, tarla yolunda, bankette hatta düz yolda devrilebilirler (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Düz yüzeyde devrilme

Yana devrilme traktörlerde daha çok görülen ve koruyucu yapı olmasına rağmen ölümler veya ciddi yaralanmalarla sonuçlanma riski olan kaza çeşididir. Devrilme biçimi ve zemin profili dikkate alındığında yana devrilme nedenleri Şekil 2.3'teki gibi sayılabilir.

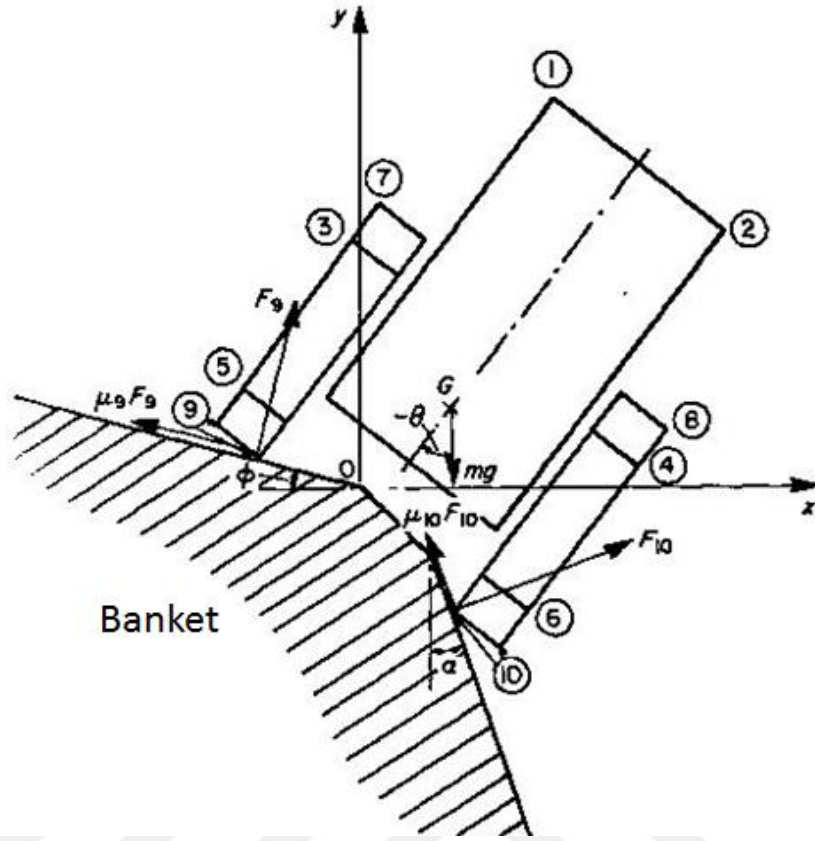


Şekil 2.3 Yana devrilme nedenleri (Chisholm, 1979a)

Chisholm 1979a “Experimental validation of a tractor overturning simulation” isimli çalışmasında matematik model ve bilgisayar simülasyonundan elde ettiği sonuçların güvenilirliğini sağlamak amacıyla, farklı deney şartlarında 30 adet gerçek devrilme testi uygulamıştır. Simülasyon ve gerçek devrilme deneylerini karşılaştırabilmek için, simülasyondaki banketin benzerini oluşturmuş ve traktör kabinini gerekli dataların toplanmasına uygun sensörlerle donatmıştır. Devrilme rampasını 0-37,5 derece arası ayarlanabilir şekilde 5 kademeli olarak seçmiştir. Devrilme sonucu çarpma ile oluşan deformasyon değerlerini yer değiştirme sensörleri ile kuvvet değerlerini ise gerinim ölçer (strain gauge) ile ölçmüştür. Devrilme hareketi 100 m boyunca arkadan ve yandan eşzamanlı olarak iki kamera ile kaydedilmiştir. Devrilmenin başından sonuna kadar ve çarpma süresince etkili olan faktörler bu çalışmada etraflıca anlatılmıştır. Simülasyona göre hata faktörleri yorumlanmıştır. Deneye ve simülasyona dayalı testler istatistiki olarak incelenmiş; devrilme açısı, devrilme hızı, yanal hız, düşey hız ve ROPS üzerinde oluşan enerji değerleri hem grafik üzerinden hem de tablo üzerinden yorumlanmıştır. Sonuç olarak test ve simülasyon sonuçları arasındaki varyasyon katsayısı devrilme açısında %10, ROPS enerjisinde %37 olarak bulunmuştur.

Chisholm (1979b) “The effect of parameter variation on tractor overturning and impact behaviour” başlıklı çalışmasında gerçek testlerle simülasyonu doğruladıktan sonra, devrilmeye ve çarpmaya etkili parametrelerin derecesini yorumlamıştır. Çalışmada, devrilmeye etkili parametreler çarpma hızı ve atalet momenti, devrilme açısı, tekerlek çapı, ROPS yüksekliği ve genişliği, banket yüksekliği, tekerlek iz genişliği gibi pek çok faktörü devrilme sırasında oluşan enerji değerleri ile açıklamıştır.

Araştırmacı, yayınında, modellemeye ilişkin eşitlikleri ve bilgisayar programı için algoritmayı da vermiştir. İki boyutlu matematik model kullanarak devrilmenin dinamik davranışını tanımlamıştır. Modelleme traktörün bankette ileri hareket ederken yana devrilmede gerçekleşen 10 temas noktasına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4’te modelleme esas 10 nokta için kuvvet ve koordinatları gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Modellemeye esas traktör temas noktaları (Chisholm,1979b)

Schwangart (1982) “Umsturzverhalten von Traktoren und Auswirkungen auf die Schutzvorrichtungen und die Sicherheit” isimli kitabında traktör stabilitesi ve devrilmesine ilişkin temel bir kaynak oluşturmuştur. Mevcut standartların temeli olan kaynak, o güne değin gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarını da vermektedir. Bu kitap, traktörlerde devrilme metodolojisinin oluşturulmasında temel kaynaktır.

Fabbri and Ward (2002) “Validation of a finite element program for design of Roll-Over Protective Framed Structures (ROPS) for Agricultural Tractors” isimli çalışmada yuvarlanmaya karşı koruyucu yapıların tasarım ve test faaliyetlerinin, tarımsal traktör üreticileri için maliyet ve zaman kaybına sebep olduğuna ve üreticilerin ticari sonlu elemanlar paket programlarını kullanırken deneyim zorluğu çektiğine değinmişlerdir. Bu amaçla OECD kodlarına göre test edildiği zaman, ROPS’ların davranışını simule edebilecek bir sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir.

Program analitik modeller ve ticari sonlu elemanlar programları ve ROPS testlerinden alınan datalarla geçerli kılınmıştır. Model tahmini traktör kabininin gerçek testindeki kuvvet-deformasyon değerlerinin % 20'si içinde bulunmuştur. Simülasyonun doğru sonuç verebilmesinin ROPS geometrisinin, malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının gerçeğe yakın tanımlanması ile doğrudan ilgili olduğuna değinmişlerdir.

Silleli ve arkadaşları 2007 ve 2008 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarda, dar izli bahçe traktörlerinde kullanılabilecek, traktörün devrilme anında yanlara doğru hava yastığı (airbag) mantığıyla açılabilen bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Araştırmalarında, traktörleri bankete tırmandırarak devirmişler, sonuçları simülasyonlarla karşılaştırmışlardır. Açılma mekanizmasının tasarımında ANSYS FEM metodundan yararlanmışlar, yapıya OECD Code 6'ya göre statik yükleme testi uygulamışlardır.

Tarım veya orman traktörlerine takılan koruyucu yapıların statik yükleme testleri OECD tarafından standartlaştırılmış olup, Kod: 4 adı altında yayınlanmıştır. Ayrıca Avrupa Birliği ülkelerinde bir koruyucu yapının tip onayı alabilmesi için, koruyucu yapıya uygulanan statik testleri tanımlayan ve OECD Kod: 4 statik test yöntemlerini esas alan bir direktif kullanılmakta olup, bu direktif ülkemizde T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından 2003/37/AT Tip Onayı Yönetmeliği (Anonim, 2014) olarak yayınlanmıştır.

Standart traktörlere takılan koruyucu yapıların statik yükleme testleri, en az iki aksa sahip, havalı lastik tekerlekli, arka lastiklerin minimum iz genişliği 1150 mm'den fazla, askı ve çeki elemanları ile koruyucu yapının takılı olduğu, yakıt deposu, soğutma suyu, yağlama yağları tam dolu kapasitede, arka ve ön ağırlıkları sökülmüş olarak sürücüsüz kütlesi 600 kg'dan az, 3000 kg'dan fazla olmayan traktörlere uygulanır (Anonim, 2012).

Statik yükleme testlerin amacı olası bir devrilme durumunda, koruyucu yapının üzerinde oluşabilecek gerilmelere karşı yapının dayanımını belirlemektir. Statik test için hazırlanmış bir koruyucu yapı, mutlaka seri imalat şartlarına uygun olmalıdır.

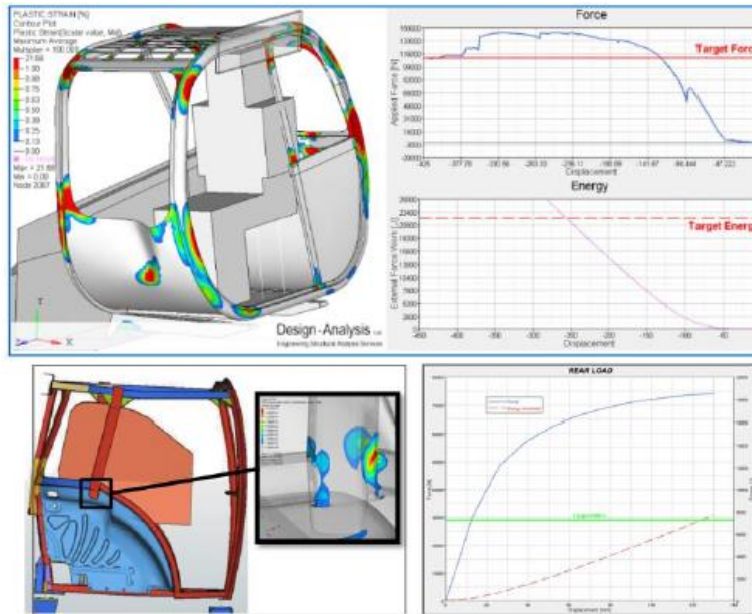
Tasarlanmış olduğu traktörün üzerine imalatçının tarif ettiği yöntemle göre takılmalıdır. Testler için koruyucu yapı takılı traktör komple getirilebileceği gibi koruyucu yapının bağlanacağı traktör parçalarının yer aldığı, çalışır bir donanımı temsil eden bir blok da testlere alınabilir.

Tarım traktörleri yapıları ve çalışma ortamları nedeniyle devrilmeye eğilimli makinalardır. Devrilme olayı çoğu zaman traktör operatörünün beklemediği koşullarda oluşur ve genellikle ciddi yaralanmalarla ya da ölümlerle sonuçlanır. Bu duruma 1950'li yıllardan itibaren çözüm bulabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmış, operatör güvenli bir bölgeye almaya çalışılmış, devrilme anında uyarıcı sinyaller geliştirilmiş, ancak yine de tam bir sonuç elde edilememiştir. En etkin sonucun ise bir koruyucu çerçeve ya da kabin ile sağlanabildiği görülmüştür. Bu tarihten sonra ise koruyucu yapıların insan güvenliği için olması gereken tasarım, imalat ve kullanım parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Özellikle 1970'li yılların başından 1980'li yılların ortalarına kadar gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar, bu yapıların test standartlarının geliştirilmesinde önemli olmuştur. Elde edilen bilimsel verilere göre, OECD, ISO, ASAE ve EC normlarına göre standartlar geliştirilmiştir. OECD Code 3,4,6,7,8, ISO 12003-1,2, ISO 5700 SAE J2194, 87/402/EC, 79/622/EC, 2000/42 vb. standartlar bunlardan bazılarıdır. O tarihten bu yana bahsedilen standartlar başarıyla kullanılmış olsalar da son yıllarda simülasyon tekniklerindeki gelişmeler ve daha hızlı çözüm bulabilme arayışları, traktör güvenlik çerçevelerinin testlerinde sanal testlerin uygulanma ihtiyacını doğurmuş ve OECD, ISO ve EC gibi standart geliştiren ve bunlar uygulayan uluslararası kuruluşlar sanal (virtual) testlerin uygulanabilirliğini gündemlerine almışlardır. Ülkemizde de bu kuruluşların standartlarını uygulayan, geliştirmesinde görev alan ve taraf olan TSE, TAMTEST gibi kuruluşların bu konularda bilgi birikimi oluşturma ve elde ettiği sonuçları OECD, ISO ve EC'nin mutlak toplantılarında ve çalışma gruplarında paylaşılması zorunluluğu oluşmuştur (Anonymous, 2018).

Özellikle son yıllarda otomobil, minibüs ve otobüslerde sanal testler kullanılmaya başlanmıştır. Gerçek testler ile geçerli kılınan yöntemler sonucunda kabul gören simülasyon teknikleri regülasyonlar ile kontrol edilmektedir. Test, karşılaştırma, geçerli kılma, onay vb. süreçleri içeren mevcut yapının traktörlere de uygulanması bugün bir

zorunluluk haline gelmiştir. Ancak uygulanacak simülasyonların uygunluğu, kullanılabilirliği, doğruluğu ve geçerli kılınması ülkemizin bu konudaki uzman üniversiteleri ve kurumları tarafından yapılarak uygulanmak durumundadır.

Sanal Testler (Virtual Tests) (Şekil 2.5), herhangi bir aracın, bir sistemin veya bir komponentin, fiziksel testlere gerek kalmadan; bilgisayar simülasyonları ve hesaplamalar ile aracın, sistemin veya komponentin teknik yeterlilik ve gereksinimlerini yerine getirdiğini gösteren testlerdir. Sanal testler sonucunda elde edilen verilerin fiziksel testler kadar anlamlı olduğunu garanti altına almak için, OECD komisyonunun sanal testlerin gereksinimlerini ve hangi şartlar altında sanal simülasyonların uygulanabileceğini belirleyecek yetkililer görevlendirmesi gündemdedir. Bu spesifik konu hakkında metodlar ve gereksinimler geliştirilmesi, koruyucu kabin performansı, koruyucu kabin mukavemet davranışı, kabin dizaynı, malzeme konuları hakkında derin bilgi birikimi gerektirmektedir. Bu nedenle tüm test kuruluşları tarafından kolay kullanılabilir, tekrarlanabilir ve güvenilir yöntemler geliştirilerek; muhtemel kullanıcı hatalarının önüne geçilmesine ve tüm dünyada karşılaştırılabilir testler yapılmasına çalışılacaktır (Anonymous, 2015b). Örnek sanal test sonucu ve deformasyon-yük grafikleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Sanal (virtual) test ve deformasyon-yük grafikleri (Anonymous, 2015a)

Koruyucu kabin testleri sürecinde sanal testlerin potansiyel kullanım alanları(Çizelge 2.1):

- Onaylanmış koruyucu kabinlerin önceden yapılmış mukavemet testlerinin sonuçlarını etkileyen küçük tasarım değişikliklerin doğrulama testlerine ek yaklaşım olarak
- Koruyucu kabin üreticisi firmanın, farklı kabin-şase bağlantı konseptini test edebilmek için en kötü yükleme senaryosunun belirlenmesi sürecine destek olarak

Çizelge 2.1 Sanal simülasyon yöntemlerinin potansiyel kullanım alanları (Trade and Agriculture Directorate Committee for Agriculture, 2010)

Koruyucu Kabindeki Değişiklik	Spesifik Değişiklik	Simülasyon ile Validasyon
Geometri Değişiklik	Bütünüyle yeni konsept veya tip	Hayır
	Büyük değişiklikler – Kritik parçaların çıkarılması, Bütün parçaların kalınlık değişikliği vb.	Muhtemel
	Küçük değişiklikler – Ek parça değişikliği, lokal kalınlık değişikliği, Yeni lokal delik açılması vb.	Evet
Malzeme Değişikliği	Malzeme özelliği iyileştirmesi	Evet
	Malzeme özelliğinde düşüş – akma ve/veya kopma dayanımında % 10 dan az düşme	Evet
	Malzeme özelliğinde düşüş – akma ve/veya kopma dayanımında % 10 dan fazla düşme	Muhtemel
Yükleme Değişikliği	Toplam Araç Ağırlığında 10 % dan az artma	Evet
	Toplam Araç Ağırlığında 10 % dan çok artma	Muhtemel

Traktör güvenlik çerçevelerinin genellikle teste götürülmeden önce simülasyon ve/veya gerçek testleri yapılmaktadır. Simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir güvenliğe olduğuna kanaat getirdikten sonra onay için test merkezlerine gönderilmektedir. Ülkemizde pek çok firma artık bu konuda yeterli tecrübeye erişmiş durumdadır. Bu durum sanal testlerin yakın gelecekte daha başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Sanal testlerin kullanılabilirliğinin bilimsel verilerle ve uygulamalı denemeler sonucunda ispat edilmesi durumunda firmaların test maliyetlerinde azalmalar olurken, daha hızlı ve çok sayıda denemenin yapılabilmesi hatta sanal devrilme simülasyonları aşamasına geçerek farklı senaryolarda deneme olanağı da verecektir.

Bu çalışmada, gerçek test sonuçları ile uyumlu sanal simülasyon test metodu ortaya koyulması hedeflenmektedir. Sanal simülasyon metotlarının geçerlilikleri, teknik içeriklerinin ne kadar iyi tanımlandığı ve doğrulama tekniklerinin ne kadar gerçek test sonuçları ile uyumlu olduğuyla yakından ilintilidir. Farklı modelleme yaklaşımları ve farklı çözüm yaklaşımlarından kaynaklanan simülasyon sonuçlarında ortaya çıkan hataları azaltmak ya da yok etmek açısından, sanal simülasyon metotlarının standart yöntemler ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan gerçek fiziksel testleri gerçekleştirilmiş 2 adet koruyucu kabin için birçok farklı parametrelere sahip sanal simülasyon gerçekleştirilerek; gerçek test sonuçları ile sanal simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, parametrelerin sanal simülasyon sonuçları üzerine olan etkileri ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Traktör kabin yapıları bilgisayar ortamında modellenerek birçok sonlu elemanlar analiz denemesi gerçekleştirilmiştir. Her denemede analiz sonuçlarını etkileyecek olan parametreler (malzeme, sınır koşulu, analiz yöntemi vb.) değiştirilerek, analiz parametrelerinin analiz sonuçlarına etkisi belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analiz denemelerinin amacı, gerçekleştirilmiş olan fiziksel test sonuçları ile tutarlı olacak parametrelerin belirlenmesi ve simülasyon yaklaşımı geliştirilmesidir.

3.1. Materyal

Devrilme testleri tamamlanmış ve seri imalatı gerçekleştirilen ERKUNT Traktör firmasına ait 2 adet yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı için sanal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir:

1. İki direkli katlanabilir yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı (58e-ROPS)
2. Dört direkli yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı (557-ROPS)

İki direkli katlanabilir yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları arkadan yükleme, önden yükleme ve yandan yükleme senaryoları için sırasıyla Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 İki direkli YKKY arkadan yükleme simülasyon sonuçları

	Son Adımdaki Reaksiyon Kuvveti (N)	Toplam Enerji Absorbesi (kJ)
TAMTEST	10430	1,92
1d Lineer Analiz	19800	3,23
1d Non-Linear (SOL106) Analiz	19800	3,23
2d Lineer Analiz	20000	3,26
2d Non-Linear (SOL106) Analiz	9640	2,20
3d Lineer Analiz	21800	3,55
3d Non-Linear Analiz (SOL106)	10100	2,34
2d Non-Linear (SOL600) Analiz	6710	1,60
3d Non-Linear (SOL600) Analiz	7680	1,79

Çizelge 3.2 İki direkli YKKY önden yükleme simülasyon sonuçları

	Son Adımdaki Reaksiyon Kuvveti (N)	Toplam Enerji Absorbesi (kJ)
TAMTEST	10500	2,41
1d Lineer Analiz	25000	5,15
1d Non-Linear (SOL106) Analiz	25000	5,15
2d Lineer Analiz	25100	5,17
2d Non-Linear (SOL106) Analiz	10600	3,18
3d Lineer Analiz	27400	5,64
3d Non-Linear Analiz (SOL106)	11100	3,37
2d Non-Linear (SOL600) Analiz	6645	2,13
3d Non-Linear (SOL600) Analiz	12800	3,70

Çizelge 3.3 İki direkli YKKY yandan yükleme simülasyon sonuçları

	Son Adımdaki Reaksiyon Kuvveti (N)	Toplam Enerji Absorbesi (kJ)
TAMTEST	18460	6,06
1d Lineer Analiz	43800	9,54
1d Non-Linear (SOL106) Analiz	43800	9,54
2d Lineer Analiz	85900	18,72
2d Non-Linear (SOL106) Analiz	39100	13,11
3d Lineer Analiz	97300	21,20
3d Non-Linear Analiz (SOL106)	-423	0,02
2d Non-Linear (SOL600) Analiz	18918	6,58
3d Non-Linear (SOL600) Analiz	17800	6,04

Dört yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları arkadan yükleme ve yandan yükleme senaryoları için sırasıyla Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Dört direkli YKKY arkadan yükleme simülasyon sonuçları

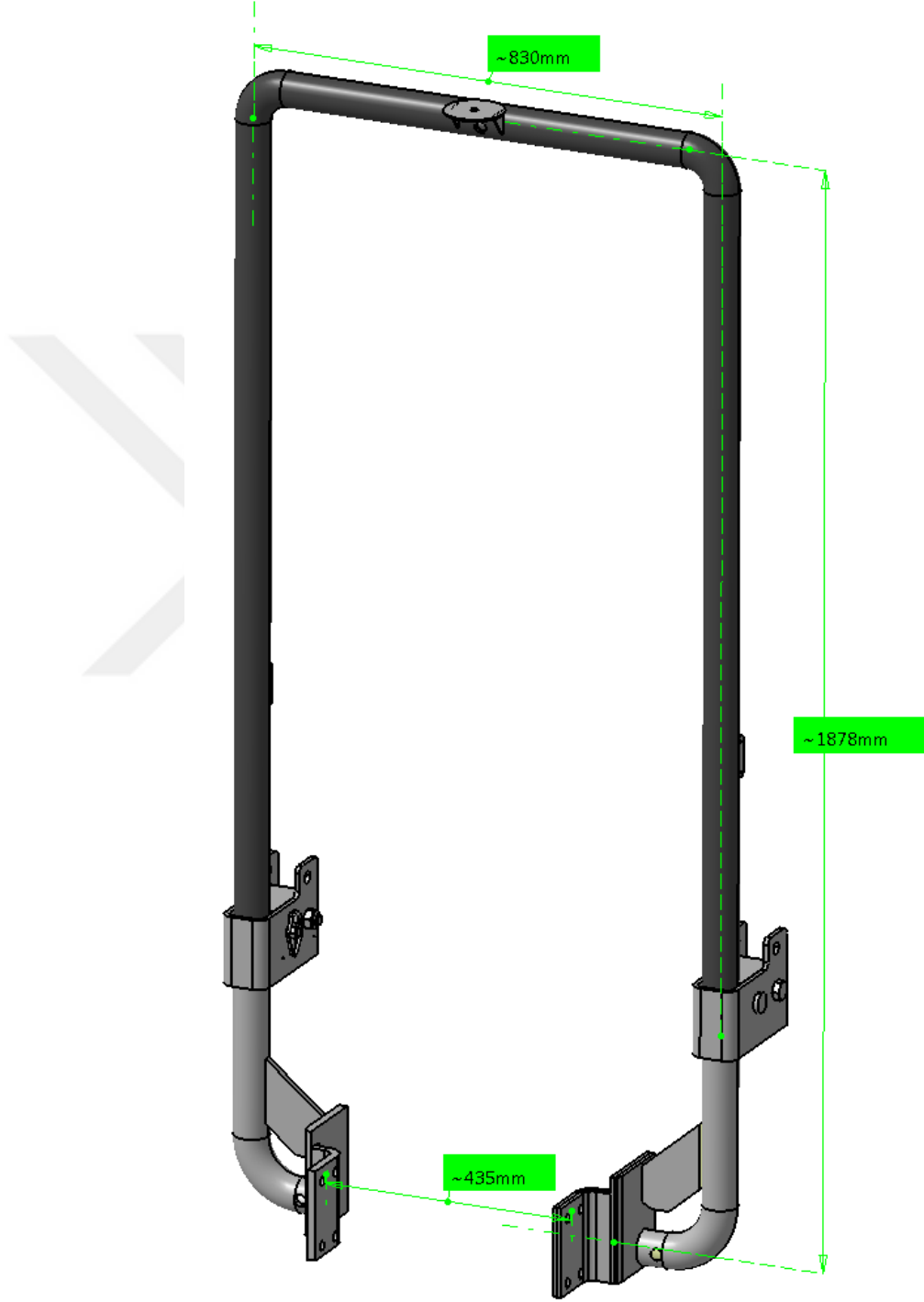
	Son Adımdaki Reaksiyon Kuvveti (N)	Toplam Enerji Absorbesi (kJ)
TAMTEST	39910	6,03
1.Simülasyon	36500	8,06
2.Simülasyon	35700	7,62
3.Simülasyon	30100	5,17
4.Simülasyon	33600	6,45
5.Simülasyon	31500	5,93
6.Simülasyon	35800	6,64
7.Simülasyon	13500	2,05
8.Simülasyon	13500	2,05
9.Simülasyon	31000	6,06
10.Simülasyon	37200	6,81
11.Simülasyon	40700	8,27
12.Simülasyon	31200	4,87
13.Simülasyon	25200	0,66
14.Simülasyon	0	0,00
15.Simülasyon	35600	5,21
16.Simülasyon	35900	5,49

Çizelge 3.5 Dört direkli YKKY yandan yükleme simülasyon sonuçları

	Son Adımdaki Reaksiyon Kuvveti (N)	Toplam Enerji Absorbesi (kJ)
TAMTEST	42890	7,37
1.Simülasyon	36500	8,48
2.Simülasyon	39700	8,79
3.Simülasyon	34800	6,53
4.Simülasyon	37100	7,57

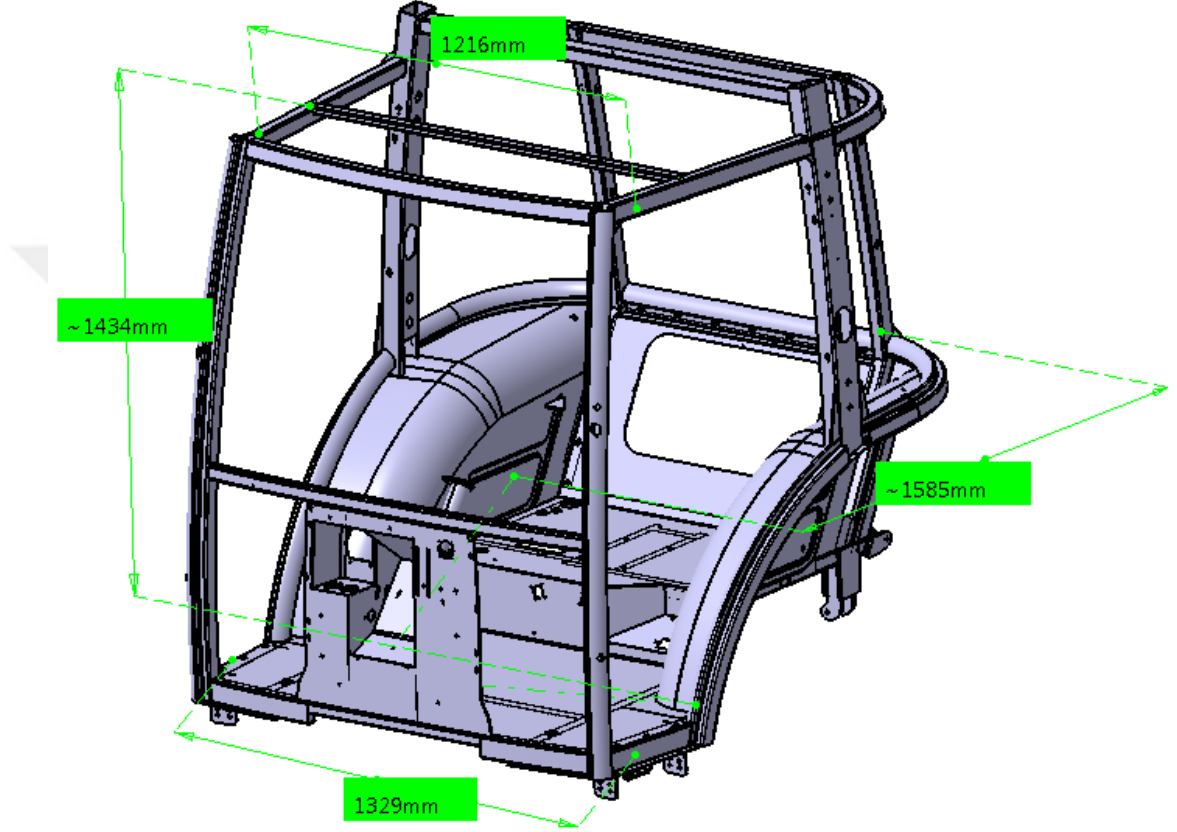
3.1.1 Erkunt Traktör yuvarlanmaya karşı koruyucu yapıları

Dar izli traktörlerde kullanılan katlanabilir 2 direkli koruyucu yapı iskeleti Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 İki direkli yuvarlanma karşı koruyucu yapı modeli

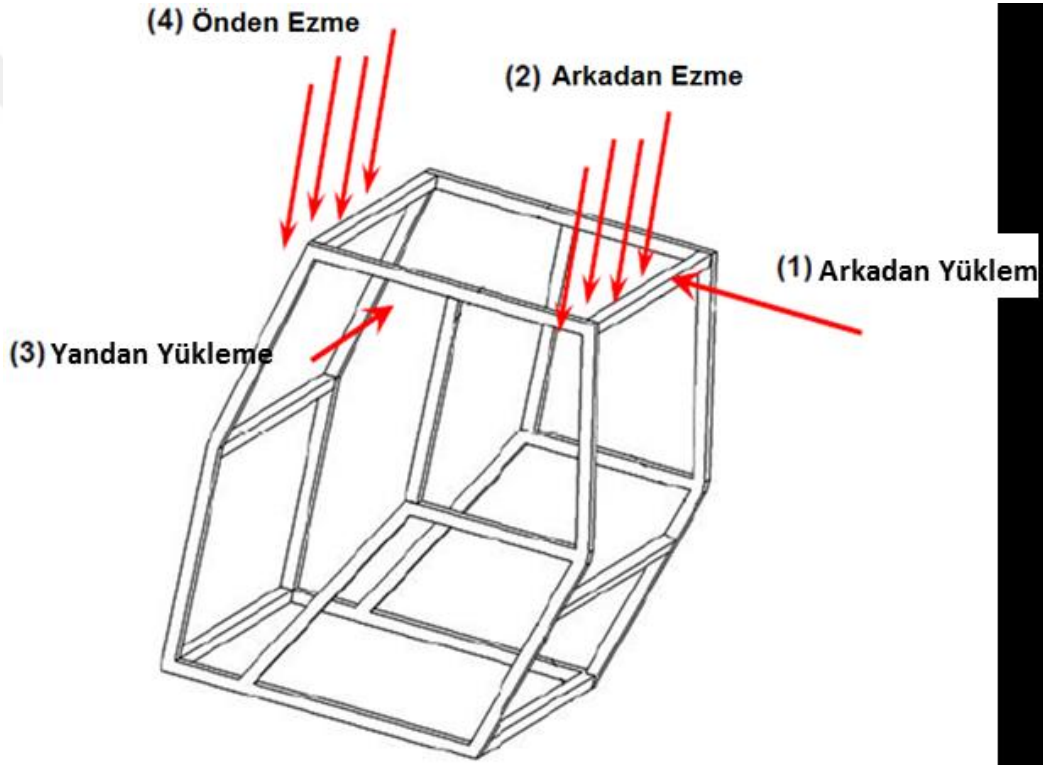
Dört direkli koruyucu yapı, çelik profiller ve büküm parçaların kaynaklı birleştirme yöntemiyle montaj edilmesiyle ortaya çıkarılmıştır. Dört direkli koruyucu çerçeve iskeletinin genel ölçüleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Sanal simülasyonları gerçekleştirilen 4 direkli koruyucu yapı traktör şasesine arkadan süspansiyon ile bağlı iken önden sabit olarak traktör şasesine bağlanmıştır.



Şekil 3.2 Dört direkli yuvarlanmaya karşı koruyucu yapı modeli

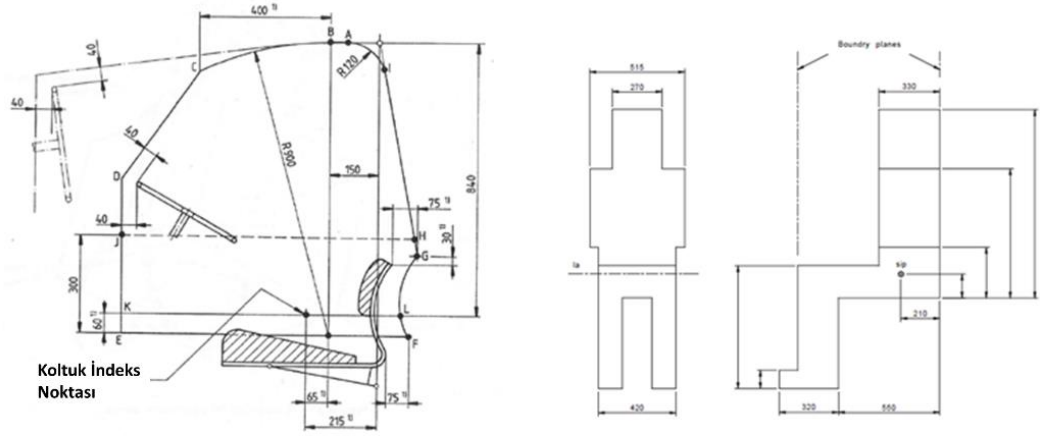
3.1.2 Koruyucu yapı devrilme testleri

Statik yükleme deneyleri, traktörün devrilmesi durumunda güvenlik çerçevesinde oluşacak deformasyonları ölçmek ve bu deformasyonların sürücü yaşam alanına girip girmediğini gözlemlemek amacı ile yapılan testlerdir. Traktör koruyucu yapılarının testlerine yönelik mevcut standartlar traktörün devrilme senaryosunu simüle edecek şekilde uygulanmaktadır. Statik yükleme deneyleri dört aşamadan oluşmaktadır. Bu amaçla koruyucu yapılar, arkadan, yandan, üstten ve önden olmak üzere bir dizi yükleme testinden geçirilirler (Şekil 3.3). Makina üzerindeki yükleri simüle edebilmek için traktör kütlesi, hızı, ivmesi vb. pek çok değişik parametre göz önüne alınmıştır.



Şekil 3.3 Traktör koruyucu yapı statik testleri (Anonymous, 2013)

Testin başarısını görebilmek amacıyla da sürücü boyutlarını simüle edecek bir model (clearance zone) kullanılır (Şekil 3.4) (Anonymous. 2018).

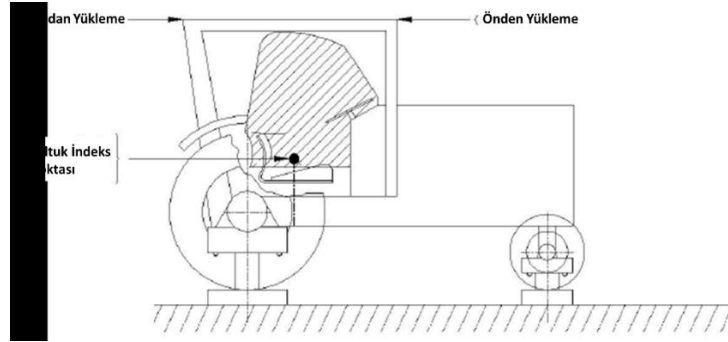


Şekil 3.4 Güvenli yaşam bölgesi (Anonymous, 2018)

Genel olarak çalışma kapsamında dikkate alınacak OECD Code 4 hakkında bilgi vermek gerekirse;

Arkadan Yatay Yükleme:

Arkadan yatay yükleme koşulunda yük, koruma çerçevesinin en üst enine yapısal elemanına uygulanır (devrilme durumunda yere ilk çarpması muhtemel olan yüzeye). Yükün uygulama noktası, koruma çerçevesinin üst tepesinin dış köşesinden içeriye doğru genişliğinin altıda birine karşılık gelen noktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Arkadan yatay yükleme (Anonymous, 2018)

Arkadan yatay yükleme sırasında yapının karşılaması gereken enerji miktarı şöyledir:

$$E = 1.4 \times m_{\text{traktör}}$$

Burada;

E: Enerji (kJ)

$m_{\text{traktör}}$: Traktör kütlesi (kg)

Buna göre arkadan yatay yükleme durumunda yapının absorbe etmesi gereken enerji traktör kütleinin 1,4 katı olmalıdır. Absorbe edilen enerji miktarı, kütleinin 1,4 katına çıktığında veya kabinde oluşan deformasyonlar güvenlik bölgesine girdiğinde test durdurulur.

Arkadan Ezme:

Arkadan ezme deneyinde (Şekil 3.6), yük, yapıya bir mekanizma yardımı ile çerçevenin yatay düzlemine dik bir şekilde uygulanır. Arkadan ezme testi çerçevenin arka en üst elemanlarının üzerine uygulanmalı ve ezme kuvveti traktörün düşey boylamında olmalıdır.



Şekil 3.6 Arkadan ezme testi (Anonymous, 2018)

Uygulanacak kuvvet aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$F = 20 \times m_{\text{traktör}}$$

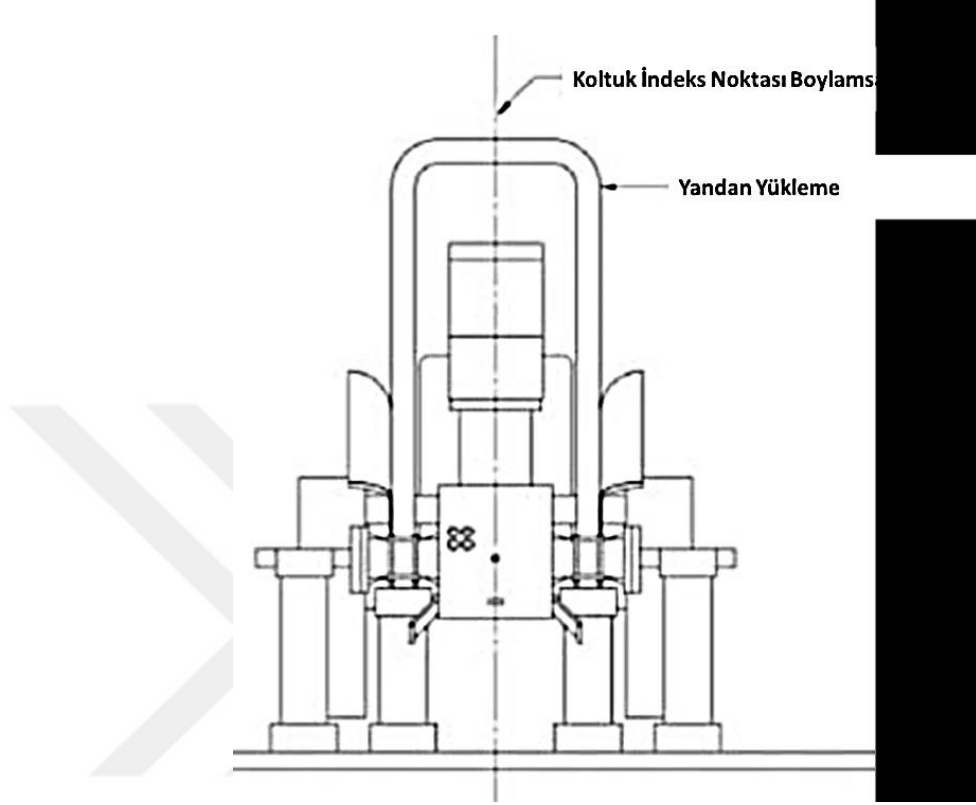
Burada;

F: Ezme Kuvveti (N)

Buna göre traktör kütleinin 20 katı kuvvet uygulanmalıdır. Arkadan ezme deneyinde absorbe edilen enerji miktarına bakılmaz. Uygulanan kuvvet karşısında çerçevenin güvenli koruma bölgesine girip girmediği kontrol edilir.

Yanal Yükleme:

Bu deneyde kuvvet, referans düzlemine dik, koltuk referans noktasının 300 mm önünde, koruma çerçevesinin en üst enine çerçeve elemanına uygulanmalıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Yanal yükleme testi (Anonymous, 2018)

Bu deneyde kabine absorbe ettirilmesi gereken enerji aşağıdaki gibidir:

$$E = 1.75 \times m_{\text{traktör}}$$

Burada;

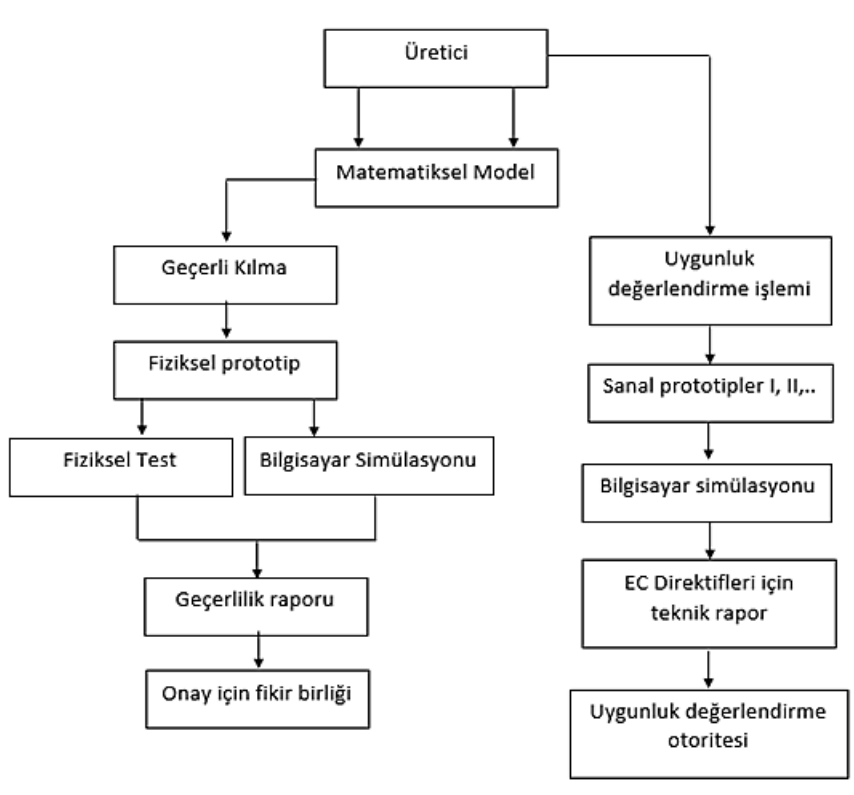
E: Enerji (kJ)

$m_{\text{traktör}}$: Traktör kütlesi (kg)

Buna göre arkadan yanal yükleme sırasında kabinin absorbe etmesi gereken enerji, traktör kütlesinin 1,75 katı olmalıdır. Güvenlik çerçevesi tarafından absorbe edilen enerji traktör kütlesinin 1,75 katına ulaştığında ve/veya güvenlik çerçevesi güvenlik bölgesine girmiş ise deneye son verilir.

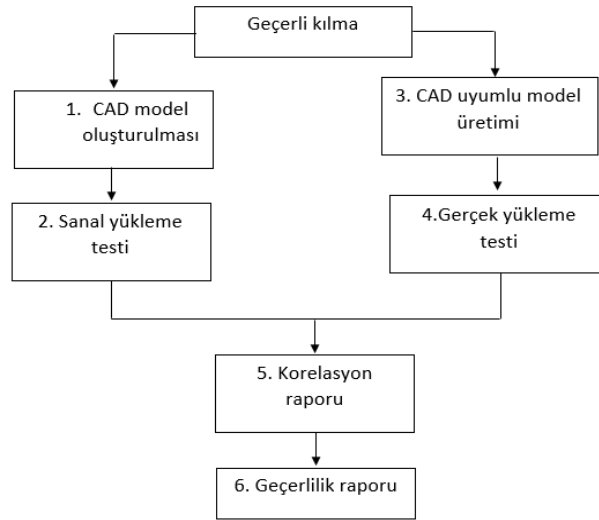
3.2. Yöntem

Son dönemde Avrupa regülasyonlarında da yer bulan sanal test uygulamaları Regülasyon 167/2013 de ve Regülasyon 371/2010'da (2007/42/EC'dan değişme) yer bulmaktadır ve Ek-16'da akış diyagramı Şekil 3.8'deki gibi verilmiştir. Bu akış diyagramı şu an için otomobiller ve otobüsler için gerçekleştirilen sanal testler için bir prosedür oluşturmakta ve üreticinin sanal test yöntemleri sonucunda makina ya da aksamını bir uygunluk değerlendirme kuruluşunda onaylatma sürecini tanımlamaktadır.



Şekil 3.8 Sanal simülasyon testlerinin kullanılma diyagramı (Anonymous, 2015c)

Buna rağmen, traktörler için OECD, EC ya da ISO tarafından kabul edilmiş koruyucu yapı yükleme testlerine ilişkin bir yöntem, bilgisayar programı ya da prosedür henüz belirlenmiş değildir. Özellikle OECD ve EC normlarında sanal testlerin uygunluk değerlendirme kuruluşlarında kabul ve onay prosedürünün geliştirilmesi için çalışmalar başlamış ve bu amaçla alt çalışma grubu oluşturulmuştur. Bu noktada otomobil ve otobüslerde yürüyen sistem irdelenerek konu ile ilgili çalışmalar başlatılmıştır. Şekil 3.9'da çalışmaya ait yol haritasının aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Sanal simülasyon test yol haritası (Anonymous, 2015a)

Genel olarak OECD testlerinde oluşturulan temel hedef; gerçek testler ile sanal testlerin karşılaştırılması ve yüksek korelasyonlu ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi durumunda traktör testlerini yapan uygunluk değerlendirme kuruluşlarının bir kısmının ya da tamamının sanal test yapabilmesi konusunda yetkilendirmeye gidilmesidir. Çalışmayı bu açıardan bir yönteme oturtmak gerekirse, geçerli kılma işleminin ilk aşaması, testi yapılacak koruyucu yapının CAD modelinin oluşturulması olmalıdır.

1) CAD Model oluşturulması; standart bir üretim ya da prototipin öncelikle tanımlanması ya da deklarasyonunu içermektedir. Bu amaçla aşağıdakiler yapılmalıdır:

- 2D çizimler: ürünün temel bağlantılarını ve bunların kesitlerini içeren çizimlerin oluşturulması ve/veya temini,
- Ürüne ilişkin 3D montaj çizimlerinin yapılması,
- 3D çizimlere gerçek değerlerinde malzemelerin atanması süreçte ilk olarak yapılması

2) Sanal testin uygulanması; sanal testin geçerliliğinin belirlenebilmesi için hangi program ile simülasyonun yapıldığının deklare edilmesi gerekmektedir. Sanal testin uygulanmasında şu aşamalara dikkat edilmelidir:

- CAE model oluşturma
- Standardın istediği yük ve sınır koşullarının belirlenmesi

- CAE analizin koşturulması (tüm y¼kleme sırası standardın istediği şekilde olmalıdır)
- Analiz sonucunda aşağıdaki raporlar elde edilmelidir;
 - a. Kuvvet-enerji ve deformasyon diyagramı
 - b. Materyal çekme testi sonucu
 - c. Kalıcı deformasyon
 - d. Güvenlik bölgesine girişim yapıp yapmadığının tespiti

Sanal sim¼lasyon testleri sürecinde izlenecek yöntem genel olarak şu şekildedir:

- Sonlu elemanlar ađ modelinin oluşturulması (Meshing)
- Malzeme tanımlama
- Y¼k ve sınır koşullarını tanımlama
- Analiz
- Sonuç ve verilerin değerlendirilmesi (Raporlama)

Yöntem belirleme sürecinde birçok sonlu elemanlar ađ modeli yaklaşımı denemesinin gerçekteşirilmesi hedeflenmiştir. Farklı eleman tipleri kullanılarak gerçekteşirilecek sanal sim¼lasyon testlerinin sonuçları karşılaştırılarak, sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilebilecektir. Sanal sim¼lasyonu yapılacak koruyucu yapı aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

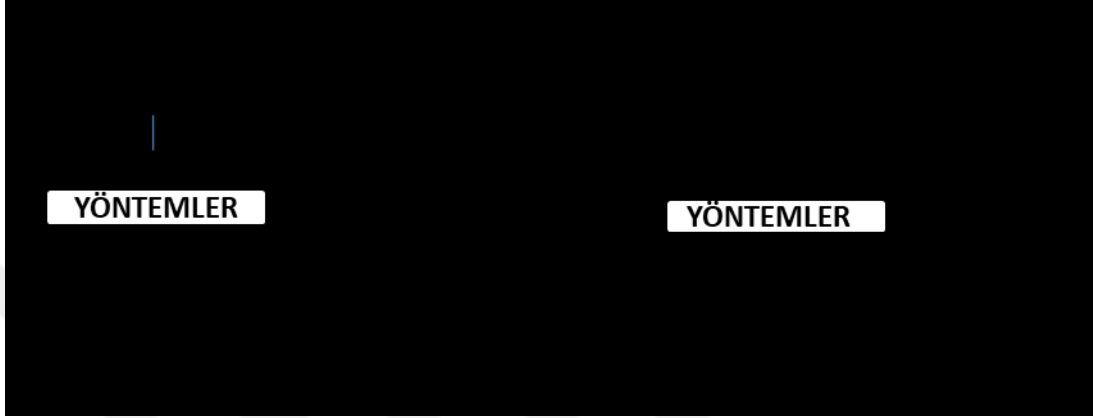
- 2D non-linear elemanlar (Quad4, Tria3 vb.)
- 3D non-linear elemanlar (Tet10, Hex20 vb.)
- 2D ve 3D non-linear elemanlar (Quad4, Tet10 vb)

Eleman tipleri kullanılarak birbirinden farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

- Elde edilen analiz sonuçlarının ve verilerinin değerlendirilmesi sürecinde göz önünde bulundurulması gereken parametreler ortaya konulmuştur.
- Sim¼lasyon programından sonuç alma ile ilgili yöntemleri değerlendirilerek en uygun sonuç alma yaklaşımı araştırılmıştır.
- Elde edilen analiz sonuçlarına göre testin başarılı veya başarısız sayılması ile ilgili kriterler ortaya konulmuştur.

3.3. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodunun mühendislikteki rolünü kavrayabilmek için, diğer mühendislik analiz yöntemleri içindeki yerini tanımlamak gerekmektedir. Mühendislik analizi genel olarak 2 ana kategoriye bölünür: Klasik (analitik) yöntemler ve nümerik yöntemler (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Mühendislik analiz yöntemleri (Anonymous, 2005)

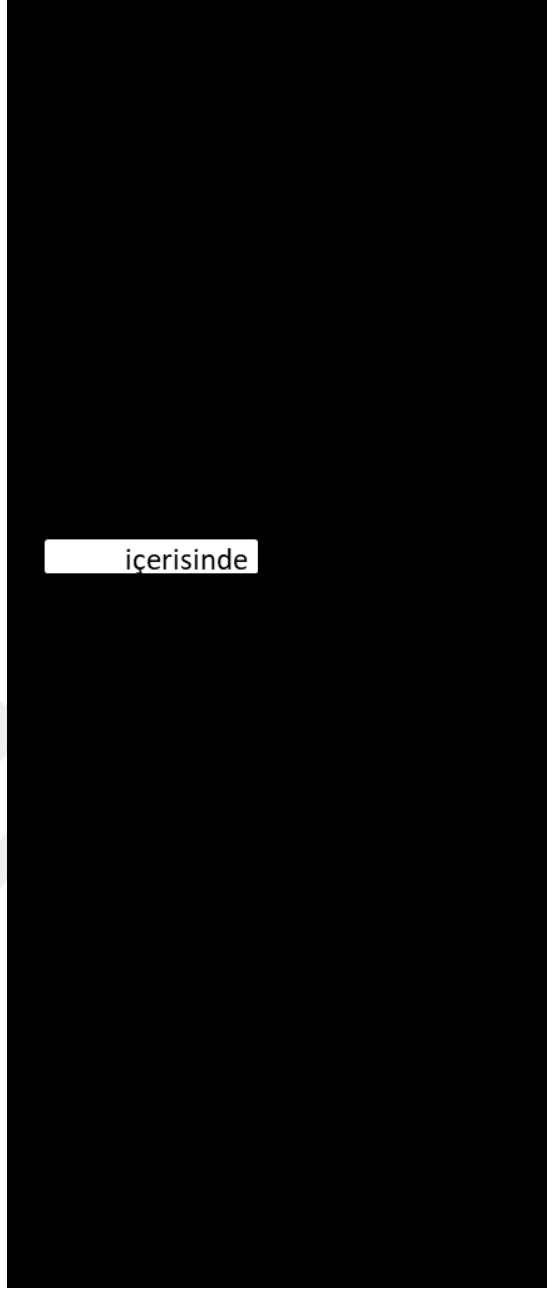
Klasik yöntemler, temel fiziksel prensiplere dayanan diferansiyel denklemlerle oluşturulmuş alan problemlerini direk çözmeye çalışır. Kapalı formlara sahip kesin çözümler sadece basit geometri, yükleme ve sınır koşulları için mümkündür. Bir miktar daha geniş çeşitliliğe sahip klasik problemler, diferansiyel denklemlere yaklaşık (approximate) çözümlerin uygulanması ile çözülebilir. Bu çözümler, makul bir derecede kesilerek yakınsanmış seriler formunu alırlar. Yapısal literatüründe Timoshenko'nun çalışmaları (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959) ve Gerilme-Gerinim için Roark's Formülleri (Young, Warren and Budynas, Richard, 2002) bu tür problemler için başvuru kataloğudur. Kesin çözümlerde olduğu gibi, yaklaşık çözümlerde de düzgün geometrik şekiller, basit sınır koşulları ve düzgün yüklemeler gereklidir. Sonuç olarak, bu çözümler çoğu pratik mühendislik problemlerine benzerlik göstermektedir. Klasik yöntem en büyük avantajı, çözümlerin, problem ile ilgili derinlemesine kavrama sağlamasıdır (Anonymous, 2005).

Nümerik yöntemler, geniş kullanım alanına sahiptir. Nümerik yöntemler, kendi içinde aşağıdaki şekilde bölünür:

- Enerji yöntemi, bir yapının potansiyel enerjisini minimize edecek ifadeyi araştırır. Bu yaklaşım bazı problemler için başarılı olsa da genel olarak uygulanabilir değildir.
- Sınır elemanı yöntemi, diferansiyel eşitlikler için fonksiyonlara benzetim gerçekleştirirken sınır koşulları için benzetim gerçekleştiremez. Elemanlar sadece ilgili alanın sınır koşullarını temsil ettiği için problemin boyutu küçülmüş olur. Bu yöntemin uygulanmasında, elde edilmesi güç olan eşitliklerin temel çözümlerinin bilindiği kabul edilir.
- Sonlu fark metodu, karmaşık diferansiyel eşitlikler ve sınır koşullarını, cebirsel eşitlikler ile değiştirir. Bu sayede bu yöntem, başa çıkılması zor olan düzensiz problemlerin, karmaşık geometrilerin ve sınır koşullarının benzetimine izin verir (Anonymous, 2005).

Sonlu elemanlar metodu, çeşitli düzgün şekilli elemanların kullanımına izin vererek, sınırsız sayıda problem için çözüm önerir. Bu elemanlar düzgün olmayan sınırların benzetimini gerçekleştirebilmek için birbiri ile kombine edilir. Benzer bir yaklaşımla, herhangi tipteki yüklemeler ve sınır koşulları uygulanabilir. Sonlu elemanlar metodu, yapısal analiz, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetik gibi bütün alan problemleri (field problems) için uygulanabilir.

Sonlu elemanlar analizi, bağımsız sonlu elemanlara bölünerek tanımlanan, yükleme ve sınır koşullarına maruz kalan herhangi bir şeklin davranışı için çözüm yaklaşımı arar. Sonlu elemanlar, düzgün olan geometrik şekillere ve bilinen çözümlere sahiptir. Yapının davranışı, bütün elemanların tamamının analizi gerçekleştirilerek elde edilir. Doğrusal statik yapısal analizin çözümü sırasında izlenen akış diyagramı Şekil 3.11'de gösterilmiştir (Anonymous, 2005)



Şekil 3.11 Sonlu elemanlar yöntemi akış diyagramı (Anonymous, 2005)

3.3.1 Doğrusal statik analiz varsayımları ve limitleri

Doğrusal statik analizlerin doğasında önemli varsayımlar ve limitler vardır. Sonlu elemanlar analizi sürecinde problem çözümünün gerçeği yansıtması açısından, bu

kısıtlamaların doğru bir şekilde hesaba katılması gerekmektedir. Doğrusal statik analizler için kısıtlamalar şu şekildedir:

Doğrusal elastik malzeme: Malzemenin homojen ve isotropik olduğu varsayılır. Malzeme üzerindeki gerilme, gerinim ile doğrusal olarak artar ve malzeme kalıcı akma noktasından sonra yük taşıyamaz olarak kabul edilir. Başka bir deyişle malzemenin her zaman elastik bölgede olduğu kabul edilir. Ayrıca yüklenmemiş yapı üzerinde başlangıç gerilmesi olmadığı kabul edilir.

Küçük deplasman: Pratikte küçük deplasman varsayımı, yanal plaka deplasmanlarının plaka kalınlığından ve kiriş eğilmelerinin kiriş kesitinin en küçük boyutundan çok daha küçük olduğu anlamına gelir. Doğrusal analizlerdeki küçük deplasman varsayımını ihlal etmek ciddi hatalı deplasman sonuçlarına sebebiyet verir. Büyük deplasman analizleri doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duyar.

Yavaşça uygulanan kuvvet: Doğrusal statik analizlerde yapı statik dengededir. ‘Yavaşça Uygulanan’ terimi uygulanan kuvvetlerin yapıya dinamik etkiler ile etkilemediği anlamına gelir. Çarpışma kuvvetleri gibi yüklemeler yapının dinamik etkilere maruz kaldığını gösteren anlaşılması net durumlardır. Bunun yanı sıra yapının dinamik etkilere maruz kaldığını gösteren net olmayan durumlar da vardır. Örneğin, konsol kiriş üzerine bir tuğlanın bırakıldığı düşünülecek olursa; konsol kiriş salınım yaparak statik dengeye geleceği için maksimum deplasmanı en son statik denge deplasmanınının büyük olacaktır. Bu nedenle ‘yavaşça uygulanan’ terimi önemli dinamik davranışa sebebiyet vermeyen kuvvet anlamına gelir (Anonymous, 2005).

3.3.2 Doğrusal olmayan statik analizler

Doğrusal analizler, yapı üzerine uygulanan kuvvet ile yapının tepkisi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu kabul eder. Doğrusal statik analizlerde, yapının direngenliği, yapının bir önceki durumuna göre değişmez. Doğrusal statik problemler, direngenlik matrisinin tek bir adımda analiz edilmesiyle çözülür. Doğrusal analizler, yapının tepkisini zaman ve maliyet tasarrufu sağlayarak gerçeğe yakın sonuçlarla gösterebilir. Doğrusal statik

analizler, malzemenin homojen ve isotropik olduğu, yüklemelerin malzemede kalıcı akma noktasının ötesine geçmediği, küçük deplasman sonuçlarına sahip olduğu ve yüklemelerin yapıya dinamik etkilerle etki etmediği varsayımlarına ve sınırlandırmalarına sahiptir.

Yapının doğrusal olmayan malzeme ile modellenmesi ve büyük deformasyonlar gibi doğrusal olmayan etkilerin ortaya çıkması durumunda, doğrusal olmayan analizleri kullanmak zorunlu hale gelmektedir. Bunlara ek olarak, sınır koşullarının değişmesinden dolayı temas (contact) problemleri de doğrusal olmayan etkiler göstermektedir.

Doğrusal olmayan bir problemde, yapının direngenliği (stiffness) yapının deplasman değerine bağlıdır ve yükleme altındaki tepkisi yükleme ile doğrusal orantılı olarak değişmez. Yüklemeden dolayı deplasman değeri değişen yapının direngenliği değişir ve dolayısıyla yapının tepkisi değişir. Doğrusal olmayan problemler artarak giden çözüm şemalarına ihtiyaç duyar. Başka bir deyişle problem, her deplasman değerine göre direngenlik (stiffness) matrislerini güncelleyen adımlara bölünür. Her adım bir önceki adımın sonuçlarını başlangıç olarak kullanır ve geri besleme söz konusudur. Sonuç olarak, analiz açısından zaman ve maliyet kaybına sebep olan direngenlik matrisi birçok kez hesaplanıp birçok kez çözümlenir.

Doğrusal olmayan analizler birçok zorluk içermektedir. Doğrusal olmayan bir problem her zaman tek bir çözüme sahip değildir. Her şeyin doğru tanımlanmış olduğu bazı durumlarda doğrusal olmayan bir problemin çözümü de olmayabilir.

Doğrusal olmayan analiz, yüklemeyi bölerek elde edilmiş makul analiz adımları, nümerik süreci kontrol etme ve çözüm sırasında strateji değiştirme imkanı sağlayan plan gibi çözüm stratejileri geliştirmeyi gerektirir. Hangi çözüm metodunun kullanılacağı, yapının kendisine, yükleme durumuna ve öngörülen doğrusal olmayan davranış tipine bağlıdır. Bazı durumlarda bir metot diğerine göre avantajlı olabilirken bazı durumlarda da tam tersi geçerli olabilir.

Doğrusal olmayan analizlerde çözüm elde edilmesinin yanı sıra çözüm verimliliği konusu da çok önemlidir. Her çözüm prosedürünün, matris operasyonları ve veri depolama gereksinimleri açısından avantaj ve dezavantajları vardır. Bunlara ek olarak, çözümün tüm verimini etkileyen en önemli değişkenlerden birisi de problemin büyüklüğüdür. Direngenlik matrisini birleştirmek için gerekli zaman ve çözüm sonrası gerilme hesaplaması için gerekli zaman, problemin serbestlik derecesi ile doğru orantılıdır. Öte yandan, direngenlik matrisinin çözülmesi için gerekli olan zaman, bant genişliği ile 2. dereceden orantılı iken serbestlik derecesi ile 1. dereceden doğrusal orantılıdır.

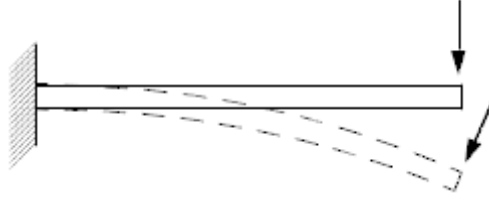
Doğrusal analizler aşağıdaki varsayımlara dayanır:

- Yükleme altındayken yapı sadece küçük deplasmanlara maruz kalmaktadır.
- Yapı malzemesi gerilme ve gerinim arasında doğrusal bir ilişki göstermektedir.
- Sınır koşulları sabit kalmaktadır.

Bu varsayımlar ihlal edildiği zaman, doğrusal analizler geçerli değildir ve doğrusal olmayan etkiler analize dahil edilmelidir. Doğrusal olmayan problemler 3 ana kategori altında sınıflandırılabilir; geometrik doğrusal olmama durumu, malzemenin doğrusal olmama durumu ve sınır koşulu (temas) doğrusal olmama durumu.

Geometrik Doğrusalsızlık: Geometrik olarak doğrusal olmayan problemler büyük deplasmanlara sahiptir. Büyük deplasman, doğrusal analiz eşitliklerinin doğasında bulunan küçük deplasman varsayımını geçersiz kılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, klasik ince cidarlı plakanın yanal yüklemeye maruz kalması durumunda, plaka orta düzleminin yer değiştirme değeri plaka kalınlığına yakın ise deplasman değerinin büyük deplasman olduğu kabul edilir ve doğrusal analizler uygulanabilir değildir.

Bir başka geometrik doğrusalsızlık durumu da takipçi kuvvettir (follower force). Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, konsol kirişin serbest ucuna uygulanan kuvvetin büyük deplasman yaratmaya yeterli olması durumunda, bükülmüş serbest uca uygulanan kuvvet dik olmayacaktır ve yapının deforme olmuş şeklini takip edecektir. Bu davranışı yakalayabilmek için doğrusal olmayan analizlerin tekrarlayan (iteratif) güncelleme tekniklerine ihtiyaç duyar.



Şekil 3.12 Geometrik doğrusalsızlıktan dolayı takipçi kuvvet (Anonymous, 2005)

Malzemenin Doğrusal Olmama Durumu: Yapı malzemesinin gerilme-gerinim ilişkisinin doğrusal olmadığı durumda, malzeme doğrusalsızlığı analiz çözüm dizisi kullanılabilir. Buna ek olarak, büyük gerinim (large strain) durumları da analiz edilebilir. Malzeme doğrusalsızlığına metal plastisitesi, toprak ve beton gibi malzemeler veya elastik bölgede gerilme-gerinim ilişkisi doğrusal olmayan lastik türevi malzemeler örnek olarak gösterilebilir. Metaller için Von Mises veya Tresca ve toprak ile beton gibi malzemeler için Mohr-Coulomb veya Drucker-Prager gibi çeşitli plastisite teorileri kullanılabilir.

Temas: Sınır koşullarındaki değişikliklerden ötürü temas (contact) problemleri doğrusal olmayan özellikler gösterir. Yükleme sırasında temas şartlarından dolayı sınır koşullarında değişiklik olması durumunda problem sınır koşulu doğrusalsızlığı olarak sınıflandırılır ve CGAP elemanları veya kayma temas algoritması gerektirir.

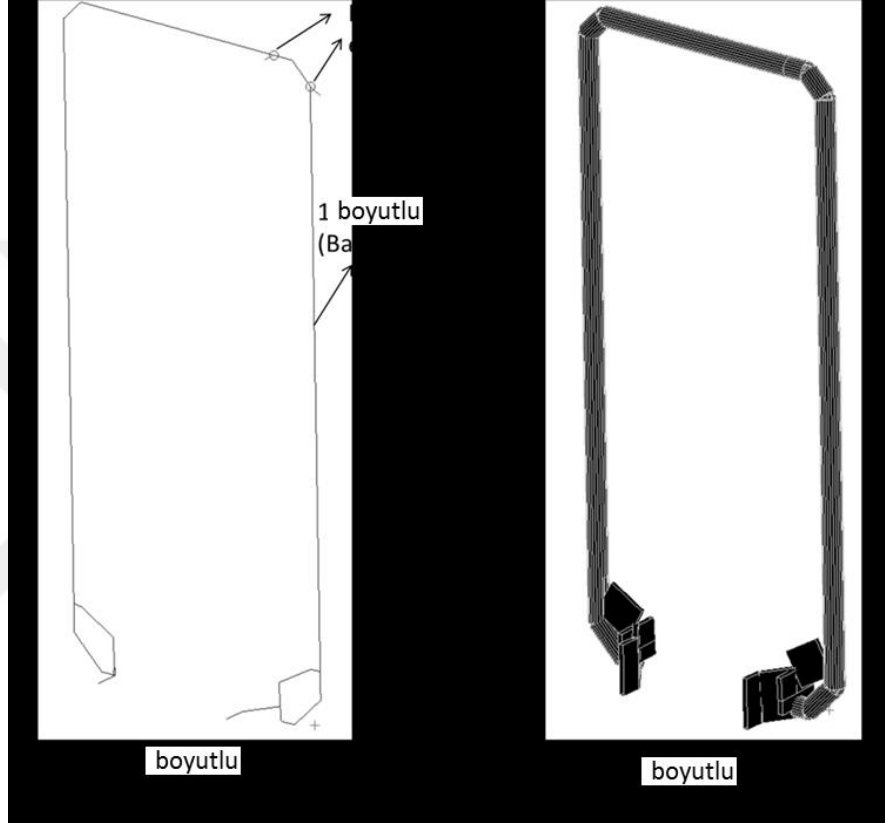
3.4. Sonlu Elemanlar Modeli Oluşturma Yöntemleri

Fiziksel test sonuçları ile sanal simülasyon test sonuçlarını karşılaştırabilmek için 2 direkli YKKY'nın, 3 çeşit sanal simülasyon modelleme metodu gerçekleştirilmiştir:

1. 1 boyutlu elemanlar (Bar Elements) kullanılarak
2. 2 boyutlu elemanlar (Quad Elements) kullanılarak
3. 3 boyutlu elemanlar (Tet10 Elements) kullanılarak

1 Boyutlu Elemanlı FEM; Kabin yapısı, aksenal (axial) ve bükülme (bending) yük taşıma kapasitesi olan 1 boyutlu (bar elements) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıyı

oluşturan profil gibi yapısal elemanların kesit özellikleri, sonlu elemanlar analiz programının “Özellik Atama” (Properties) modülü kullanılarak tanımlanmıştır. Bu modelleme tekniğinin en büyük avantajı modelleme tekniğinin basit olması ve çözüm süresinin çok kısa olmasıdır. Şekil 3.13’te 1 boyutlu sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Sanal simülasyon modeli 24 eleman ve 25 düğüm noktasından (node) oluşmaktadır.

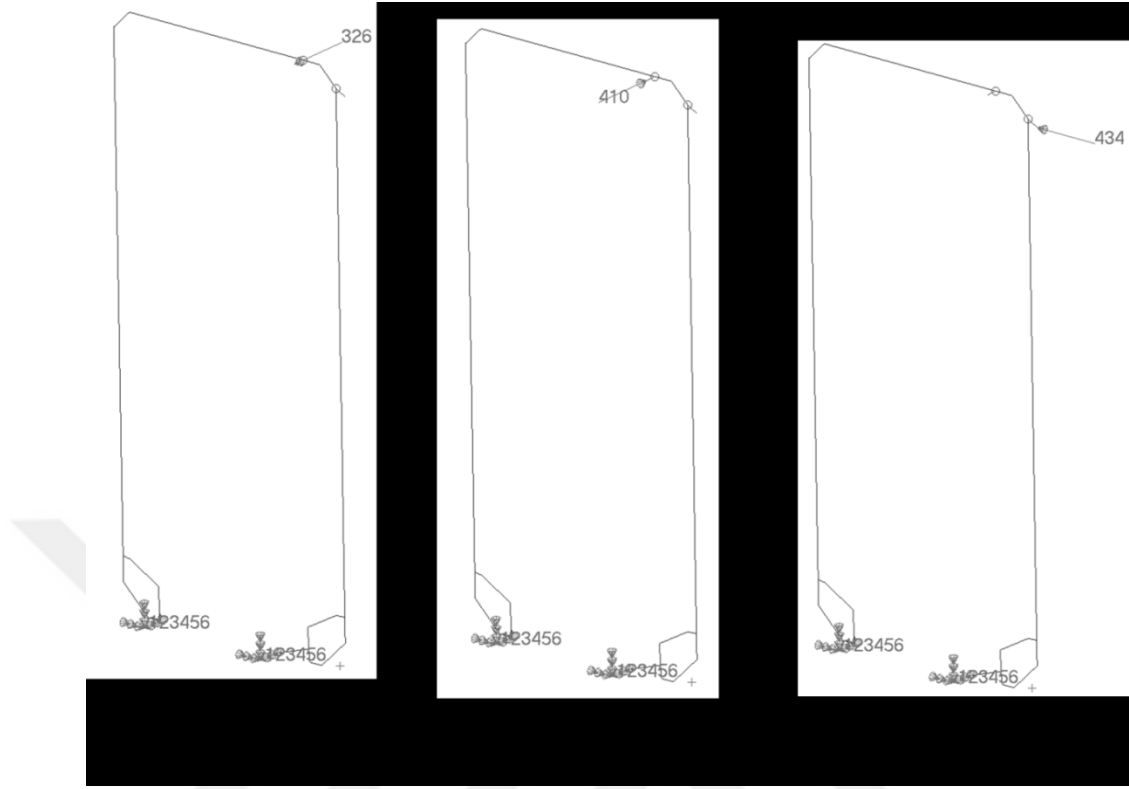


Şekil 3.13 1 Boyutlu (Bar Elements) FEM

Yüklemeler deformasyon (displacement) MPC rijit eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları, kabin ve traktör şase bağlantı noktalarında tanımlanmıştır. Yükleme ve sınır koşulları Şekil 3.14’te gösterilmiştir.

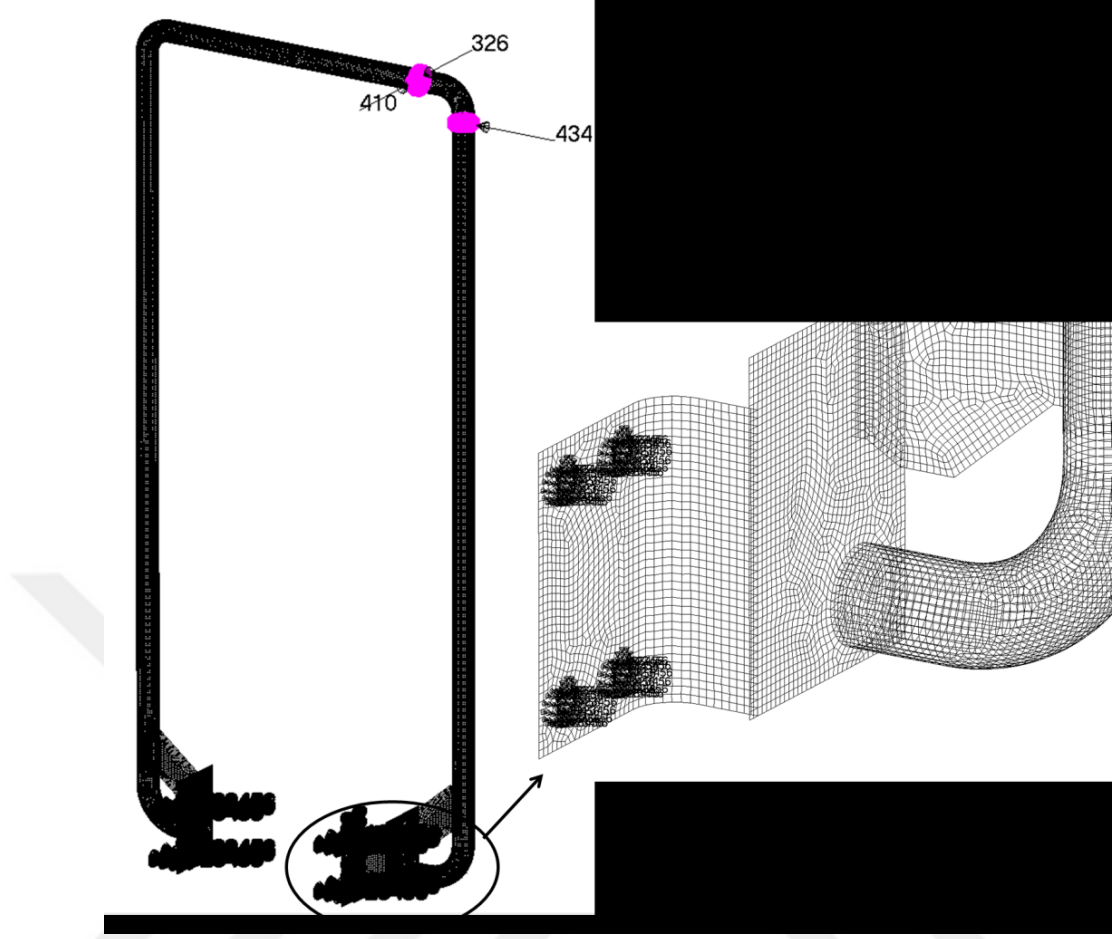
Gerçekleştirilen modelleme detayları ve çözüm detayları “Araştırma Bulguları” bölümünde, 3 farklı yük durumu için analiz edilerek sonuçlar irdelenmiştir:

1. Arkadan Yükleme Yük Durumu (325 mm deformasyon)
2. Önden Yükleme Yük Durumu (410 mm deformasyon)
3. Yandan Yükleme Yük Durumu (433 mm deformasyon)



Şekil 3.14 Yükleme ve sınır koşulları

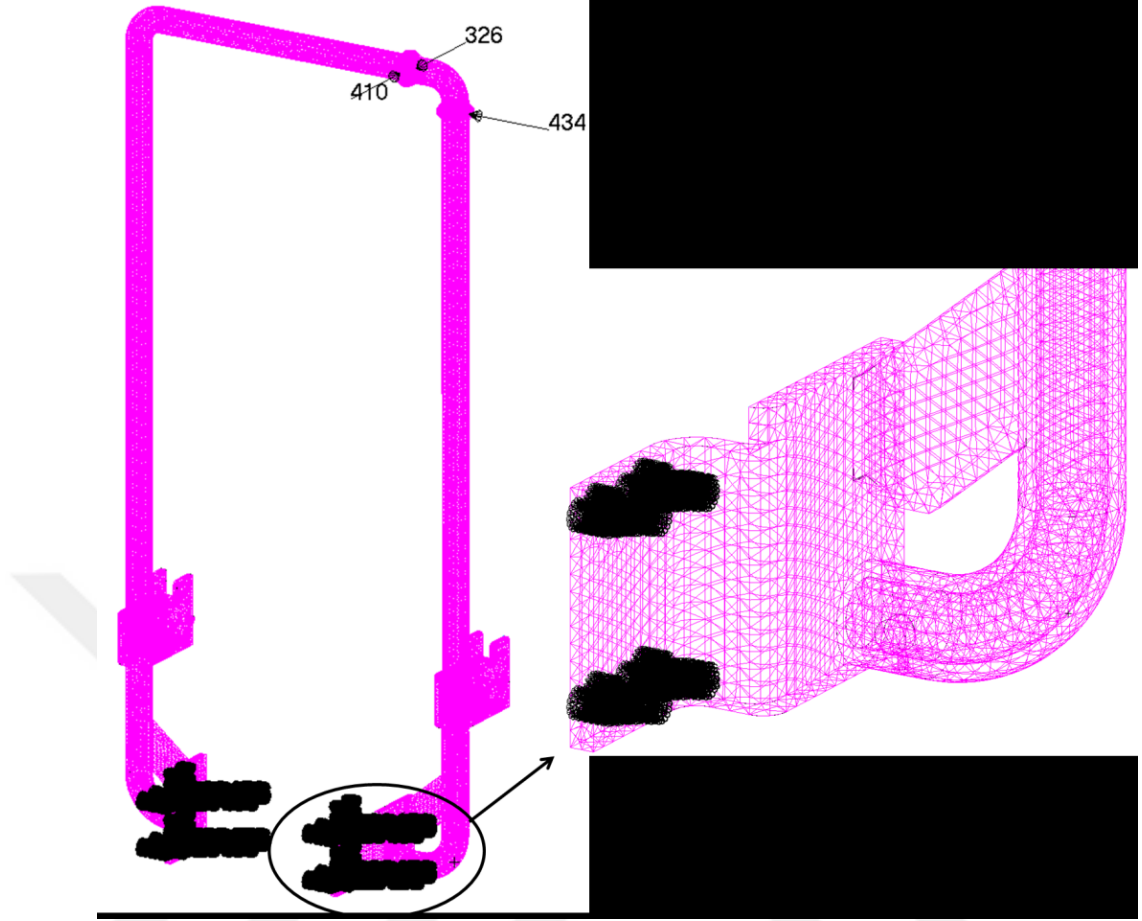
2 Boyutlu Elemanlı FEM; Kabin yapısı, sadece kendi düzleminde (in plane) aksinel (axial), bükülme (bending) ve kesme (shear) yük taşıma kapasitesi olan 2 boyutlu (quad elements) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme tekniğinin en büyük avantajı, kesme kuvvetlerini de hesaba katmasından dolayı 1D boyutlu modellemeye göre daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi ve 3D modellemeye göre çözüm süresinin kısa olmasıdır. Şekil 3.15'te 2 boyutlu sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Sanal simülasyon modeli 55.354 eleman ve 55.631 düğüm noktasından (node) oluşmaktadır.



Şekil 3.15 2 Boyutlu (Quad Elements) FEM

Yüklemeler deformasyon (displacement) MPC rijit eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları, kabin ve traktör şase bağlantı noktalarında tanımlanmıştır. Yükleme ve sınır koşulları Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

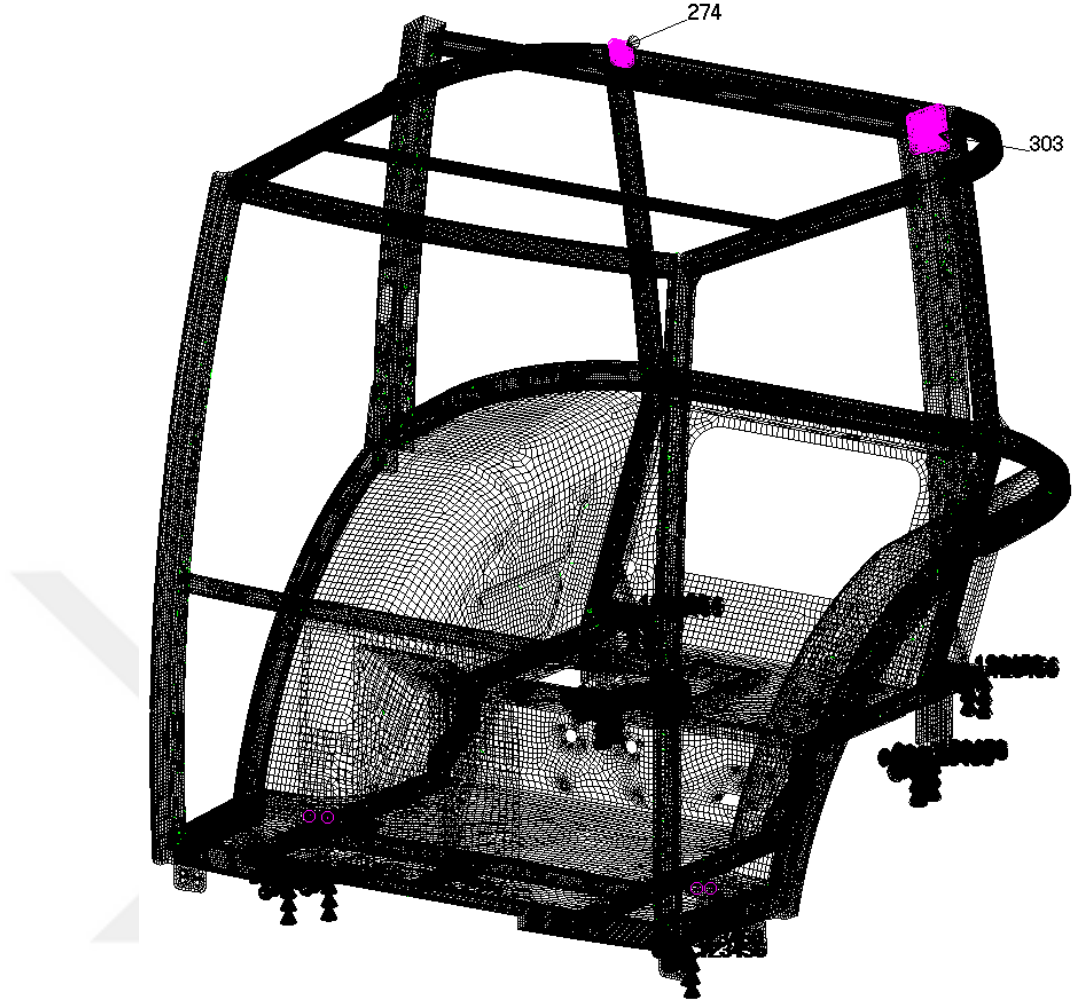
3 Boyutlu Elemanlı FEM; Kabin yapısı, bütün düzlemlerde aksenal (axial), bükülme (bending) ve kesme (shear) yük taşıma kapasitesi olan 3 boyutlu (Tet10 elements) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme tekniğinin en büyük avantajı bütün düzlemlerde yük taşıma kapasitesine sahip olmasından dolayı en gerçekçi sonuçların elde edilmesi iken çözüm sürelerinin uzun olması ve modelleme zorluğu en büyük dezavantajdır. Şekil 3.16'da 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Sanal simülasyon modeli 98.103 eleman ve 177.129 düğüm noktasından (node) oluşmaktadır.



Şekil 3.16 3 Boyutlu (Tet10 Elements) FEM

Yüklemeler deformasyon (displacement) MPC rijit eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları, kabin ve traktör şase bağlantı noktalarında tanımlanmıştır. Yükleme ve sınır koşulları Şekil 3.16'de gösterilmiştir.

Fiziksel test sonuçları ile sanal simülasyon test sonuçlarını karşılaştırabilmek için 4 direkli YKKY'nın, 2 Boyutlu Elemanlı sanal simülasyon modelleme metodu kullanılmıştır (Şekil 3.17). Yüklemeler, MPC rijit eleman aracılığıyla deformasyon (displacement) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları, kabin ve traktör şase bağlantı noktalarında tanımlanmıştır. Sanal simülasyon modeli 631.993 eleman ve 1.073.201 düğüm noktasından (node) oluşmaktadır.



Şekil 3.17 2 Boyutlu (Quad Elements) FEM

Farklı analiz modeli yaklaşımlarına göre gerçekleştirilen modelleme detayları ve çözüm detayları “Araştırma Bulguları” bölümünde, 2 farklı yük durumu için analiz edilerek sonuçlar irdelenmiştir:

1. Arkadan Yükleme Yük Durumu (274 mm deformasyon)
2. Yandan Yükleme Yük Durumu (303 mm deformasyon)

3.5. Sanal Simülasyon Malzeme Oluşturma Yöntemi

Kabin iskeletini oluşturan yapısal elemanlar ST37 kalite çelik malzemedir. Gerilme değerlerinin, yapının plastik deformasyonundan yüksek derecede etkilendiği plastik deformasyon problemlerinde, malzeme plastisitesinin analizlere dahil edilmesi gerekir. Bu nedenle, doğrusal olmayan analizler için plastik deformasyon bölgesinin simüle

edebilmesi için ST37 malzemenin gerinme-gerilme grafiği (strain-stress curve) hesaplanmalıdır. Çizelge 3.6'da ST37 çelik malzemesinin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 ST 37 Çelik malzeme özellikleri

	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %
ST 37	230-240	370-510	25

Farklı malzeme modelleme tekniklerinin analiz sonuçlarına etkisini incelemek için Rambeg-Osgood yöntemi ve Parçalı Doğrusal (Piece-wise Linear) yöntemi gibi farklı malzeme modelleme yöntemleri kullanılarak 6 farklı malzeme grafiği oluşturulmuştur.

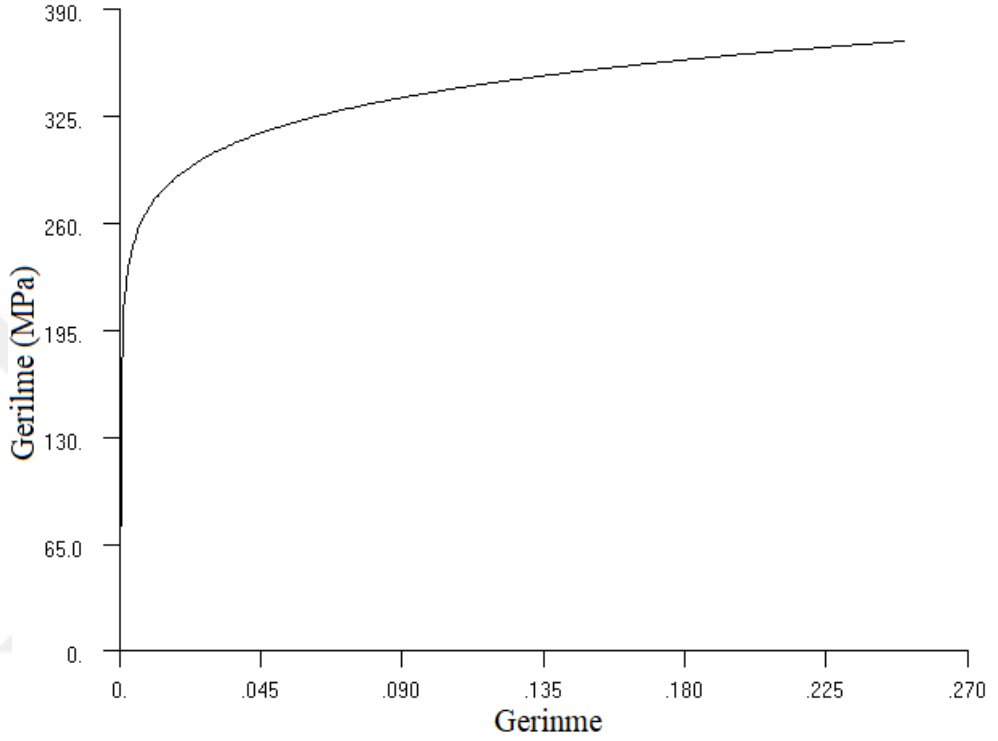
3.5.1 1. malzeme

YKKY iskeleti yapısal analizler sürecinde kullanılan 1. Malzeme, Ramberg-Osgood yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ramberg-Osgood hesaplarında kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.7'de ve hesaplanan Ramberg-Osgood eğrisi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 Malzeme 1 mekanik özellikler

E (MPa) Elastisite Dğ°	210000
------------------------	--------

σ_y $\sigma_{Whu\text{Çuf}}$	235
σ_u $\sigma_{Whu\text{Çuf}}$	370
ϵ_u $\epsilon_{Whu\text{Çuf}}$	0,25
n	10,62



Şekil 3.18 Malzeme 1 gerinme-gerilme eğrisi

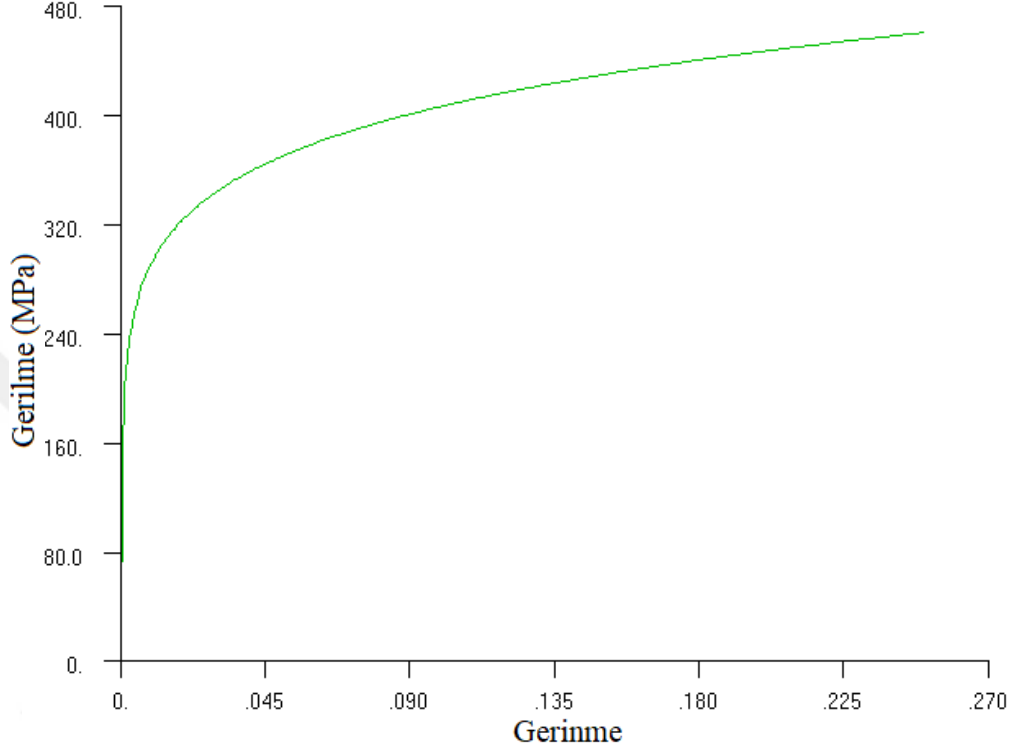
3.5.2 2. malzeme

Kabin iskeleti yapısal analizleri sürecinde kullanılan 2. Malzeme, Ramberg-Osgood yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ramberg-Osgood hesaplarında kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.8'de ve hesaplanan Ramberg-Osgood eğrisi Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.8 Malzeme 2 mekanik özellikler

E (MPa) Elastisite Dϕ	210000
σ_y $\sigma_{Whu\text{Çuf}}$	240
σ_u $\sigma_{Whu\text{Çuf}}$	460

$\epsilon_u < \epsilon_{0.2}$	0,25
n	7,41



Şekil 3.19 Malzeme 2 gerinme-gerilme eğrisi

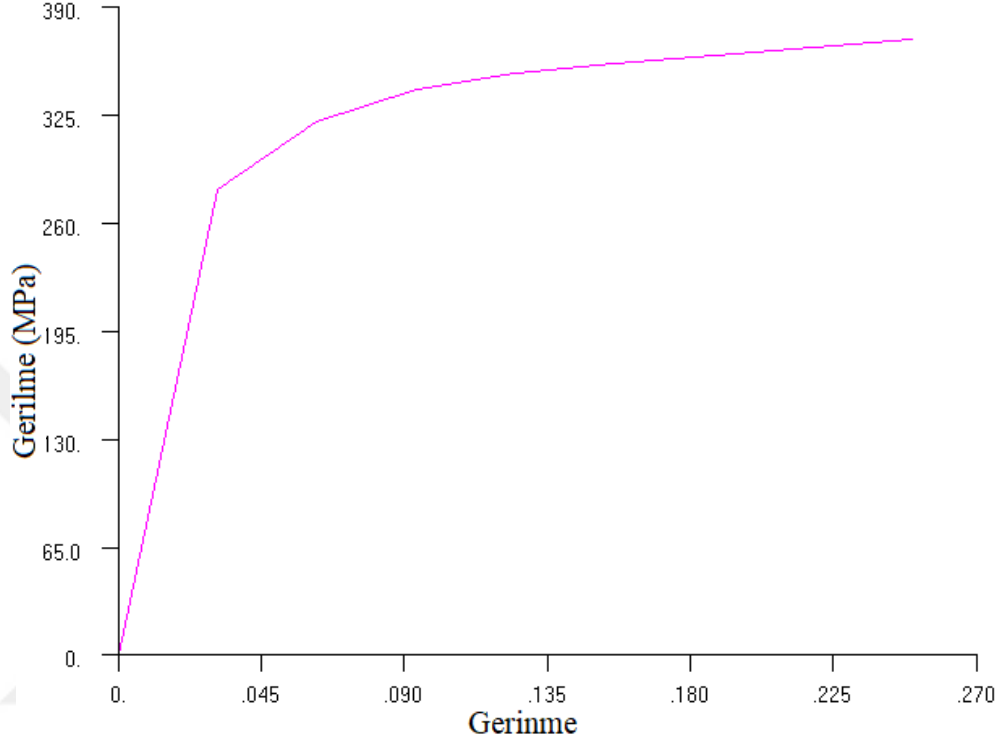
3.5.3 3. malzeme

Kabin iskeleti yapısal analizleri sürecinde kullanılan 3. Malzeme, parçalı doğrusal olarak tanımlanmıştır. Gerinme-gerilme eğrisini oluştururken kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.9’da ve hesaplanan gerinme-gerilme eğrisi Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 Malzeme 3 mekanik özellikler

Gerinme	Gerilme (MPa)
0,0000	0,00
0,0313	280,00
0,0625	320,00
0,0938	340,00
0,1250	350,00

0,1563	355,00
0,1875	360,00
0,2188	365,00
0,2500	370,00



Şekil 3.20 Malzeme 3 gerinme-gerilme eğrisi

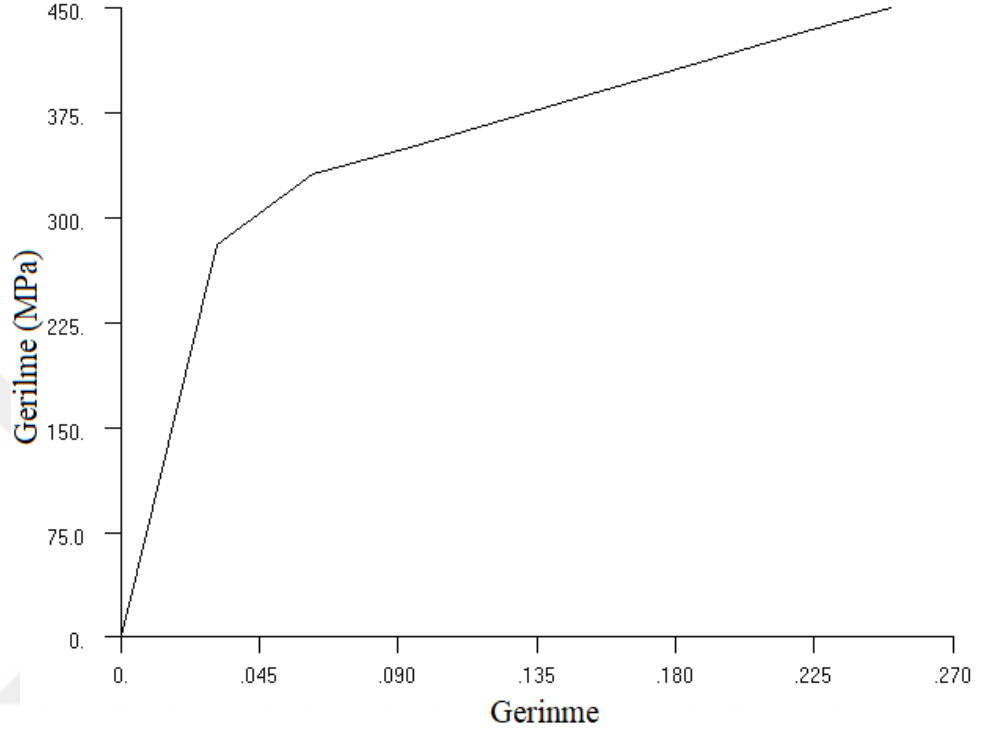
3.5.4 4. malzeme

Kabin iskeleti yapısal analizleri sürecinde kullanılan 4. Malzeme, parçalı doğrusal olarak tanımlanmıştır. Gerinme-gerilme eğrisini oluştururken kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.10'da ve hesaplanan gerinme-gerilme eğrisi Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 Malzeme 4 mekanik özellikler

Gerinme	Gerilme (MPa)
0,0000	0,00
0,0313	280,00
0,0625	330,00
0,0938	350,00
0,1250	370,00

0,1563	390,00
0,1875	410,00
0,2188	430,00
0,2500	450,00



Şekil 3.21 Malzeme 4 gerilme-gerilme eğrisi

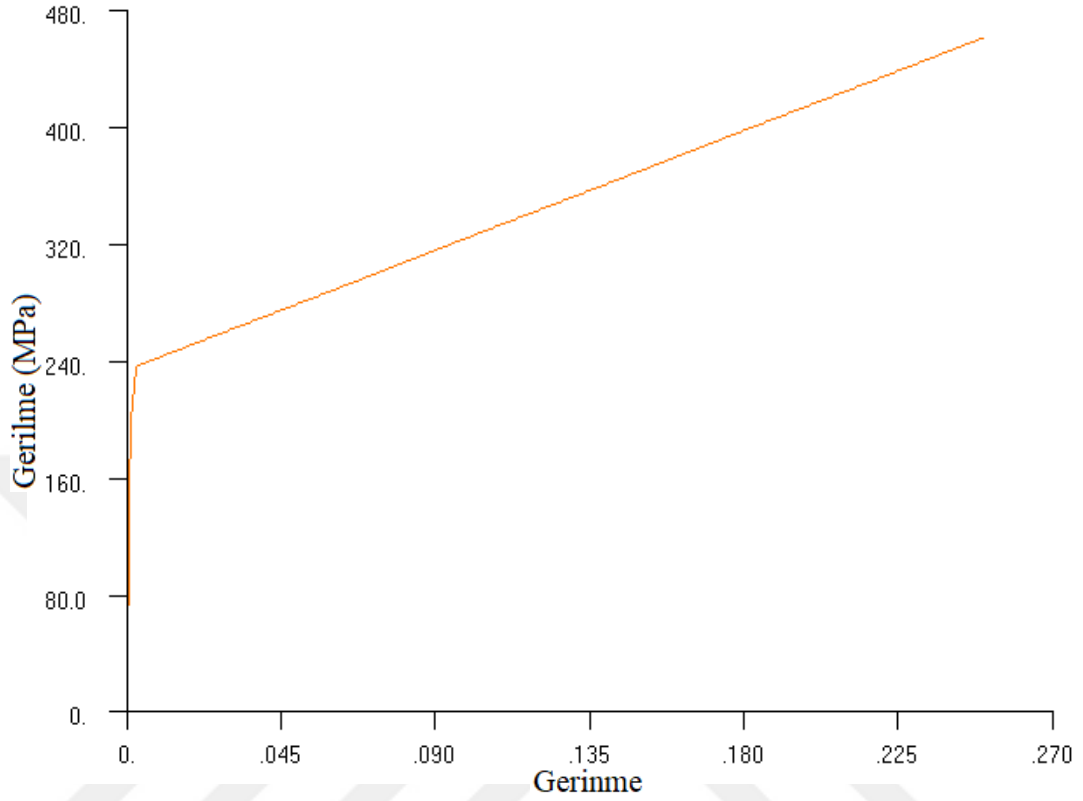
3.5.5 5. malzeme

Kabin iskeleti yapısal analizleri sürecinde kullanılan 5. Malzeme, parçalı doğrusal olarak tanımlanmıştır. Gerilme-gerilme eğrisini oluştururken kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.11’de ve hesaplanan gerilme-gerilme eğrisi Şekil 3.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11 Malzeme 5 mekanik özellikler

Gerilme	Gerilme (MPa)
0,0000	0,00
0,0007	144,00
0,0015	199,60
0,0022	222,30
0,0029	235,74

0,2500	460,74
--------	--------



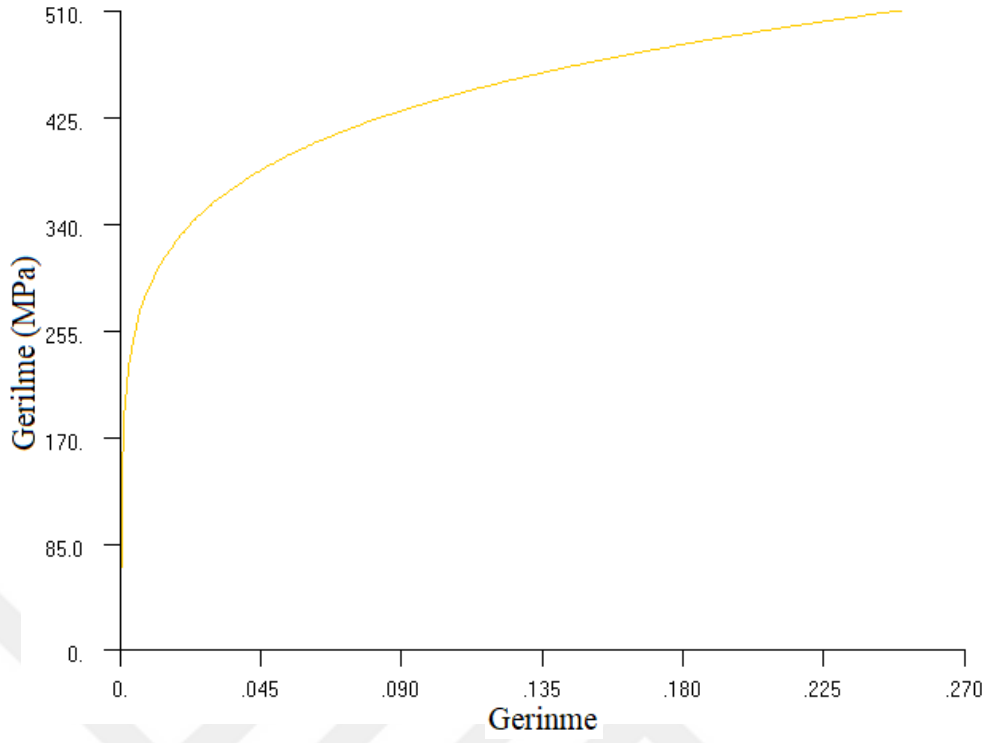
Şekil 3.22 Malzeme 5 gerilme-gerilme eğrisi

3.5.6 6. malzeme

Kabin iskeleti yapısal analizleri sürecinde kullanılan 6. Malzeme, Ramberg-Osgood yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ramberg-Osgood hesaplarında kullanılan mekanik özellikler Çizelge 3.12’de ve hesaplanan Ramberg-Osgood eğrisi Şekil 3.23’te gösterilmiştir.

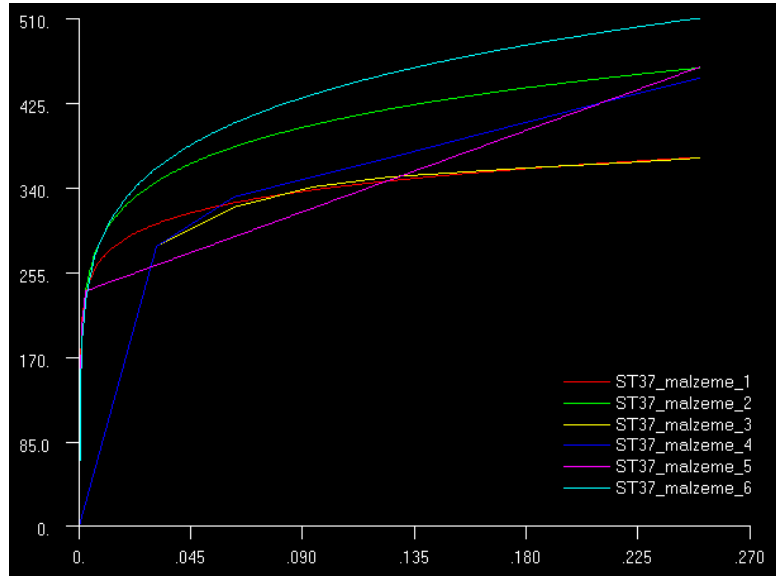
Çizelge 3.12 Malzeme 6 mekanik özellikler

E (MPa) Elastisite D₀	210000
σ_y D₀ Çuf	230
σ_u D₀ Çuf	510
ϵ_u D₀ Çuf	0,25
n	6,05



Şekil 3.23 Malzeme 6 gerilme-gerilme eğrisi

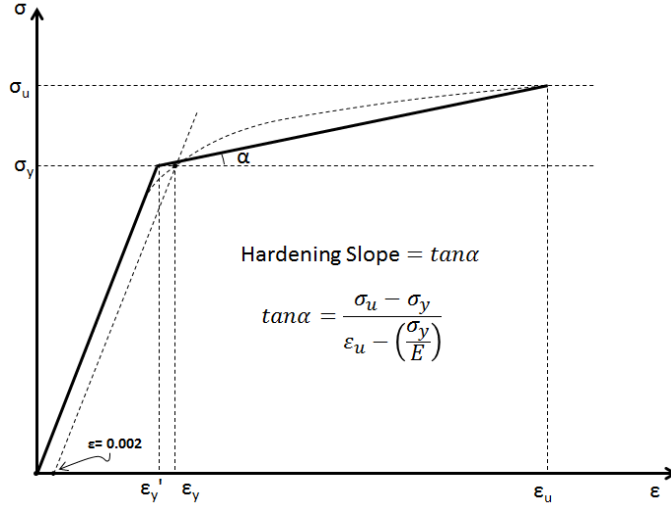
Analizlerde kullanılan 6 farklı ST37 eğrisi Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24 ST-37 doğrusal olmayan malzeme verileri

3.5.7 Parçalı doğrusal malzeme modelleme yaklaşımı

Parçalı doğrusal yaklaşımda malzemenin elastik bölgesi için (doğrusal) lineer bir eğri ve plastik bölgesi için ayrı bir (doğrusal) lineer eğri kullanılarak, malzemenin gerilme-gerinme eğrisi elde edilir. Şekil 3.25'te örnek parçalı doğrusal malzeme eğrisi gösterilmiştir. Bu yaklaşım malzemenin gerilme-gerinme eğrisini tanımlamak için çok az veriye ihtiyaç duyduğu için simülasyon (analiz) sonuçlarını kısaltmaktadır.



Şekil 3.25 Parçalı doğrusal malzeme tanımlama

3.5.8 RAMBERG-OSGOOD yaklaşımı

Ramberg-Osgood yaklaşımı, metalik yapılar için gerçek mühendislik gerilme-gerinme grafiğini elde etmek için kullanılan matematiksel bir yaklaşımdır. Bu matematiksel yaklaşım 3 parametre ile tanımlanır (Anonymous, 1943):

- E, Elastisite Modülü (N/mm²)
- n, Ramberg-Osgood Parametresi
- σ, Referans Gerilme (N/mm²)
- ε, Referans Gerinmesi

Akma gerilmesinin Referans Gerilme olarak kullanılması durumunda;

$$\sigma = E \epsilon + \sigma \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n$$

Rabmerg-Osgood eğrisinin şekli, Ramberg-Osgood parametresinin (n) değerine fazlasıyla bağlıdır. Ramberg-Osgood parametresi (n) test sonuçlarından elde edilir ve malzemeye, duruma, ürün yönüne ve yükleme yönüne (L, LT ya da ST yönü) göre değişiklik gösterebilir. Parametreyi elde etmek için test datası mevcut değilse, malzeme mekanik özellikleri kullanılarak hesaplanabilir. Akma ve çekme dayanımları gibi gerilme-gerinme eğrisi üzerindeki 2 noktanın bilinmesi durumunda Ramberg-Osgood parametresi şu şekilde hesaplanır:

$$n = \frac{\log \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \right)}{\log \left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_1} \right)}$$

Burada;

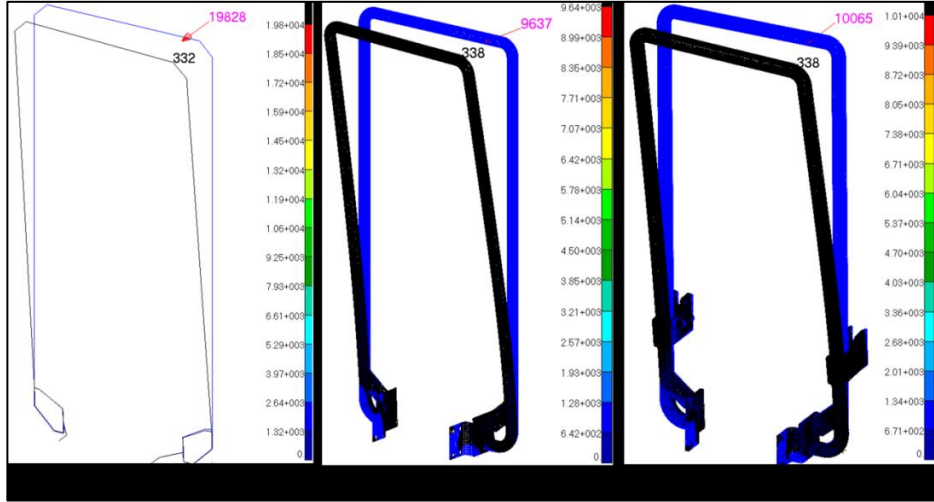
- σ_u , Kopma Gerilmesi (N/mm²)
- σ_y , Akma Gerilmesi (N/mm²)
- ϵ_u , Kopma Gerinimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Gerçekleştirilen sanal simülasyonların sonuçları iki direkli ve dört direkli yuvarlanmaya karşı koruyucu yapılar için her yük senaryosunun gerçek fiziksel test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak devam eden bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştır.

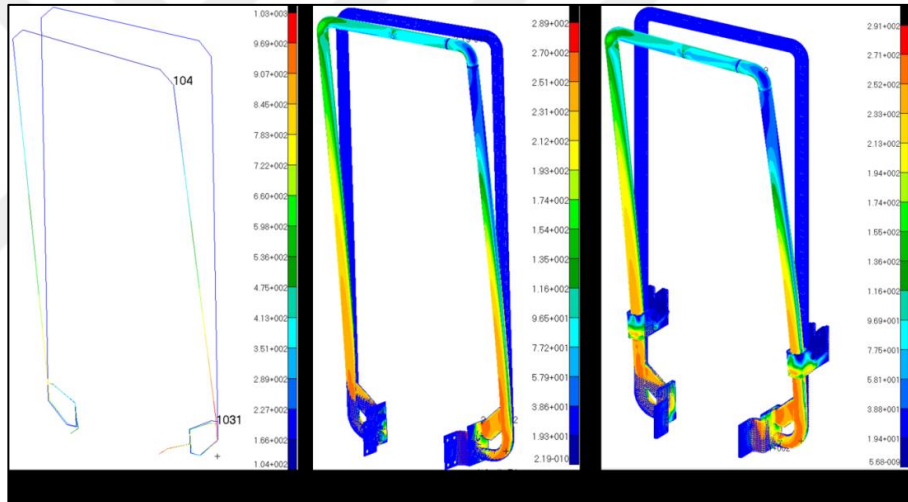
4.1. İki Direkli YKKY - Arkadan Yükleme Yük Durumu

Arkadan yükleme yük durumu için deformasyon ve kuvvetlerin sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Arkadan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları

Arkadan yükleme koşulu için Von Mises Gerilme sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Arkadan yükleme FEM Von Mises gerilme (stress) sonuçları

Farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına göre reaksiyon kuvveti ve enerji miktarları sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Arkadan yükleme reaksiyon kuvvetleri

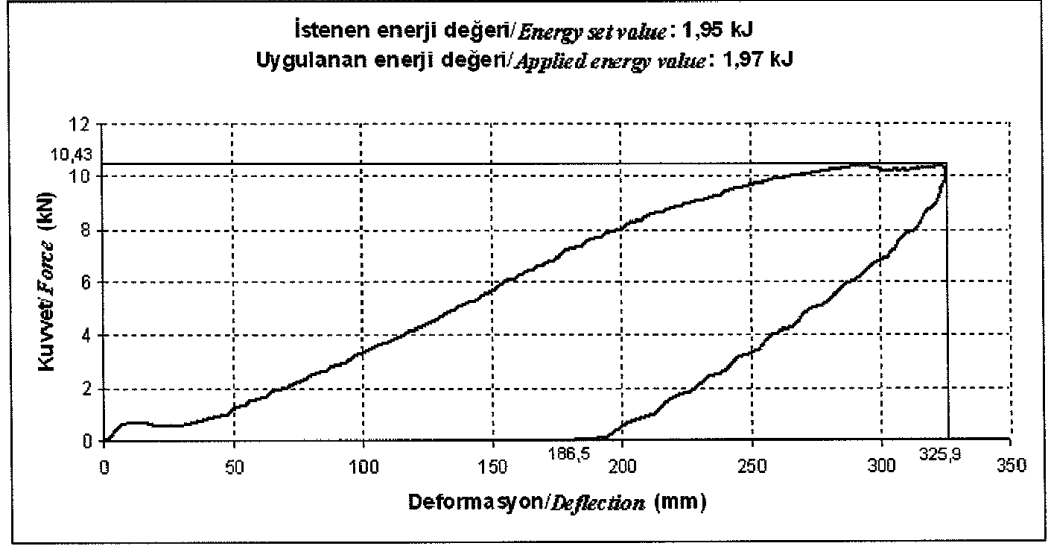
Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	32,6	530	1980	1980	2000	2000	2180	2180	1920	2144

2	65,2	1620	3960	3970	4000	3980	4360	4350	3520	4033
3	97,8	3200	5940	5950	6000	5790	6540	6260	4550	5020
4	130	4530	7920	7930	8000	7090	8720	7570	5110	5620
5	163	6530	9900	9910	10000	7930	10900	8410	5580	6385
6	196	8000	11880	11900	12000	8490	13080	8960	5950	6400
7	228	9000	13860	13900	14000	8890	15260	9340	6180	7170
8	261	10000	15840	15900	16000	9190	17440	9640	6380	6850
9	293	10400	17820	17800	18000	9430	19620	9870	6560	7400
10	326	10430	19800	19800	20000	9640	21800	10100	6710	7680

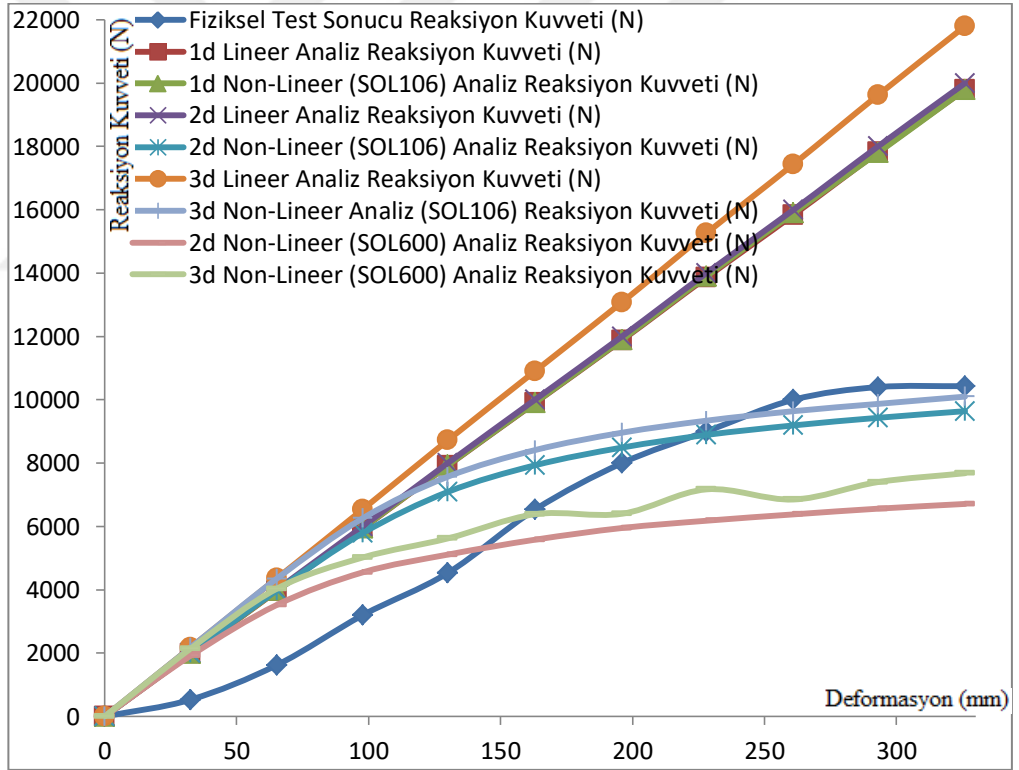
Çizelge 4.2 Arkadan yükleme enerji miktarı

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Enerji (kJ)	1d Lineer Analiz Enerji (kJ)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	2d Lineer Analiz Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	3d Lineer Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	32,6	0,0086	0,0323	0,0323	0,0326	0,0326	0,0355	0,0355	0,0313	0,0349
2	65,2	0,0350	0,0968	0,0970	0,0978	0,0975	0,1066	0,1064	0,0887	0,1007
3	97,8	0,0786	0,1614	0,1617	0,1630	0,1593	0,1777	0,1729	0,1315	0,1476
4	130	0,1245	0,2231	0,2235	0,2254	0,2074	0,2457	0,2227	0,1555	0,1713
5	163	0,1825	0,2940	0,2944	0,2970	0,2478	0,3237	0,2637	0,1764	0,1981
6	196	0,2397	0,3594	0,3599	0,3630	0,2709	0,3957	0,2866	0,1902	0,2110
7	228	0,2720	0,4118	0,4128	0,4160	0,2781	0,4534	0,2928	0,1941	0,2171
8	261	0,3135	0,4901	0,4917	0,4950	0,2983	0,5396	0,3132	0,2072	0,2313
9	293	0,3264	0,5386	0,5392	0,5440	0,2979	0,5930	0,3122	0,2070	0,2280
10	326	0,3437	0,6207	0,6204	0,6270	0,3147	0,6834	0,3295	0,2190	0,2488
Toplam		1,92	3,23	3,23	3,26	2,20	3,55	2,34	1,60	1,79

TAMTEST – Tarım Alet ve Makinaları Test Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen yükleme test sonuçları ve farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına reaksiyon kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Tamtest arkadan yükleme kuvvet-deformasyon grafiği



Şekil 4.4 Arkadan yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi doğrusal (linear) analizler, her adımda direngenliği aynı hesapladığı için analiz sonuçları gerçek test sonuçlarından farklı olarak doğrusal olarak grafikler otaya çıkarmıştır. Bir boyutlu elemanlar (1D Bar elements) kullanılarak

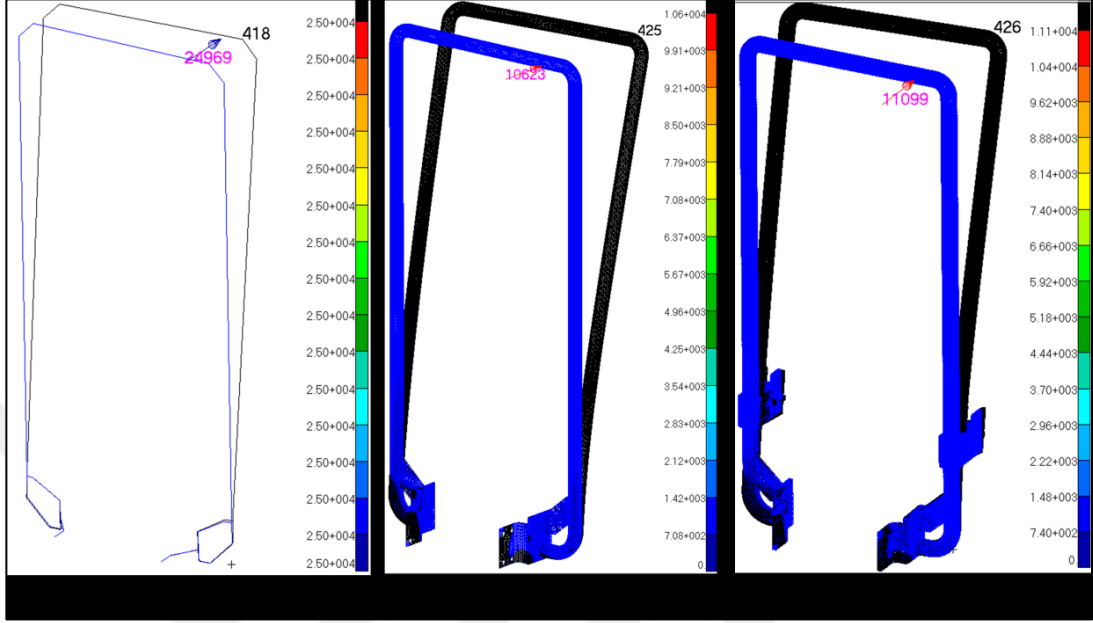
oluşturulmuş olan simülasyon modelleri, gerçekteştirilen doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde aynı sonuçları vermiştir.

İki boyutlu elemanlar (2D Quad elements) kullanılarak oluşturulmuş simülasyon analiz sonuçları ve üç boyutlu elemanlar (3D Tetra elements) kullanılarak oluşturulmuş simülasyon analiz sonuçları karşılaştırılacak olursa, sonuçlar arasında ciddi fark olmasa da, 3 boyutlu elemanların direngelik mertebeleri daha yüksek olduğu için, her adımda ortaya çıkan tepki kuvveti daha fazladır.

İki farklı doğrusal olmayan (Nonlinear) analiz yöntemi olan SOL106 ve SOL600 ile gerçekteştirilen analiz sonuçları karşılaştırılacak olursa, her iki doğrusal olmayan analiz yönteminde de elastik deformasyon bölgesinde aynı sonuçlar çıkmışken, SOL600 analiz yöntemi ile gerçekteştirilen analiz sonuçlarında tepki kuvvetleri plastik deformasyon bölgesinde daha yüksek çıkmıştır.

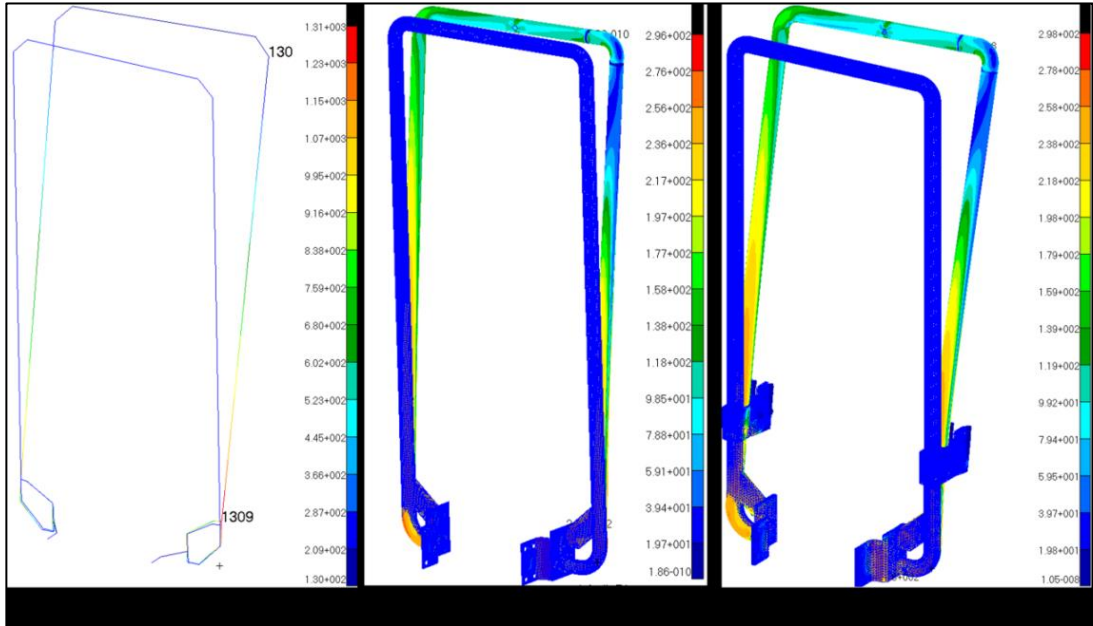
4.2. İki Direkli YKKY - Önden Yükleme Yük Durumu

Önden yükleme yük durumu için deformasyon ve kuvvetlerin sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Önden yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları

Önden yükleme yük durumu için Von Mises Gerilme sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Önden yükleme FEM Von Mises gerilme (stress) sonuçları

Farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına göre reaksiyon kuvveti ve enerji miktarı tabloları sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

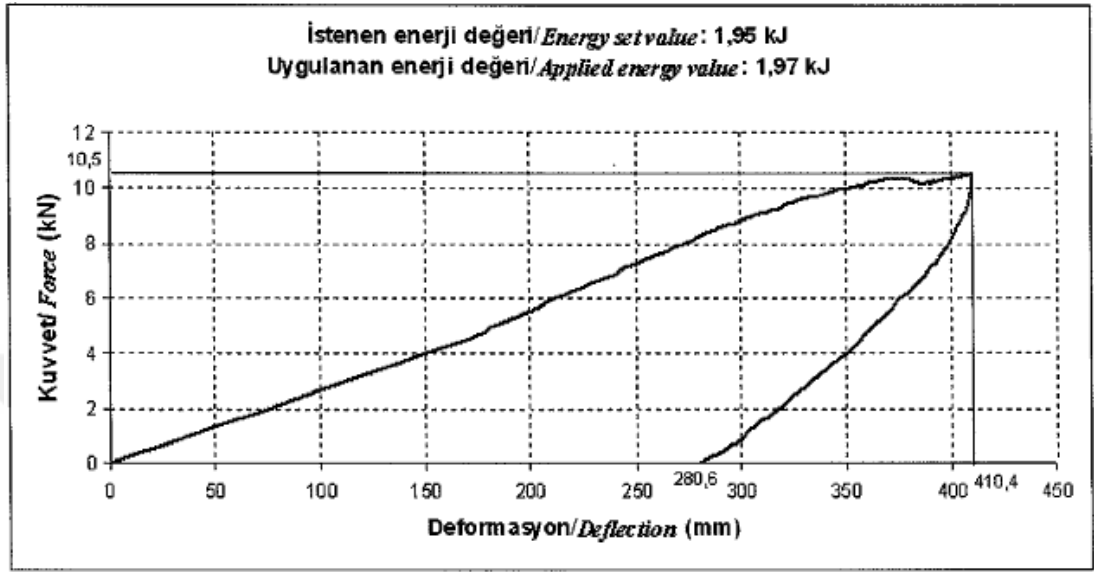
Çizelge 4.3 Önden yükleme reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	41,1	1060	2500	2500	2510	2510	2740	2750	2368	2678
2	82,1	2160	5000	4990	5020	5000	5480	5450	4193	4817
3	123	3460	7500	7490	7530	7060	8220	7590	5030	6873
4	164	4530	10000	9990	10040	8330	10960	8860	5367	10549
5	205	6000	12500	12500	12550	9080	13700	9600	5897	8460
6	246	7460	15000	15000	15060	9580	16440	10100	6133	11200
7	287	8610	17500	17500	17570	9930	19180	10400	6204	15800
8	328	9860	20000	20000	20080	10200	21920	10700	6573	11300
9	369	10260	22500	22500	22590	10400	24660	10900	6614	11800
10	411	10500	25000	25000	25100	10600	27400	11100	6645	12800

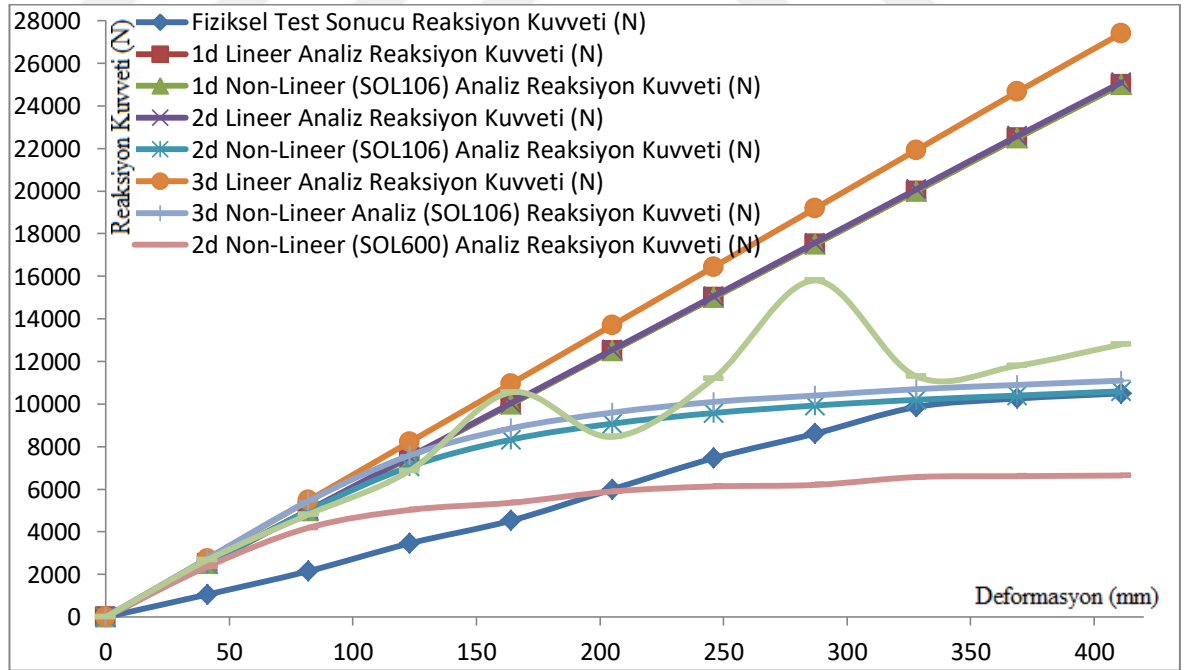
Çizelge 4.4 Önden yükleme enerji miktarı

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Enerji (kJ)	1d Lineer Analiz Enerji (kJ)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	2d Lineer Analiz Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	3d Lineer Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	32,6	0,0218	0,0514	0,0514	0,0516	0,0516	0,0563	0,0565	0,0487	0,0550
2	65,2	0,0660	0,1538	0,1535	0,1544	0,1540	0,1685	0,1681	0,1345	0,1536
3	97,8	0,1149	0,2556	0,2552	0,2566	0,2466	0,2802	0,2667	0,1886	0,2391
4	130	0,1638	0,3588	0,3583	0,3602	0,3155	0,3932	0,3372	0,2131	0,3572
5	163	0,2159	0,4613	0,4610	0,4631	0,3569	0,5055	0,3784	0,2309	0,3897
6	196	0,2759	0,5638	0,5638	0,5660	0,3825	0,6179	0,4039	0,2466	0,4030
7	228	0,3294	0,6663	0,6663	0,6689	0,4000	0,7302	0,4203	0,2529	0,5535
8	261	0,3786	0,7688	0,7688	0,7718	0,4127	0,8426	0,4326	0,2619	0,5556
9	293	0,4125	0,8713	0,8713	0,8747	0,4223	0,9549	0,4428	0,2703	0,4736
10	326	0,4360	0,9975	0,9975	1,0015	0,4410	1,0933	0,4620	0,2784	0,5166
Toplam		2,41	5,15	5,15	5,17	3,18	5,64	3,37	2,13	3,70

TAMTEST – Tarım Alet ve Makinaları Test Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen yükleme test sonuçları ve farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına reaksiyon kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Tamtest önden yükleme kuvvet-deformasyon grafiği



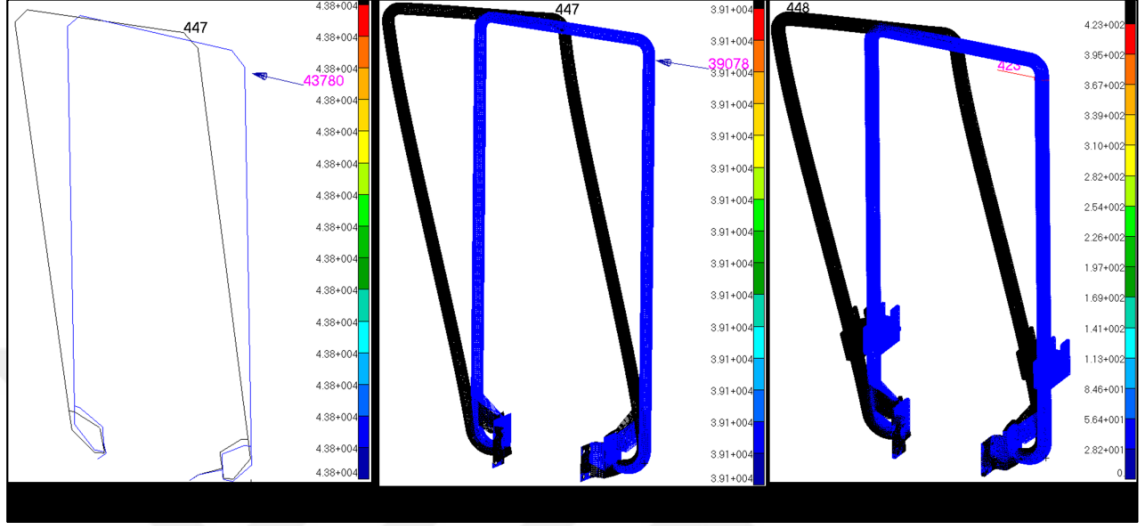
Şekil 4.8 Önden yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi doğrusal (lineer) analizler, her adımda direngenliği aynı hesapladığı için analiz sonuçları gerçek test sonuçlarından farklı olarak doğrusal olarak grafikler otaya çıkarmıştır. Bir boyutlu elemanlar (1D Bar elements) kullanılarak oluşturulmuş olan simülasyon modelleri, gerçekleştirilen doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde aynı sonuçları vermiştir.

2 boyutlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen SOL106 ve SOL600 doğrusal olmayan analiz yöntemi sonuçları karşılaştırılacak olursa, her iki doğrusal olmayan analiz yönteminde de elastik deformasyon bölgesinde aynı sonuçlar çıkmışken, SOL600 analiz yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarında tepki kuvvetleri plastik deformasyon bölgesinde daha yüksek çıkmıştır. Fakat geometrik doğrusalsızktan dolayı 3 boyutlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen SOL600 analiz çözümü sonucunda varyasyon ortaya çıkmıştır. Diğer bir deyişle 2 direkli koruyucu yapı önden yükleme altında çok fazla yer değiştirme olduğu için ve bu analizde takipçi kuvvet yöntemi kullanılmadığı için 3 boyutlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen SOL600 analiz yöntemi çözümünde yakınsama (convergence) konusunda zorluk yaşamıştır. Bunun yanı sıra 2 boyutlu eleman kullanılarak gerçekleştirilen çözüme göre daha yüksek serbestlik derecesine sahip olmasından dolayı, 3 boyutlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen SOL600 analiz yöntemi çözümünde yakınsama (convergence) konusunda zorluk yaşamıştır.

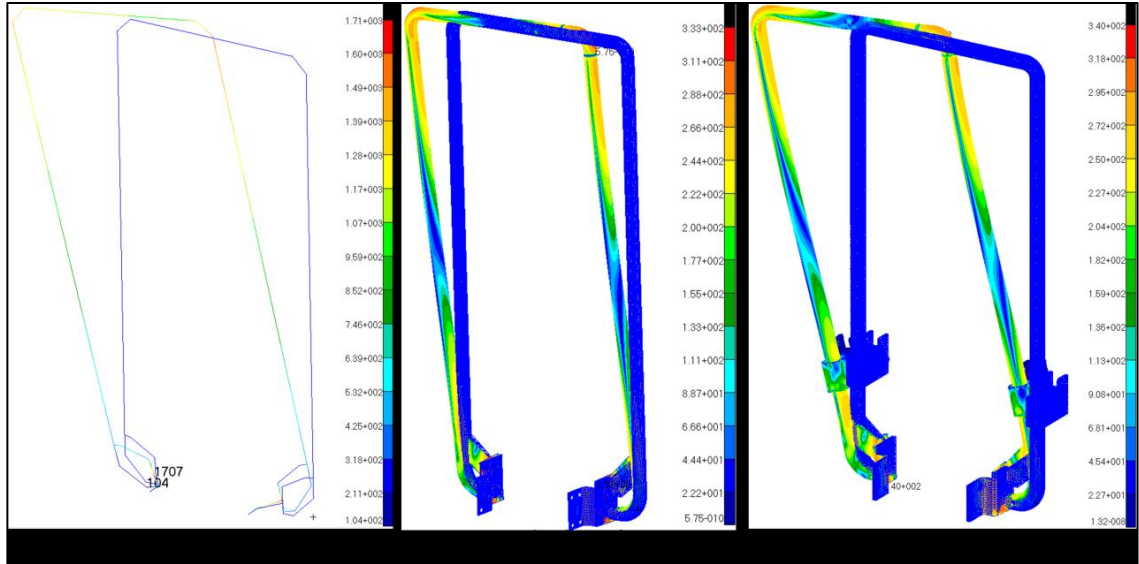
4.3. İki Direkli YKKY - Yandan Yükleme Yük Durumu

Yandan yükleme yük durumu için deformasyon ve kuvvetlerin sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Yandan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları

Yandan yükleme yük durumu için Von Mises Gerilme sanal simülasyon sonuçları 3 farklı modelleme tekniğine göre Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Yandan yükleme FEM deformasyon ve kuvvet sonuçları

Farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına göre reaksiyon kuvveti ve enerji miktarı tabloları sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

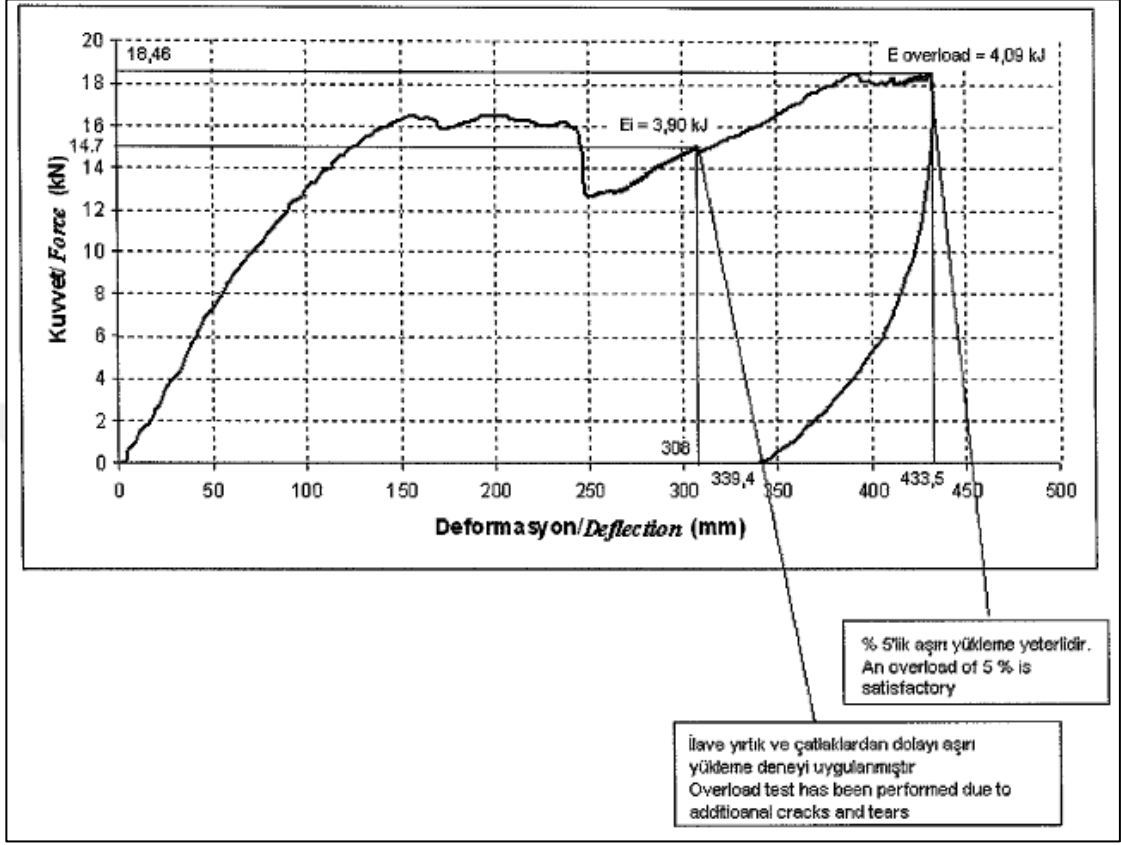
Çizelge 4.5 Yandan yükleme reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Lineer Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Reaksiyon Kuvveti (N)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Reaksiyon Kuvveti (N)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	43,6	6400	4380	4380	8590	9120	9730	5020	6585	7511
2	87,2	12000	8760	8760	17180	22400	19460	674	11788	9700
3	131	15800	13140	13100	25770	30100	29190	-721	16386	11340
4	174	16440	17520	17500	34360	33400	38920	-880	17157	12920
5	218	16200	21900	21900	42950	35300	48650	-725	17486	18580
6	262	13400	26280	26300	51540	36500	58380	-798	17767	15120
7	305	14700	30660	30600	60130	37500	68110	-691	17956	18194
8	349	16800	35040	35000	68720	38200	77840	-693	18121	17704
9	393	18000	39420	39400	77310	38700	87570	-509	18220	18502
10	436	18460	43800	43800	85900	39100	97300	-423	18918	17800

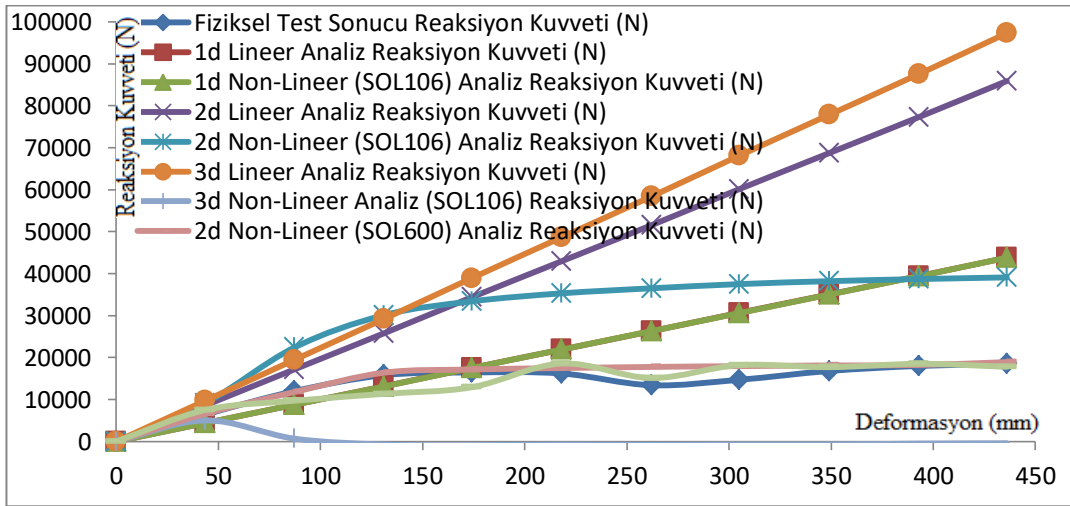
Çizelge 4.6 Yandan yükleme enerji miktarı

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Enerji (kJ)	1d Lineer Analiz Enerji (kJ)	1d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	2d Lineer Analiz Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL106) Analiz Enerji (kJ)	3d Lineer Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear Analiz (SOL106) Enerji (kJ)	2d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)	3d Non-Linear (SOL600) Analiz Enerji (kJ)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	32,6	0,1395	0,0955	0,0955	0,1873	0,1988	0,2121	0,1094	0,1436	0,1637
2	65,2	0,4011	0,2865	0,2865	0,5618	0,6871	0,6363	0,1241	0,4005	0,3752
3	97,8	0,6088	0,4796	0,4787	0,9406	1,1498	1,0654	-0,0010	0,6170	0,4608
4	130	0,6932	0,6592	0,6579	1,2928	1,3653	1,4644	-0,0344	0,7212	0,5216
5	163	0,7181	0,8672	0,8668	1,7008	1,5114	1,9265	-0,0353	0,7621	0,6930
6	196	0,6512	1,0600	1,0604	2,0788	1,5796	2,3547	-0,0335	0,7756	0,7414
7	228	0,6042	1,2242	1,2234	2,4009	1,5910	2,7195	-0,0320	0,7680	0,7163
8	261	0,6930	1,4454	1,4432	2,8347	1,6654	3,2109	-0,0304	0,7937	0,7898
9	293	0,7656	1,6381	1,6368	3,2127	1,6918	3,6390	-0,0264	0,7995	0,7965
10	326	0,7839	1,7892	1,7888	3,5090	1,6727	3,9747	-0,0200	0,7985	0,7805
Toplam		6,06	9,54	9,54	18,72	13,11	21,20	0,02	6,58	6,04

TAMTEST – Tarım Alet ve Makinaları Test Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen yükleme test sonuçları ve farklı modelleme teknikleri ile farklı analiz metotlarına reaksiyon kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Tamtest yandan yükleme kuvvet-deformasyon grafiği



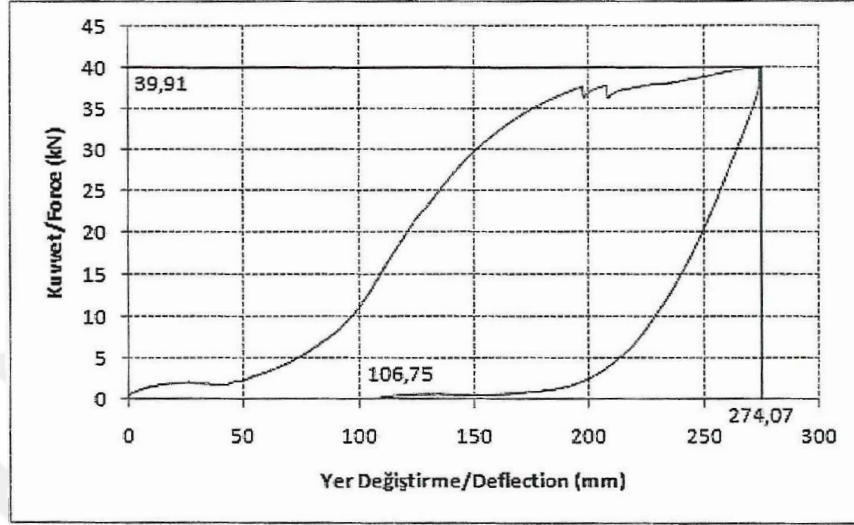
Şekil 4.12 Yandan yükleme kuvvet-deformasyon grafikleri

Şekil 4.12’de gösterildiği gibi doğrusal (lineer) analizler, her adımda direngenliği aynı hesapladığı için analiz sonuçları gerçek test sonuçlarından farklı olarak doğrusal olarak grafikler otaya çıkarmıştır. Bir boyutlu elemanlar (1D Bar elements) kullanılarak oluşturulmuş olan simülasyon modelleri, gerçekleştirilen doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde aynı sonuçları vermiştir.

Önceki yük senaryolarından (arkadan ve önden yükleme yük senaryoları) farklı olarak, bu yükleme senaryosunda (yandan yükleme yük senaryosu), iki boyutlu elemanlar (2D Quad elements) ve üç boyutlu elemanlar (3D Tetra elements) kullanılarak oluşturulmuş simülasyon modellerinin SOL600 doğrusal olmayan analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiş analiz sonuçları gerçek fiziksel test sonuçları ile tutarlı çıkmıştır. Bunun sebebi yandan yükleme testinde koruyucu yapının kendi düzleminde yüklemeye maruz kalması olarak açıklanabilir. Diğer bir deyişle önden ve arkadan yükleme senaryolarında, iki direkli koruyucu yapı yük taşıma kapasitesinin düşük olduğu kendi düzlemine dik (out of plane) olarak yüklenmekteydi. Dolayısıyla önden ve arkadan yükleme senaryolarında iki direkli koruyucu yapı, yüklemeye reaksiyon göstermenin yanı sıra aynı zamanda öteleme hareketi yaparak enerjiyi absorbe etmiştir. İki direkli koruyucu yapı yandan yükleme yük senaryosunda ise yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğu kendi düzlemi içinde (in plane) yüklemeye maruz kaldığı için yüksek reaksiyon kuvvetleri ile yüklemeye tepki göstermiştir. Kendi düzleminde yüklenen ve yükleme altında öteleme hareketinin baskın olmadığı yükleme senaryolarında SOL600 analiz çözüm yöntemi gerçek test sonuçları ile tutarlı analiz sonuçları çıkarmıştır.

4.4. Dört Direkli YKKY - Arkadan Yükleme Yük Durumu

TAMTEST tarafından gerçekleştirilen arkadan yükleme test sonucu Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 TAMTEST arkadan yükleme test sonucu

Grafik 10 eşit parçaya bölünerek, reaksiyon kuvvetleri Çizelge 4.7'de tablo haline getirilmiştir.

Çizelge 4.7 TAMTEST arkadan yükleme test sonucu

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Reaksiyon Kuvveti (N)
0	0	0
1	27,4	1774
2	54,8	2661
3	82,2	6386
4	109,6	15643
5	137	26607
6	164,4	33613
7	191,8	37249
8	219,2	37426
9	246,6	38580
10	274	39910

Devam eden bölümlerde farklı malzemeler, sınır koşulları, analiz yöntemleri, eleman tipleri gibi parametreler kombine edilerek gerçekleştirilmiş TAMTEST sonuçları ile uyumlu simülasyon sonucu elde edilmeye çalışılmıştır.

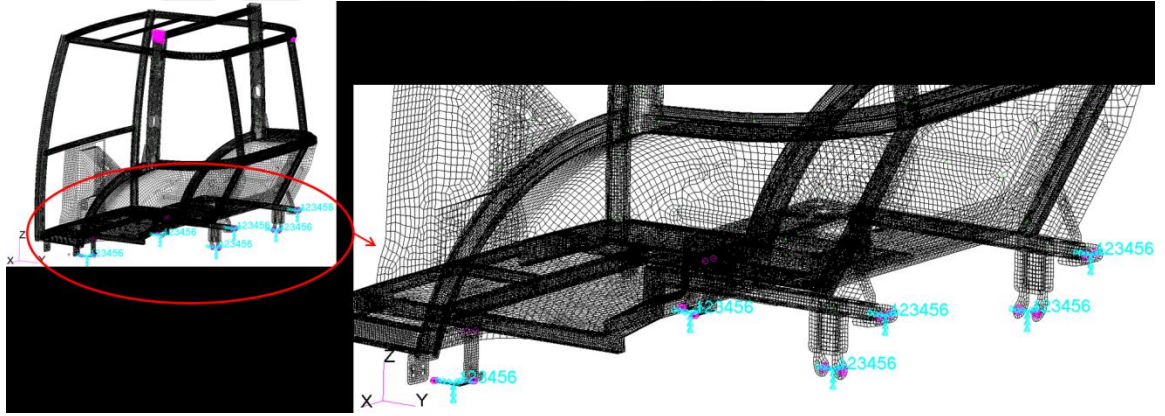
4.4.1 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 1

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Simülasyon 1 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	1. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Rijit 123456

Kabin tasarımı, şaseye önden rijit olarak bağlı iken arkadan süspansiyonlar aracılığıyla bağlıdır. Süspansiyonun analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 1. simülasyonda arkadaki süspansiyon bağlantısı ihmal edilmiştir. Bu nedenle ön ve arka bağlantıları rijit olarak modellenmiştir. 1. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

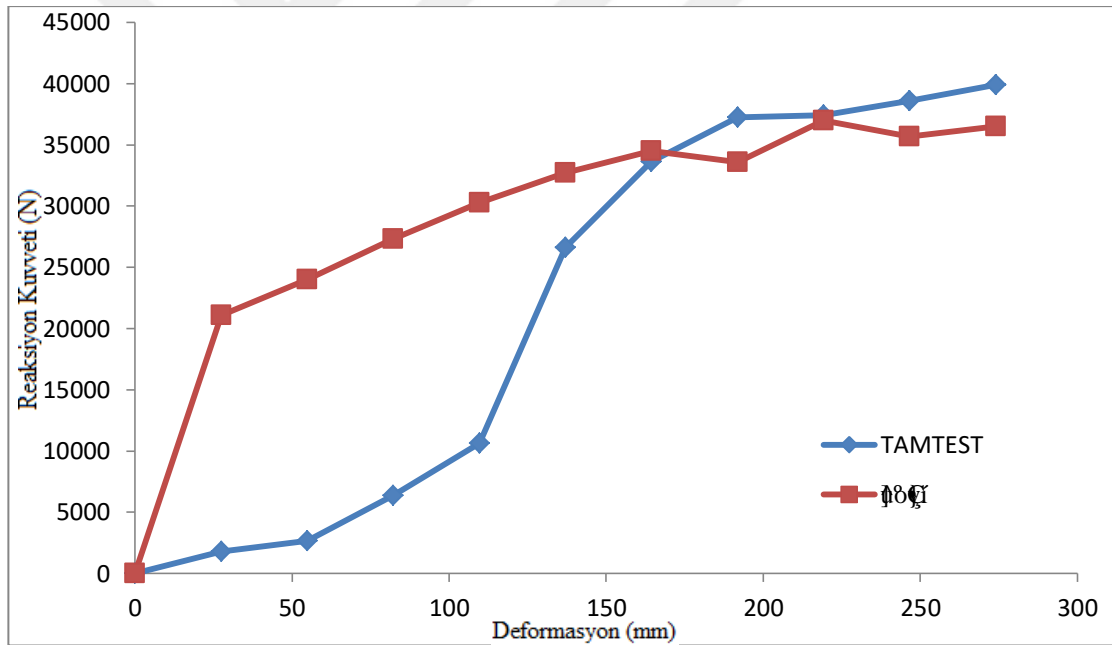


Şekil 4.14 Simülasyon 1 sınır koşulları

Çizelge 4.8’de belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.19’da ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.15’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Simülasyon 1 reaksiyon kuvvetleri

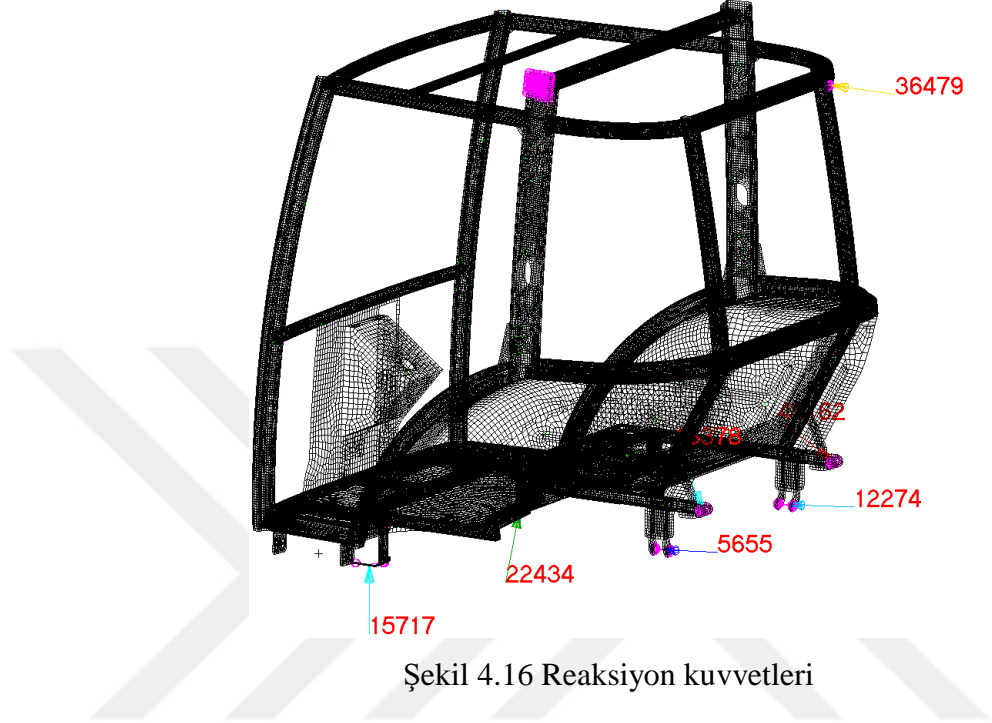
Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	1. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	1. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	21100	0,02	0,29
2	54,8	2661	24000	0,06	0,62
3	82,2	6386	27300	0,12	0,70
4	109,6	15643	30300	0,30	0,79
5	137	26607	32700	0,58	0,86
6	164,4	33613	34500	0,83	0,92
7	191,8	37249	33600	0,97	0,93
8	219,2	37426	37000	1,02	0,97
9	246,6	38580	35700	1,04	1,00
10	274	39910	36500	1,08	0,99
				Toplam 6,03	Toplam 8,06



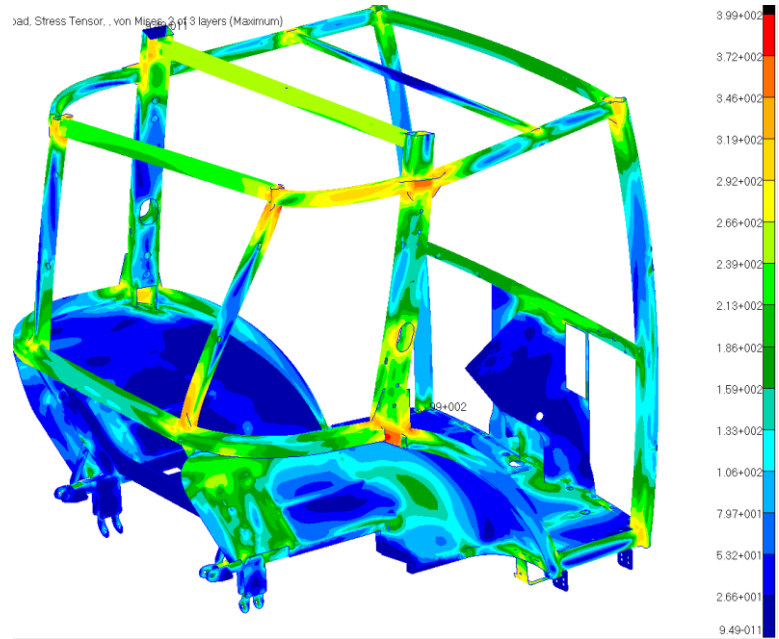
Şekil 4.15 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Simülasyon 1 analiz sonuçları son adımlarda TAMTEST sonuçları ile benzerlik gösterse de ilk adımdaki reaksiyon kuvvetleri olması gerekenden yüksek çıkmıştır. Yükleminin ilk adımlarındaki sınır koşullarının direngenliği (stiffness) gerçek sınır koşullarını direngenliğinden (stiffness) yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir.

Deplasman uygulanan noktadaki yükleme (y yönünde 36476 N), arka bağlantılar tarafından dengelenmektedir. Son basamaktaki (10. adım) reaksiyon kuvvetleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Sağ orta direğin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.16 Reaksiyon kuvvetleri



Şekil 4.17 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.4.2 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 2

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

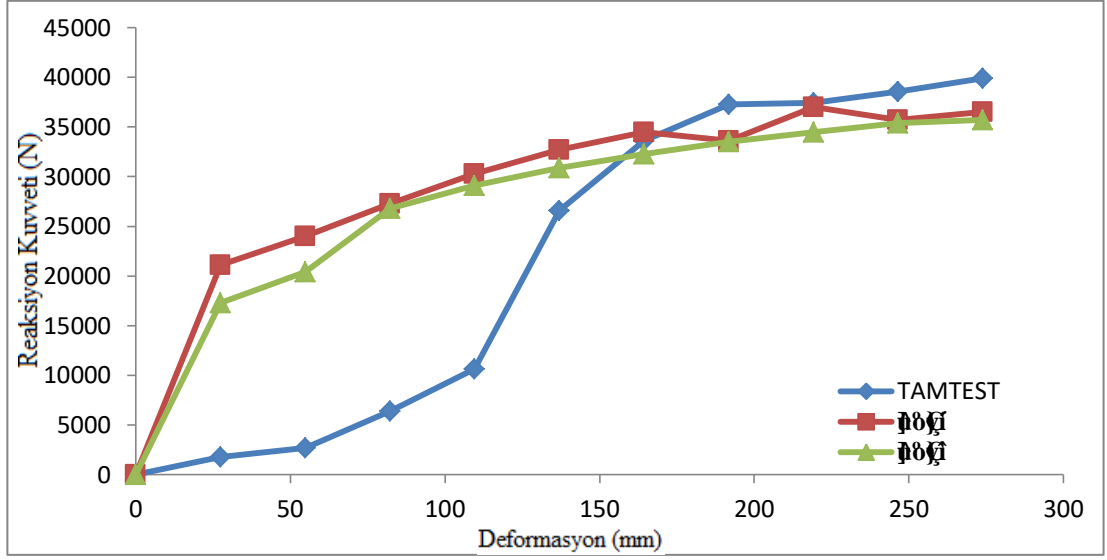
Çizelge 4.10 Simülasyon 2 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 30 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	1. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Rijit 123456

Simülasyon 2'de Simülasyon 1'den farklı olarak analiz basamak sayısı artırılarak, basamak sayısının sonuçlar üzerindeki etkisinin gözlenmesi hedeflenmiştir. Çizelge 4.10'da belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçları için deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.11'de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Simülasyon 2 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	2. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	2. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	17300	0,02	0,24
2	54,8	2661	20400	0,06	0,52
3	82,2	6386	26800	0,12	0,65
4	109,6	15643	29100	0,30	0,77
5	137	26607	30900	0,58	0,82
6	164,4	33613	32300	0,83	0,87
7	191,8	37249	33500	0,97	0,90
8	219,2	37426	34500	1,02	0,93
9	246,6	38580	35400	1,04	0,96
10	274	39910	35700	1,08	0,97
				Toplam 6,03	Toplam 7,62



Şekil 4.18 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Simülasyon 2'deki reaksiyon kuvvetleri Simülasyon 1 deki reaksiyon kuvvetlerine göre düşmüş olsa da, ilk adımlardaki gerçek reaksiyon kuvvetleri (TAMTEST) ile tutarlı değildir.

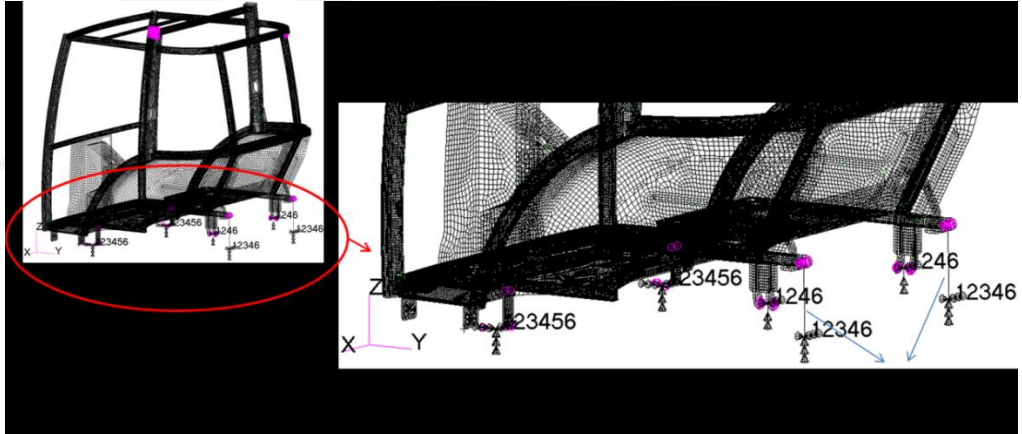
4.4.3 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 3

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 Simülasyon 3 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	1. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=100N/mm$) ve 12346

Kabin tasarımı, şaseye önden rijit olarak bağlı iken arkadan süspansiyonlar aracılığıyla bağlıdır. Süspansiyonun analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 3. Simülasyonda arkadaki süspansiyon bağlantısı ‘Spring’ elemanı kullanarak modellenmiştir. Bu nedenle ön ve arka bağlantıları rijit olarak modellenmiştir. 3. Simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

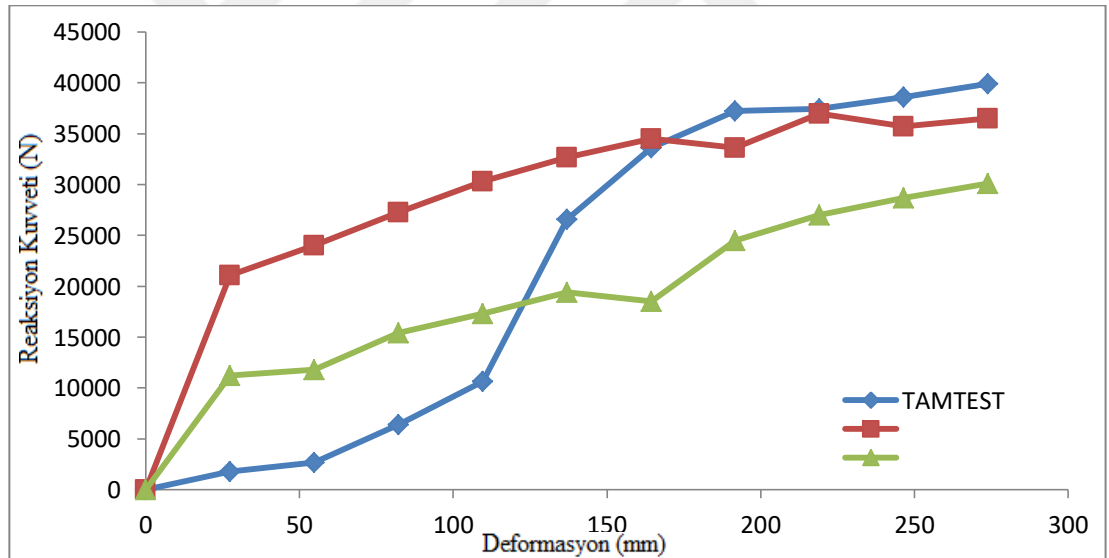


Şekil 4.19 Simülasyon 3 sınır koşulları

Çizelge 4.12’de belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.13’te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Simülasyon 3 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	3. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	3. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	11200	0,02	0,1534
2	54,8	2661	11800	0,06	0,3151
3	82,2	6386	15400	0,12	0,3726
4	109,6	15643	17300	0,30	0,4480
5	137	26607	19400	0,58	0,5028
6	164,4	33613	18500	0,83	0,5192
7	191,8	37249	24500	0,97	0,5891
8	219,2	37426	27000	1,02	0,7055
9	246,6	38580	28700	1,04	0,7631
10	274	39910	30100	1,08	0,8056
				Toplam 6,03	Toplam 5,17

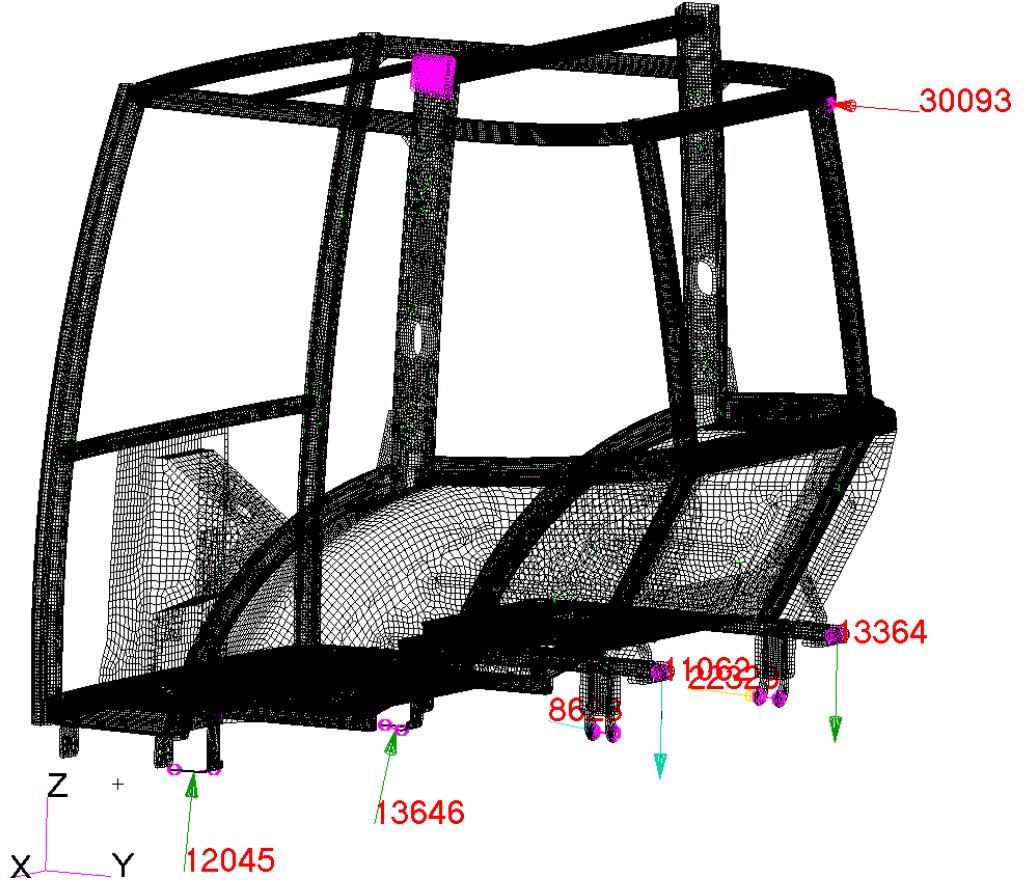


Şekil 4.20 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Bağlantı konsepti farklı olduğu için Simülasyon 3'deki reaksiyon kuvvetleri, Simülasyon 1'deki reaksiyon kuvvetlerinden düşük çıkmıştır. Başka bir deyişle Simülasyon 3'te arka bağlantıda rijit bağlantı yerine Spring eleman bağlantısı kullanmak yapının daha fazla esnemesine (yapının hareket ederek enerjiyi absorbe etmesine) ve reaksiyon kuvvetlerinin düşük olmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra

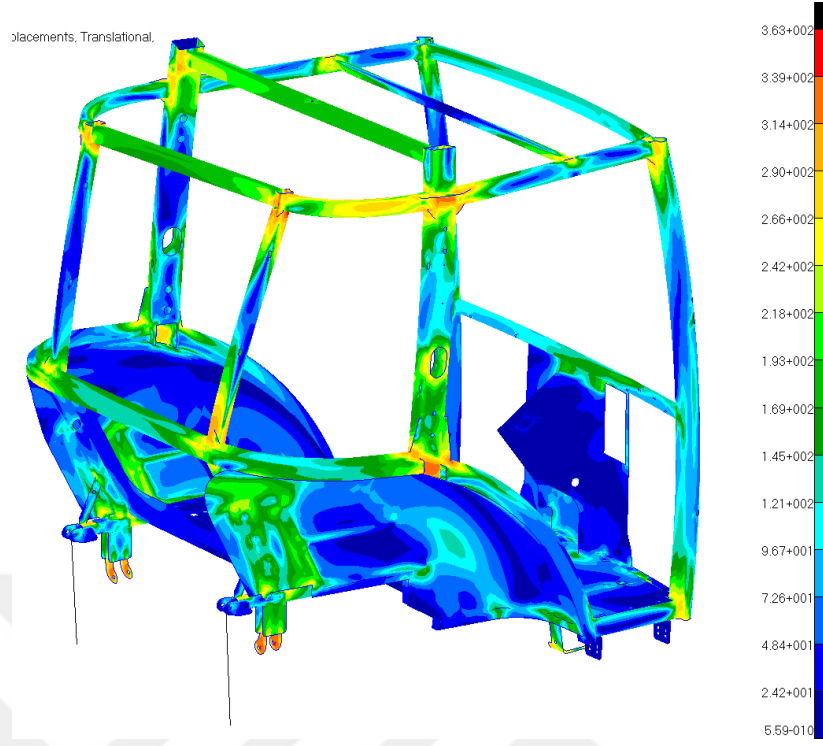
her iki analizde de aynı malzeme kullanıldığı için Simülasyon 3 deformasyon-reaksiyon kuvvet grafik eğimi ve Simülasyon 1 deformasyon-reaksiyon kuvvet grafik eğimi benzer bir davranış göstermektedir. Özellikle grafiğin plastik bölgesindeki eğim, kullanılan malzemenin eğimine yakın bir davranış göstermektedir.

Deplasman uygulanan noktadaki yükleme (y yönünde 30093 N), arka bağlantı tarafından dengelenmektedir. Son basamaktaki (10. adım) reaksiyon kuvvetleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

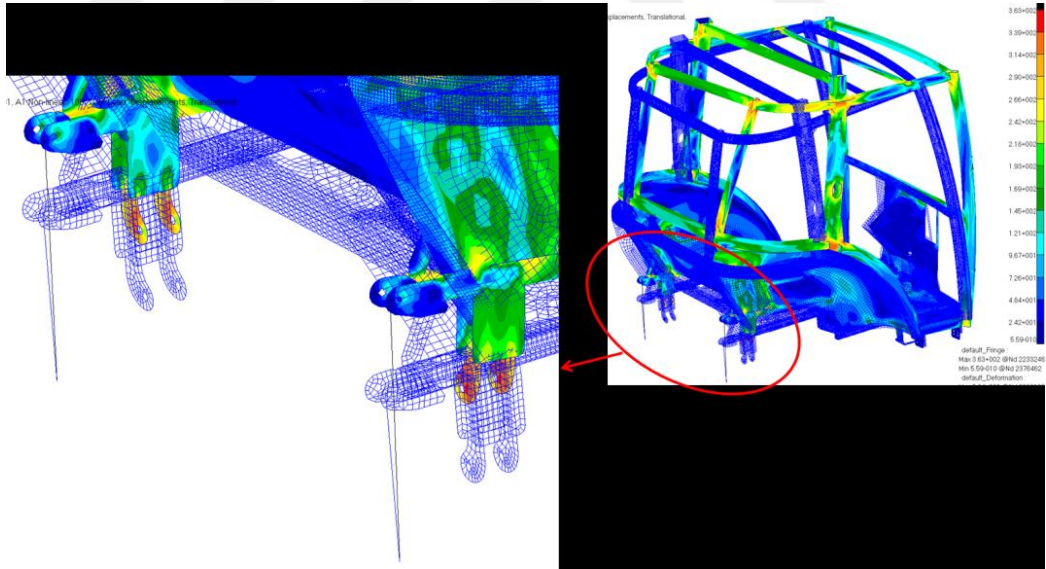


Şekil 4.21 Reaksiyon kuvvetleri

Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.22’de gösterilmiştir. 1. Simülasyon sonuçları ile karşılaştırılacak olursa, 3. Simülasyonda yapıya uygulanan enerjinin bir kısmı yapının hareket ederek enerjiyi absorbe etmesinden dolayı Von-Mises gerilmeleri göreceli olarak düşüktür. Arka bağlantının deformasyonu Şekil 4.23’te gösterilmiştir.



Şekil 4.22 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi



Şekil 4.23 Arka süspansiyon deformasyonu

4.4.4 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 4

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14 Simülasyon 4 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	1. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200\text{N/mm}$) ve 12346

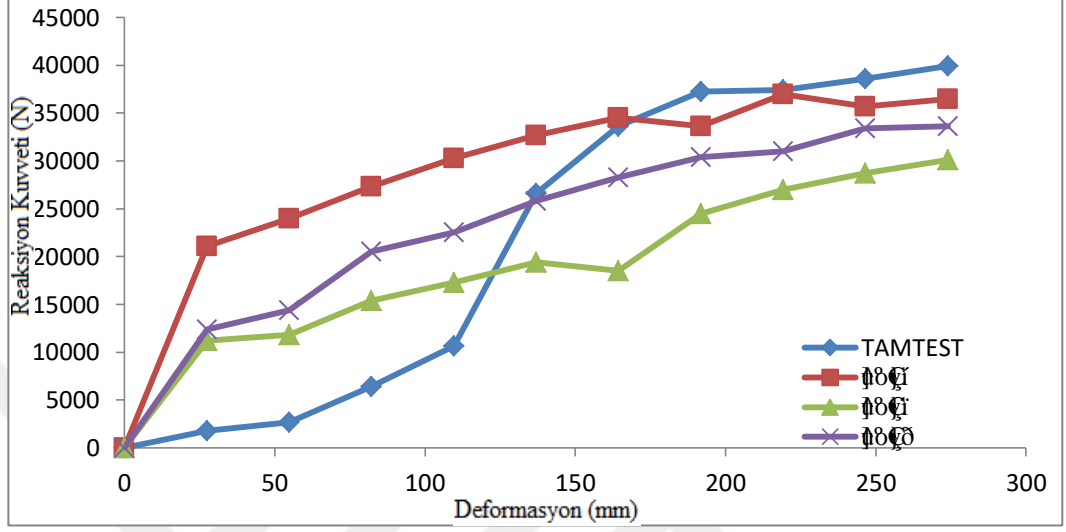
Süspansiyonun analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 3. Simülasyonda $k=100$ N/mm olarak modellenen arka süspansiyon bağlantısı 'Spring' elemanı 4. Simülasyonda $k=200$ N/mm olarak modellenmiştir. Süspansiyon katsayısının analiz sonuçlarının ne kadar etki ettiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.14'te belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.15'te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

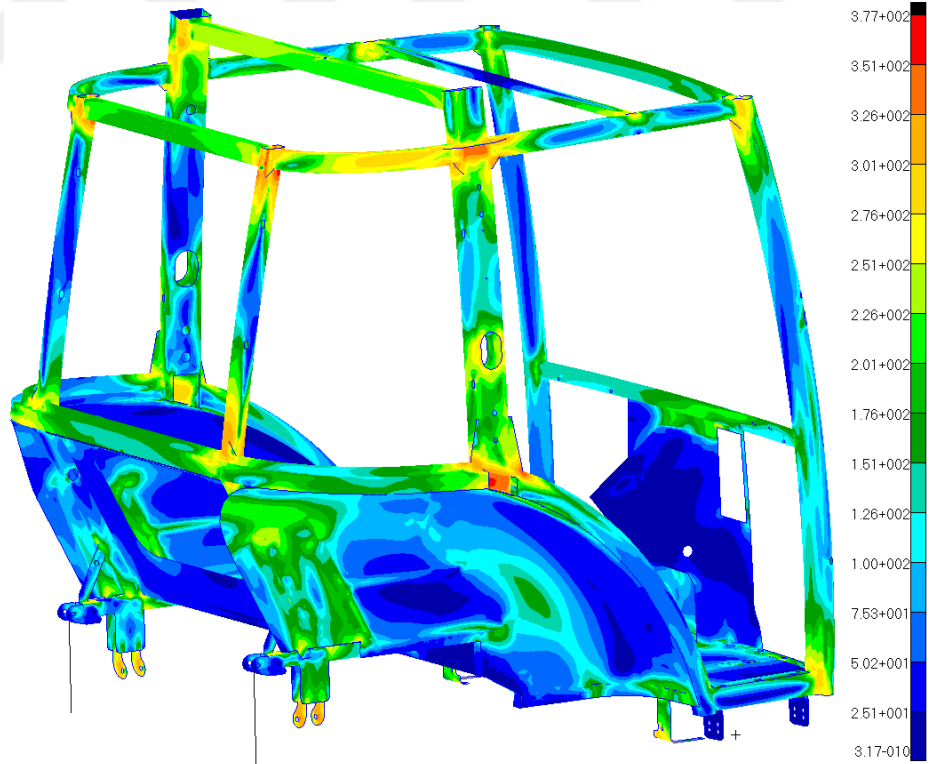
Çizelge 4.15 Simülasyon 4 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	4. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	4. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	12400	0,02	0,1699
2	54,8	2661	14400	0,06	0,3672
3	82,2	6386	20500	0,12	0,4781
4	109,6	15643	22500	0,30	0,5891
5	137	26607	25800	0,58	0,6617
6	164,4	33613	28300	0,83	0,7412
7	191,8	37249	30400	0,97	0,8042
8	219,2	37426	31000	1,02	0,8412
9	246,6	38580	33400	1,04	0,8823
10	274	39910	33600	1,08	0,9179
				Toplam 6,03	Toplam 6,45

Şekil 4.25'te Von-Mises gerilmesi gösterilmiştir. Reaksiyon kuvvetleri ve Von-Mises gerilme değerler 1. simülasyona göre düşük ve 3. Simülasyona göre yüksektir. 1. Simülasyonun sınır koşulları 4. Simülasyonun sınır koşullarından daha rijit olduğu için Reaksiyon kuvvetleri ve gerilme değerleri daha yüksektir.



Şekil 4.24 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği



Şekil 4.25 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.4.5 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 5

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 Simülasyon 5 parametreleri

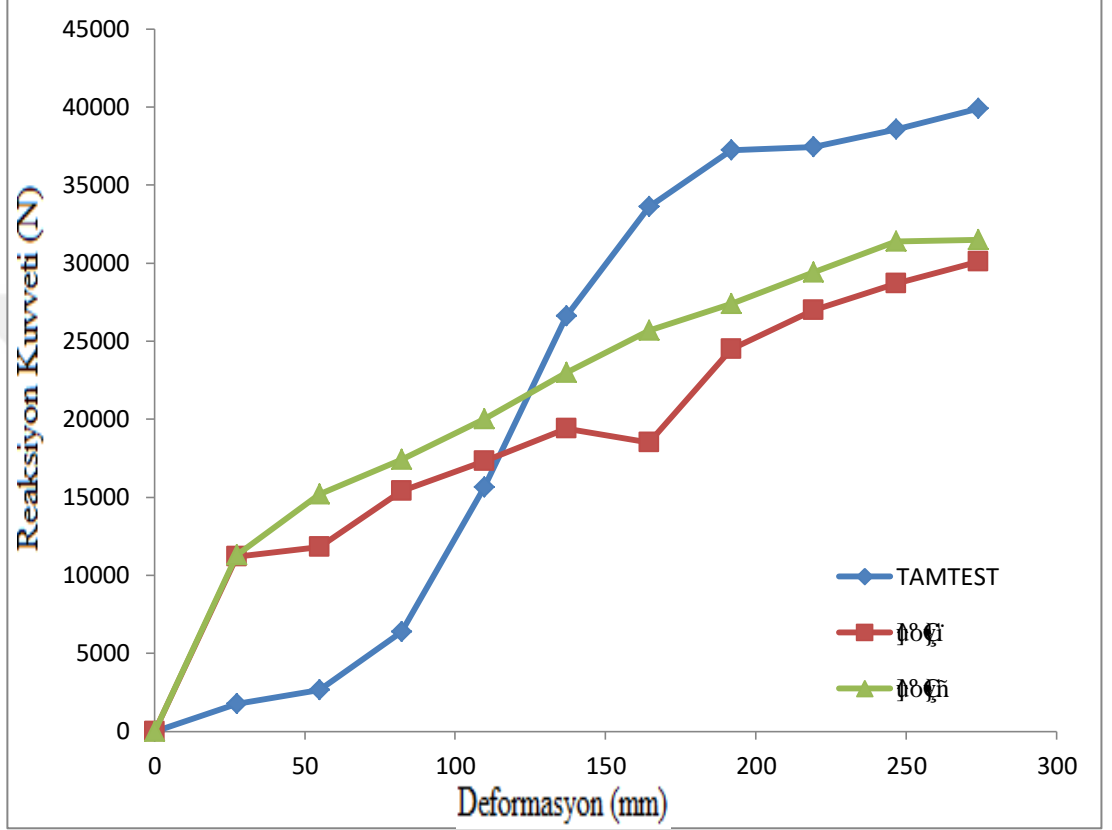
Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>2. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı (k=100N/mm) ve 12346

Malzemenin analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 3. Simülasyonda kullanılan 1. Malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin n=10,6) yerine 5. Simülasyonda 2. Malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin n=7,4) kullanılmıştır. Çizelge 4.16'da belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.17'de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

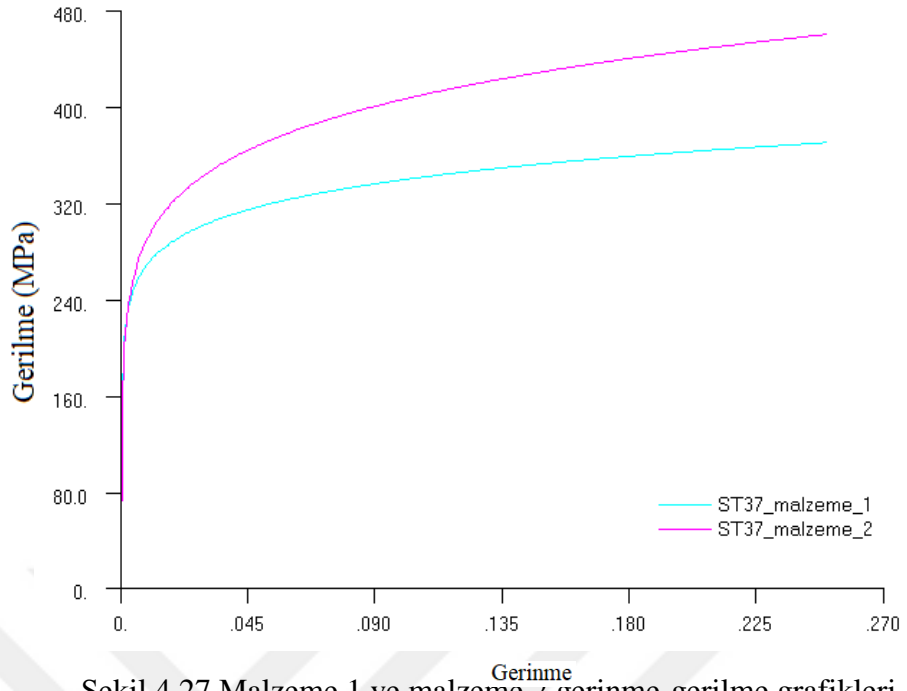
Çizelge 4.17 Simülasyon 5 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	5. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	5. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	11300	0,02	0,1548
2	54,8	2661	15200	0,06	0,3631
3	82,2	6386	17400	0,12	0,4466
4	109,6	15643	20000	0,30	0,5124
5	137	26607	23000	0,58	0,5891
6	164,4	33613	25700	0,83	0,6672
7	191,8	37249	27400	0,97	0,7275
8	219,2	37426	29400	1,02	0,7782
9	246,6	38580	31400	1,04	0,8330
10	274	39910	31500	1,08	0,8617
				Toplam 6,03	Toplam 5,93

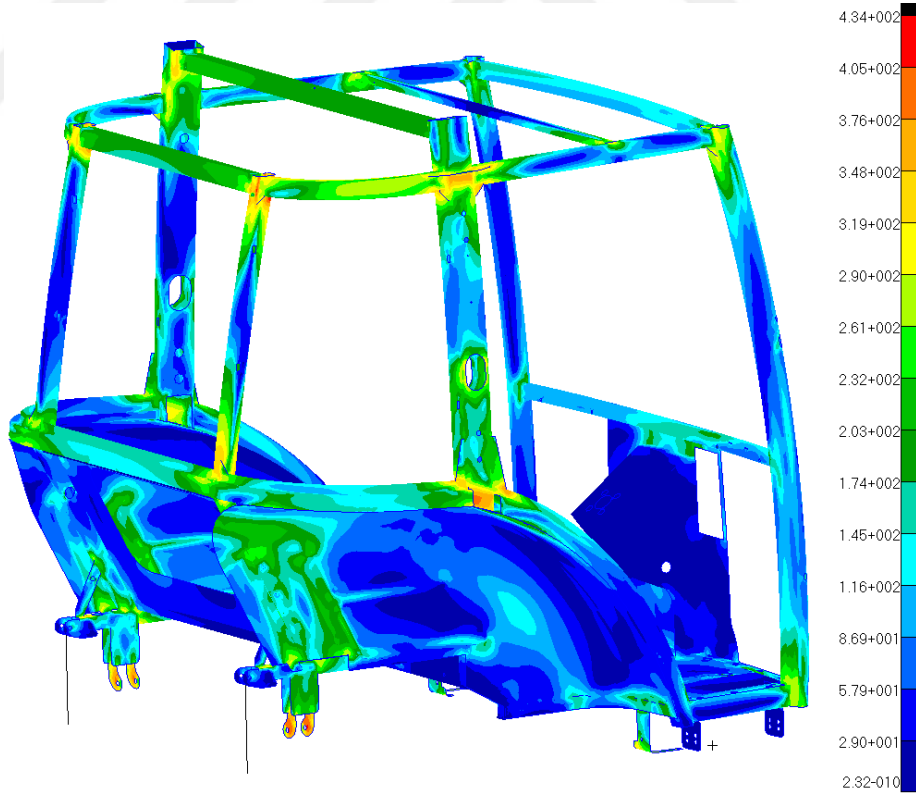
Şekil 4.27’de gösterildiği gibi 2. Malzemenin akma dayanımı 1. Malzemeye göre daha yüksektir. Dolayısıyla Şekil 4.26’da görüldüğü gibi Simülasyon 5 sonuçları Simülasyon 3 sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra Şekil 4.28’de görüldüğü gibi Von-Mises gerilme değerleri 3. Simülasyona göre yüksektir.



Şekil 4.26 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği



Şekil 4.27 Malzeme 1 ve malzeme 2 gerilme-gerilme grafikleri



Şekil 4.28 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.4.6 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 6

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18 Simülasyon 6 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>2. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200\text{N/mm}$) ve 12346

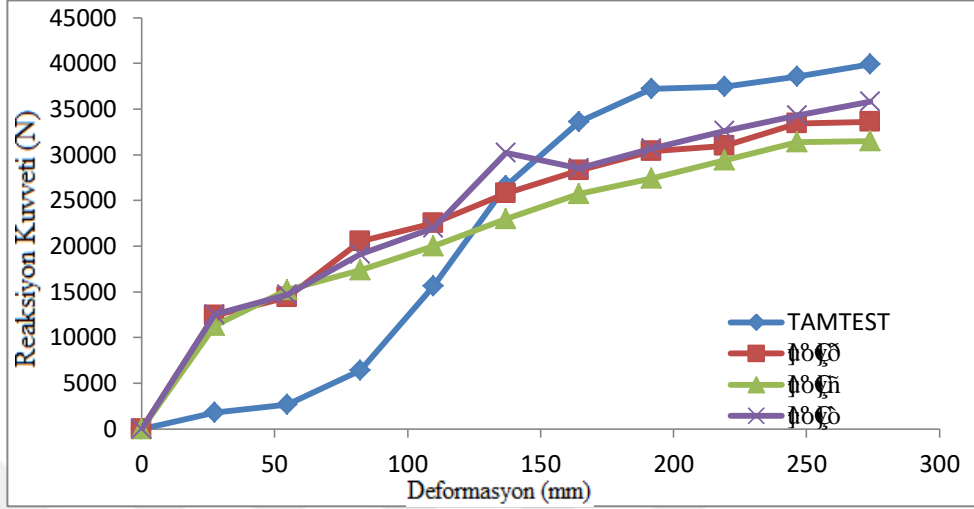
Simülasyon 6 da, Simülasyon 4’den farklı olarak 2. Malzeme kullanılmışken, Simülasyon 5’den farklı olarak $k=200$ N/mm olan Spring eleman kullanılmıştır. Dolayısıyla bu denemede hem malzeme hem de yay sabitinin analiz sonuçlarına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.18’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.19’da ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

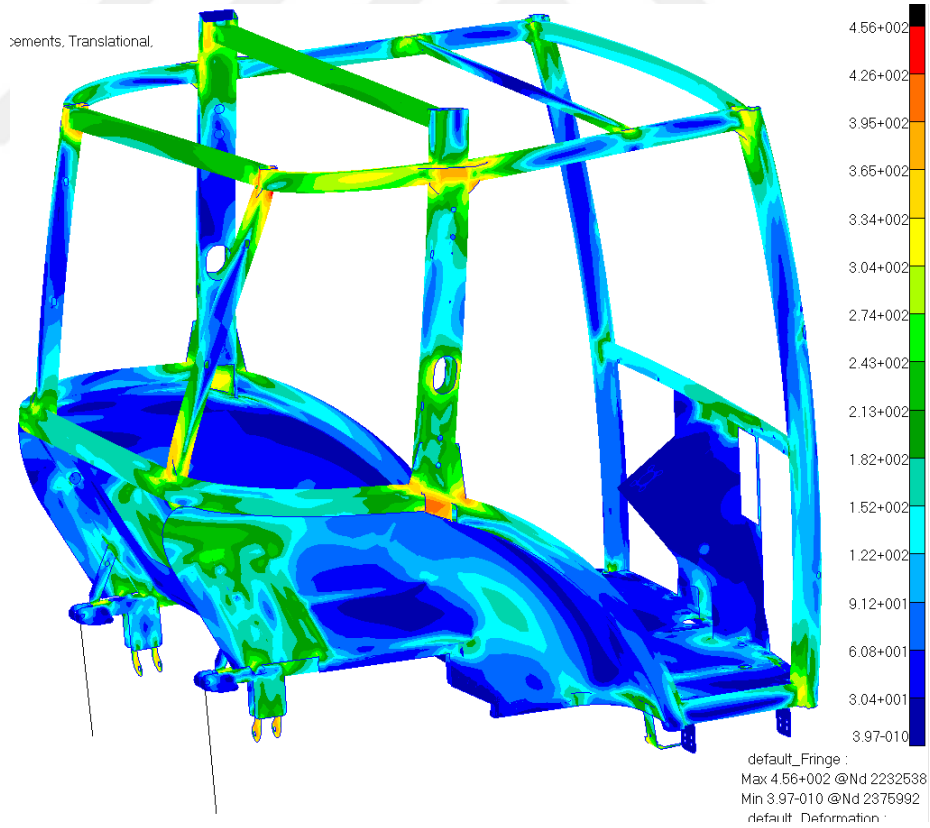
Çizelge 4.19 Simülasyon 6 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	6. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	6. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	12500	0,02	0,1713
2	54,8	2661	14700	0,06	0,3726
3	82,2	6386	19100	0,12	0,4631
4	109,6	15643	22000	0,30	0,5631
5	137	26607	30200	0,58	0,7151
6	164,4	33613	28500	0,83	0,8042
7	191,8	37249	30700	0,97	0,8110
8	219,2	37426	32600	1,02	0,8672
9	246,6	38580	34300	1,04	0,9165
10	274	39910	35800	1,08	0,9604
				Toplam 6,03	Toplam 6,64

Şekil 4.29'da gösterildiği gibi 4, 5 ve 6. Simülasyon sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Bunun yanı sıra Şekil 4.30'da görüldüğü gibi Von-Mises gerilme değerleri 5. Simülasyon sonuçları ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.29 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği



Şekil 4.30 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

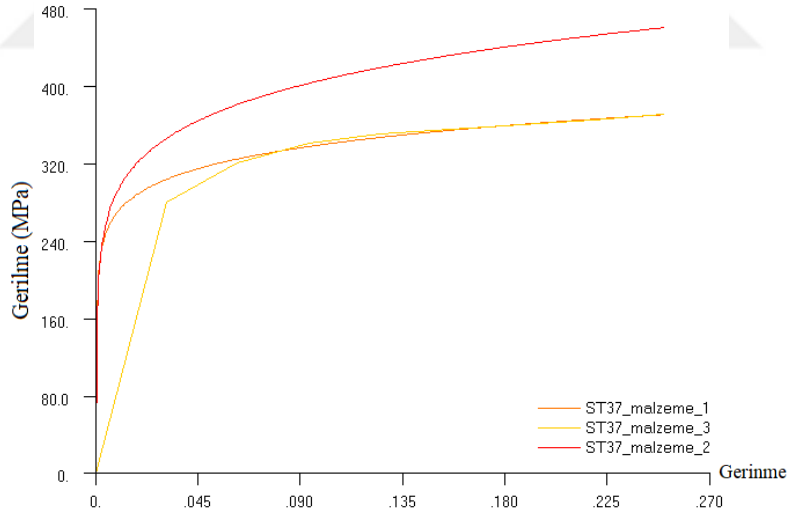
4.4.7 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 7

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20 Simülasyon 7 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	3. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200N/mm$) ve 12346

Simülasyon 7’de, Simülasyon 4’den farklı olarak 3. malzeme kullanılmıştır. Şekil 4.31’de gösterildiği gibi Simülasyon 7’de kullanılan 3. malzeme, Simülasyon 4’de kullanılan 1. malzeme ile plastik bölgede benzer eğime sahip iken elastik bölgede daha sünek bir malzeme eğimine sahiptir. 3. malzeme parçalı doğrusal olarak modellenmiştir. Parçalı doğrusal modelleme tekniğinde, Ramberg-Osgood yöntemine göre daha az veri girildiği için analiz çözüm süresine etkisini gözlemlemek ve elastik bölgede daha sünek malzeme eğrisine sahip malzemenin analiz sonuçlarına olan etkisini gözlemlemek için bu deneme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.31 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 3 gerinme-gerilme grafikleri

Çizelge 4.20’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.21’de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.32’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21 Simülasyon 7 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	7. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	7. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	3020	0,02	0,0414
2	54,8	2661	5060	0,06	0,1107
3	82,2	6386	4230	0,12	0,1273
4	109,6	15643	6070	0,30	0,1411
5	137	26607	7470	0,58	0,1855
6	164,4	33613	8840	0,83	0,2234
7	191,8	37249	10200	0,97	0,2608
8	219,2	37426	11000	1,02	0,2904
9	246,6	38580	12300	1,04	0,3192
10	274	39910	13500	1,08	0,3535
				Toplam 6,03	Toplam 2,05

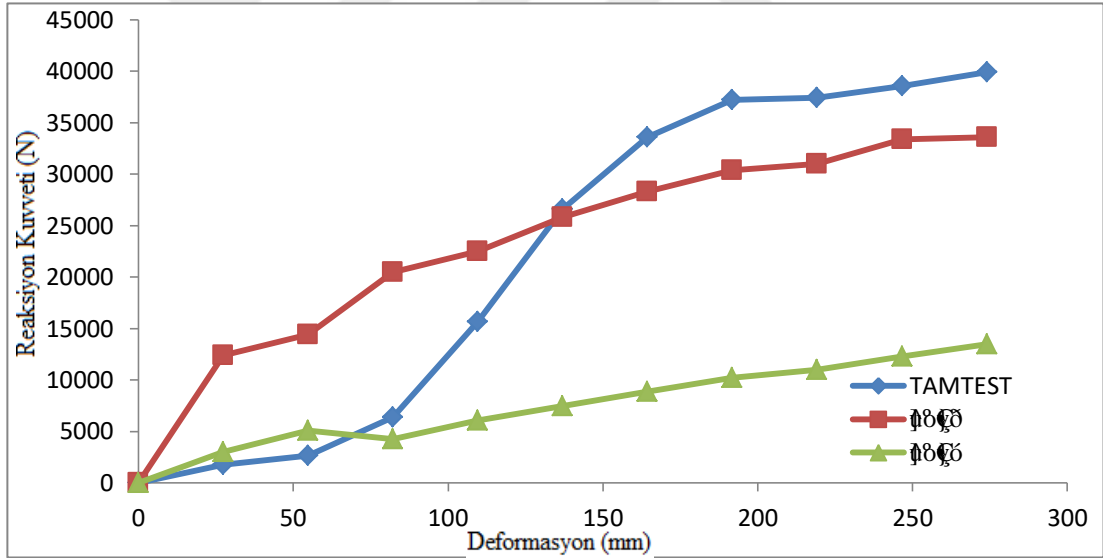
Malzemenin Ramber-Osgood yerine parçalı doğrusal olarak modellenmesinin çözüm süresine önemli bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.32’de gösterildiği gibi Simülasyon 7 sonucunda yapı tarafından absorbe edilmiş olan enerji miktarı çok düşüktür. 3. malzemenin elastik bölgede yüksek eğime sahip olmasından dolayı yapının direngenliği (stiffness) çok düşük olduğu için yapının yük taşıma kapasitesi düşüktür. Şekil 4.33’te gösterildiği gibi yapı üzerindeki Von Mises gerilme dağılımının çok düşük olması da yapının yük taşıma kapasitesinin direngenliğiyle doğru orantılı olarak düşüğünü göstermektedir. Bunun yanı sıra 2. malzemenin elastik bölgedeki eğimi 1. malzeme ile benzerlik gösterip, plastik bölgede eğimi nispeten farklılık gösterirken analiz sonuçları benzer davranış göstermiştir. Bunun aksine 3. malzemenin elastik bölgedeki eğimi 1. malzeme ile farklılık gösterip, plastik bölgede eğimi benzerlik gösterirken analiz sonuçları ciddi anlamda farklılık göstermiştir.

Ayrıca Şekil 4.32’deki grafikte görüldüğü gibi önceki simülasyon denemelerinin aksine ilk defa bu denemede gerçek fiziksel test sonuçlarının (TAMTEST) ilk adımlarındaki reaksiyon kuvvetleri ile simülasyon analiz sonuçlarının ilk adımlarındaki reaksiyon kuvvetleri tutarlı çıkmıştır. Buradan da gerçek fiziksel test yüklemesi sürecinde kabin yapısının ilk yüklemeler boyunca (yaklaşık 100 mm boyunca) çok az yük taşıyıp,

süspanisyonlardan ötürü muhtemelen hareket ettiği (rigid body motion) sonucu çıkarılabilir.

Özetlemek gerekirse bu denemeden (Simülasyon 7) çıkarılabilecek 2 önemli sonuç vardır:

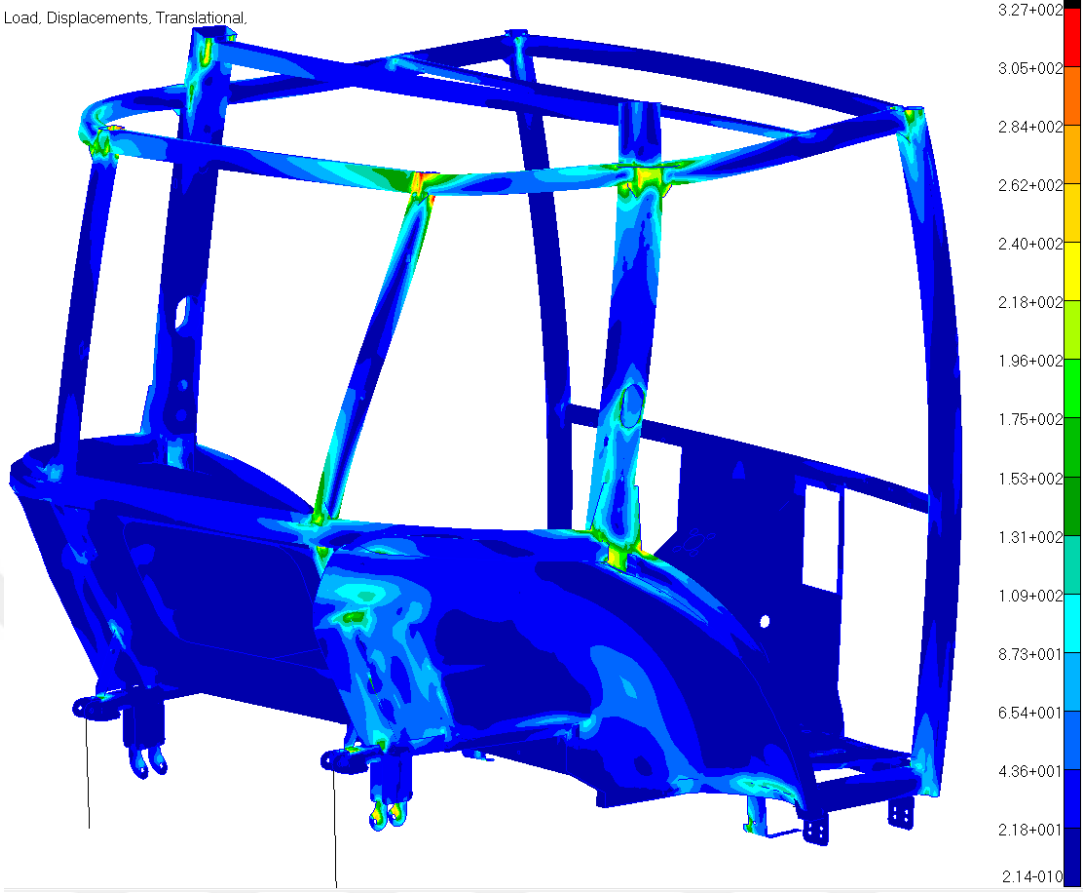
- 1) Simülasyon (Yapısal Analiz) sürecinde malzeme modellemesinin plastik bölgesindeki eğimin gerçek malzeme eğimiyle farklılık göstermesi analiz sonuçlarına minör etkisi olurken, malzeme modellemesinin elastik bölgesindeki eğiminin gerçek malzeme eğimiyle farklılık göstermesi analiz sonuçlarına major etkisi olmaktadır.
- 2) Testi gerçekleştirilecek koruyucu yapısının süspanisyonları varsa, yüklemenin ilk adımlarında kabin yapısı az yük taşıyıp; yüklemenin etkisi ile hareket ettiği (rigid body motion) sonucu çıkarılabilir.



Şekil 4.32 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.33'de gösterilen Simülasyon 7 Von-Mises gerilme dağılımı Simülasyon 6 Von-Mises gerilme dağılımından düşüktür.

Load, Displacements, Translational.



Şekil 4.33 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.4.8 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 8

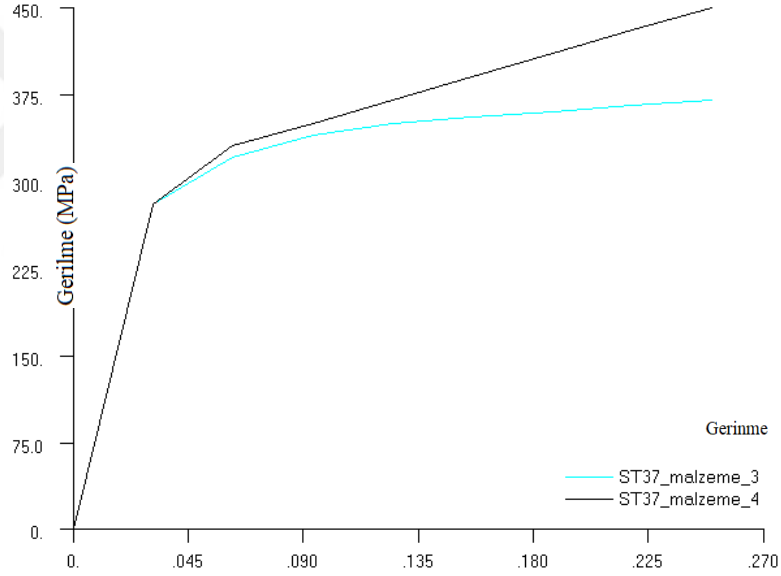
Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 Simülasyon 8 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>4. Malzeme</u>

Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200N/mm$) ve 12346

Simülasyon 8’de, Simülasyon 7’den farklı olarak 4. malzeme kullanılmıştır. Şekil 4.34’te gösterildiği gibi Simülasyon 8’de kullanılan 4. malzeme, Simülasyon 7’de kullanılan 3. malzeme ile elastik bölgede benzer eğime sahip iken plastik bölgede daha dik bir malzeme eğimine sahiptir. Simülasyon 7 analiz sonuçlarına göre, ilk adımlardaki reaksiyon kuvvetleri, gerçek fiziksel test (TAMTEST) sonuçları ile benzerlik gösterirken son adımlardaki reaksiyon kuvvetleri, gerçek fiziksel test (TAMTEST) sonuçları ile farklılık göstermektedir. Bu nedenle Simülasyon 8’de plastik bölgedeki direngenliği daha yüksek malzeme (4. malzeme) kullanılarak, son adımlardaki reaksiyon kuvvetlerinin de gerçek reaksiyon kuvvetleri ile benzerlik göstermesi hedeflenmiştir.



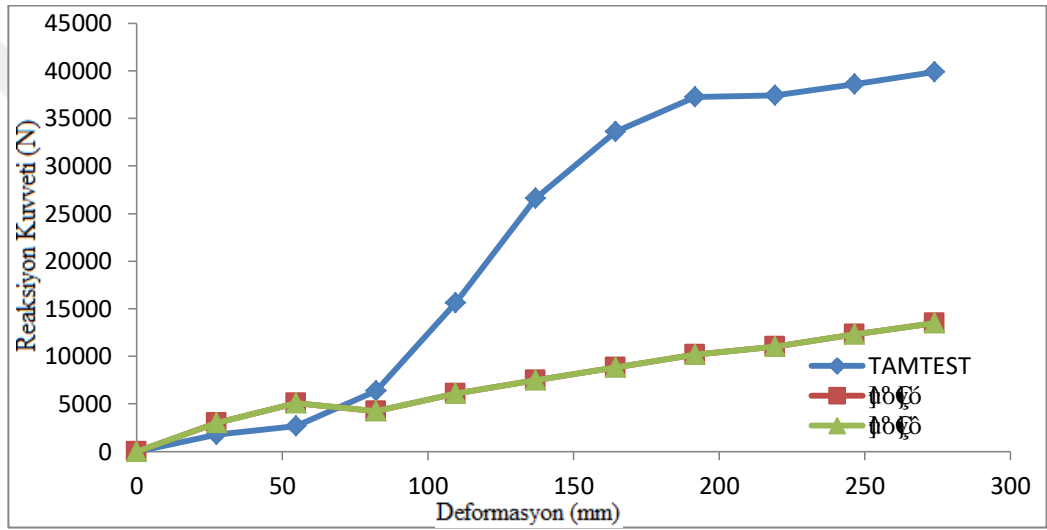
Şekil 4.34 Malzeme 3 ve malzeme 4 gerinme-gerilme grafikleri

Çizelge 4.22’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.23’te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.35’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.23 Simülasyon 8 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon	8. Simülasyon Reaksiyon	TAMTEST Enerji	8. Simülasyon Enerji
------	----------------	-------------------	-------------------------	----------------	----------------------

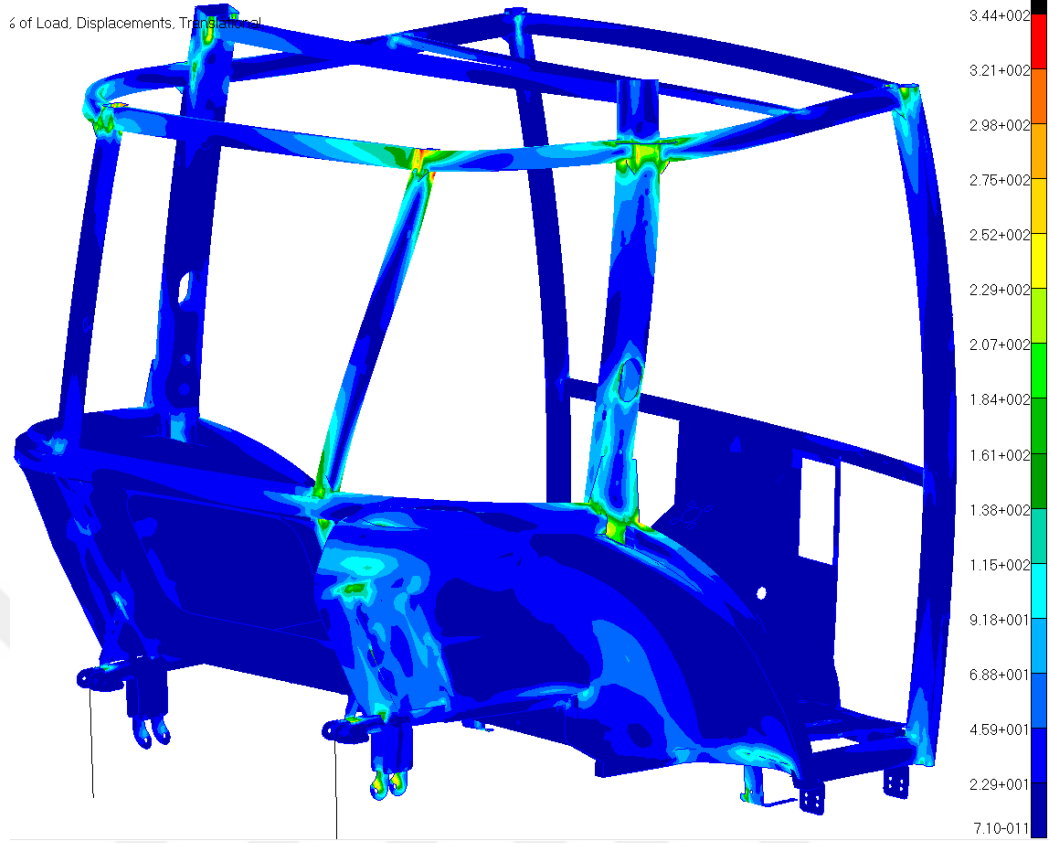
		Kuvveti (N)	Kuvveti (N)	Absorbesi (kJ)	Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	3020	0,02	0,0414
2	54,8	2661	5060	0,06	0,1107
3	82,2	6386	4230	0,12	0,1273
4	109,6	15643	6070	0,30	0,1411
5	137	26607	7470	0,58	0,1855
6	164,4	33613	8840	0,83	0,2234
7	191,8	37249	10200	0,97	0,2608
8	219,2	37426	11000	1,02	0,2904
9	246,6	38580	12300	1,04	0,3192
10	274	39910	13500	1,08	0,3535
				Toplam 6,03	Toplam 2,05



Şekil 4.35 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.35'teki grafikte gösterildiği gibi Simülasyon 7 ve Simülasyon 8'deki reaksiyon kuvvetleri aynı çıkmıştır. Buradan da Simülasyon 7 analiz sonuçlarından çıkarılan, malzemenin plastik bölgesinin eğiminin analiz sonuçlarına etkisinin minör, malzemenin elastik bölgesinin eğiminin analiz sonuçlarına etkisinin majör olduğu çıkarımını doğrulamaktadır.

Şekil 4.36'da gösterilen Simülasyon 8 Von-Mises gerilme dağılımı Simülasyon 7 Von-Mises gerilme dağılımından çok az farklıdır.



Şekil 4.36 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

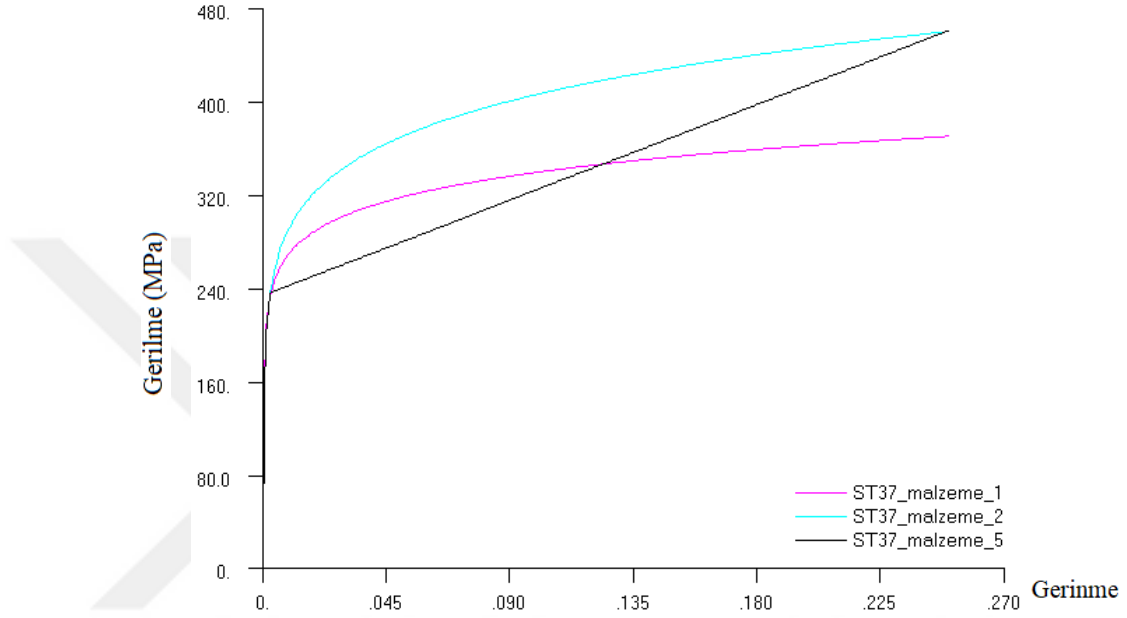
4.4.9 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 9

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.24'te verilmiştir.

Çizelge 4.24 Simülasyon 9 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	5. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200N/mm$) ve 12346

Simülasyon 9’da, diğer simülasyonlardan farklı olarak 5. malzeme kullanılmıştır. Şekil 4.37’de gösterildiği gibi 5. malzeme parçalı doğrusal olarak modellenmiştir. Fakat diğer parçalı doğrusal modellenen 3. ve 4. Malzemedan farklı olarak, 5. Malzemenin elastik bölgedeki eğimi 1. ve 2. malzeme ile aynı eğime sahiptir. Simülasyon 9’da, Ramberg-Osgood metodu yerine parçalı doğrusal malzeme kullanarak analiz sonuçlarına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.



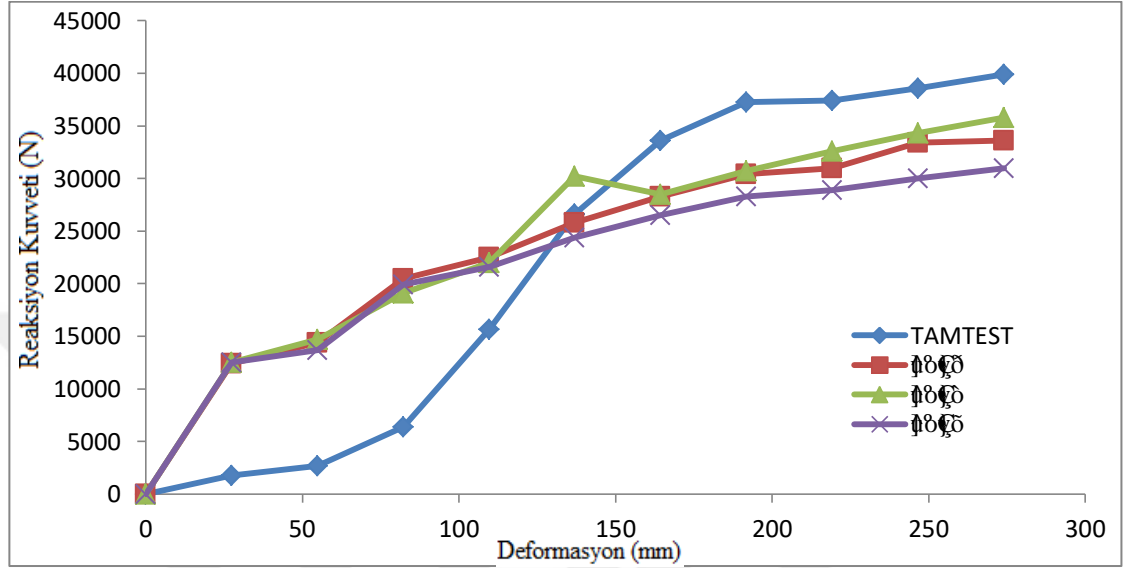
Şekil 4.37 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 5 gerinme-gerilme grafikleri

Çizelge 4.24’te belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.25’te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.38’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.25 Simülasyon 9 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	9. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	9. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	12500	0,02	0,1713
2	54,8	2661	13700	0,06	0,3589
3	82,2	6386	19900	0,12	0,4603
4	109,6	15643	21600	0,30	0,5686
5	137	26607	24400	0,58	0,6302
6	164,4	33613	26500	0,83	0,6973

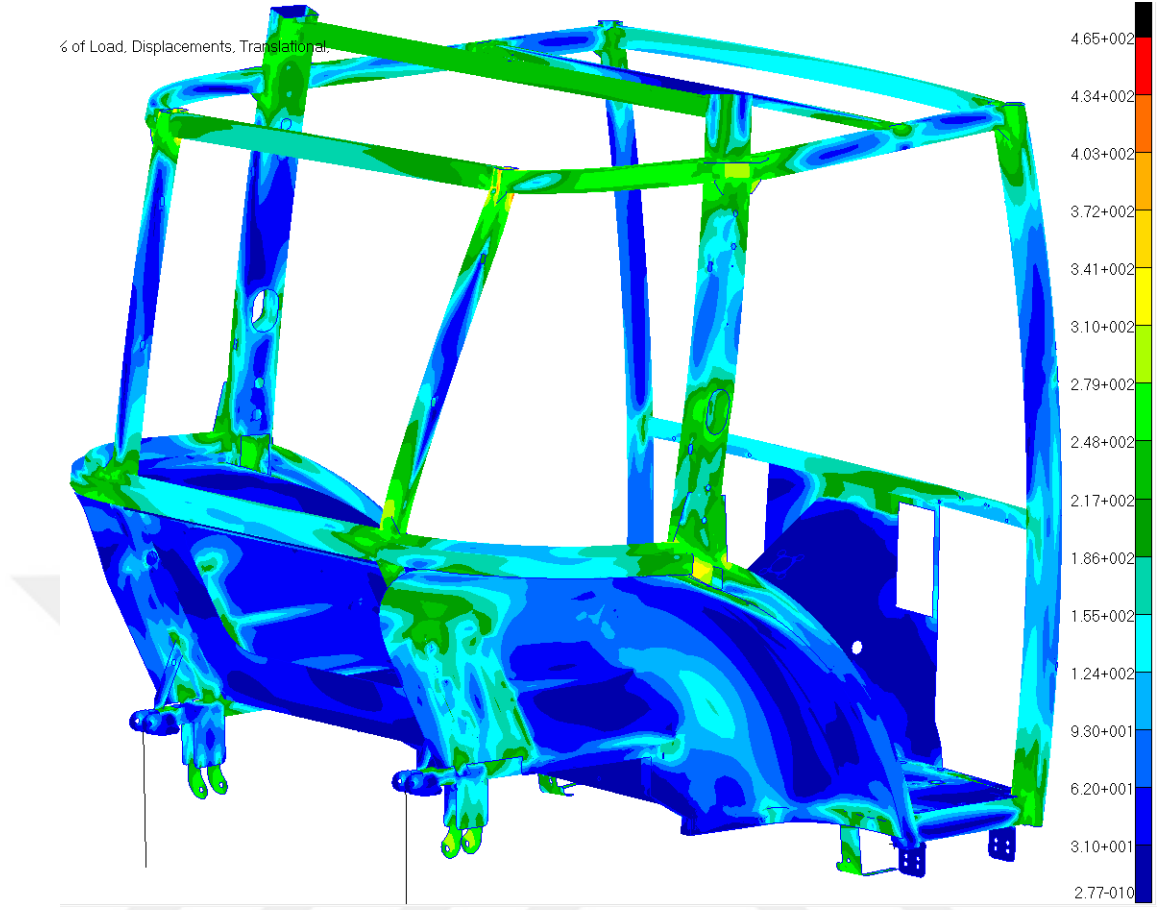
7	191,8	37249	28300	0,97	0,7508
8	219,2	37426	28900	1,02	0,7836
9	246,6	38580	30000	1,04	0,8069
10	274	39910	31000	1,08	0,8357
				Toplam 6,03	Toplam 6,06



Şekil 4.38 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.38'deki grafikte gösterildiği gibi Simülasyon 9 sonucunda ortaya çıkan reaksiyon kuvvetleri, 1. malzemenin kullanıldığı Simülasyon 4 ve 1. malzemenin kullanıldığı Simülasyon 6'daki reaksiyon kuvvetleri ile benzer çıkmıştır. Bu koşulda Simülasyon 7 analiz sonuçları, malzemenin plastik bölgesinin eğiminin analiz sonuçlarına etkisinin minör, malzemenin elastik bölgesinin eğiminin analiz sonuçlarına etkisinin majör olduğu çıkarımını doğrulamaktadır.

Reaksiyon kuvvetleri Simülasyon 6 ve Simülasyon 9'da yakın olmasına rağmen, Şekil 4.39'da gösterilen Simülasyon 9 Von-Mises gerilme dağılımı Simülasyon 6 Von-Mises gerilme dağılımından daha düşüktür.



Şekil 4.39 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

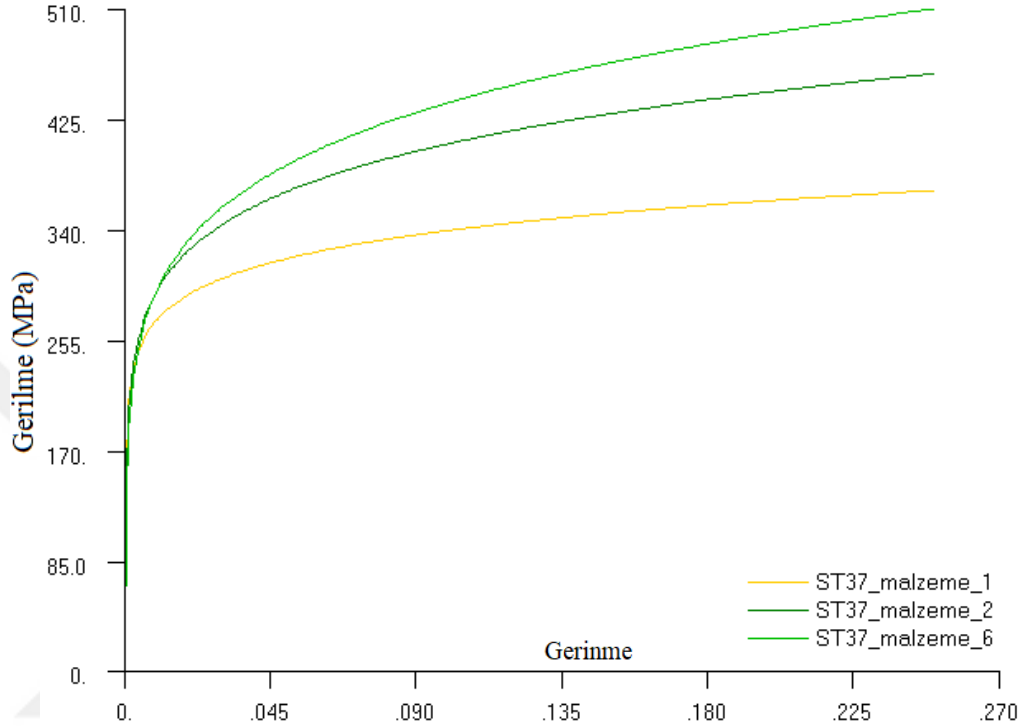
4.4.10 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 10

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.26 Simülasyon 10 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>6. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Spring Elemanı ($k=200N/mm$) ve 12346

Malzemenin analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 10. Simülasyonda 6. malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin $n=6,1$) kullanılmıştır (Şekil 4.40).



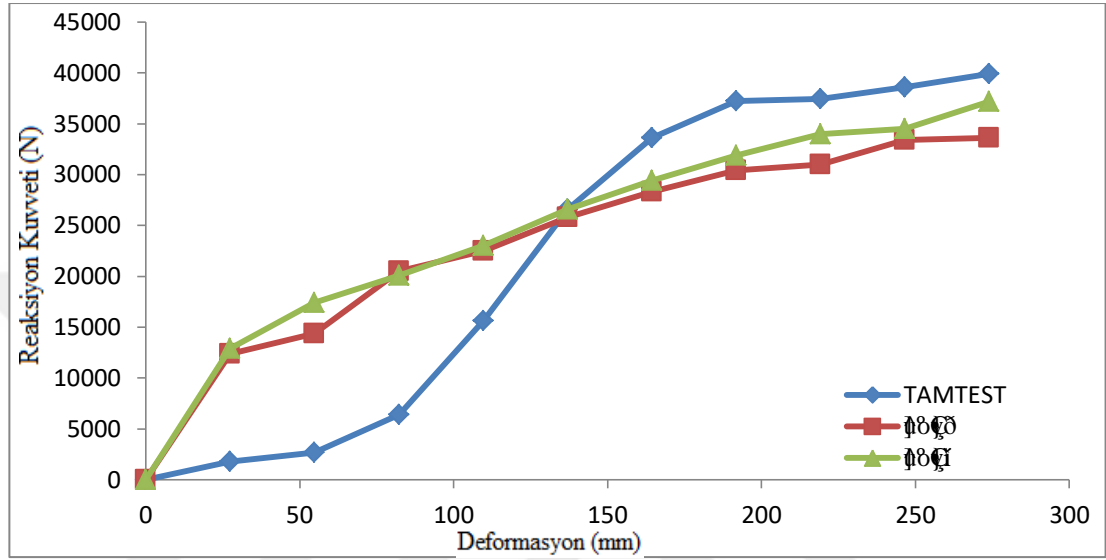
Şekil 4.40 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 6 gerilme-gerilme grafikleri

Çizelge 4.26’da belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.27’de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.41’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27 Simülasyon 10 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	10. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	10. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	12900	0,02	0,1767
2	54,8	2661	17400	0,06	0,4151
3	82,2	6386	20100	0,12	0,5138
4	109,6	15643	23000	0,30	0,5905
5	137	26607	26600	0,58	0,6795

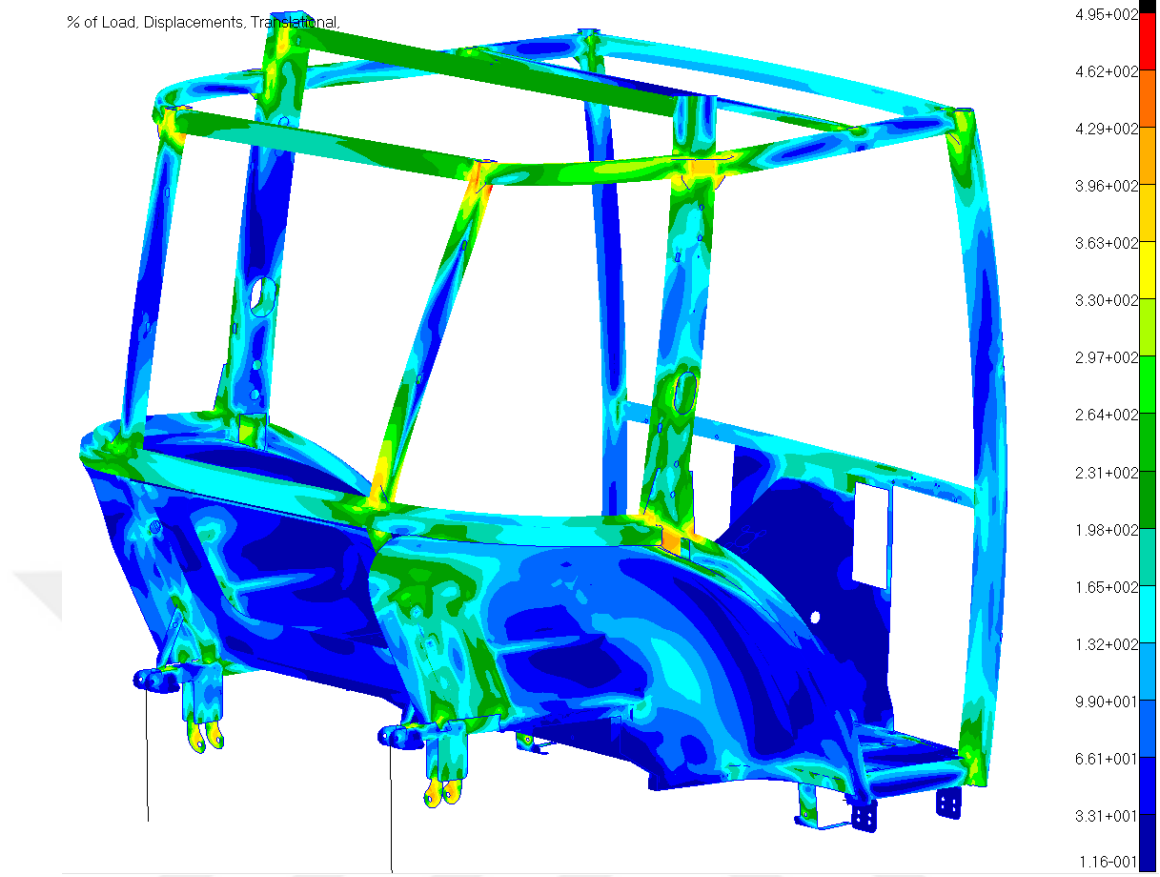
6	164,4	33613	29400	0,83	0,7672
7	191,8	37249	31900	0,97	0,8398
8	219,2	37426	34000	1,02	0,9028
9	246,6	38580	34500	1,04	0,9385
10	274	39910	37200	1,08	0,9823
				Toplam 6,03	Toplam 6,81



Şekil 4.41 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.41’de gösterildiği gibi, metalik malzemelerin plastik bölgesinin modellenmesi için kullanılan Ramberg-Osgood parametresinin (n), reaksiyon kuvvetlerine minör etkisi olmaktadır.

Reaksiyon kuvvetleri Simülasyon 4 ve Simülasyon 10 da yakın olmasına rağmen, Şekil 4.42’de gösterilen Simülasyon 10 Von-Mises gerilme dağılımı Simülasyon 4 Von-Mises gerilme dağılımından daha düşüktür.



Şekil 4.42 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

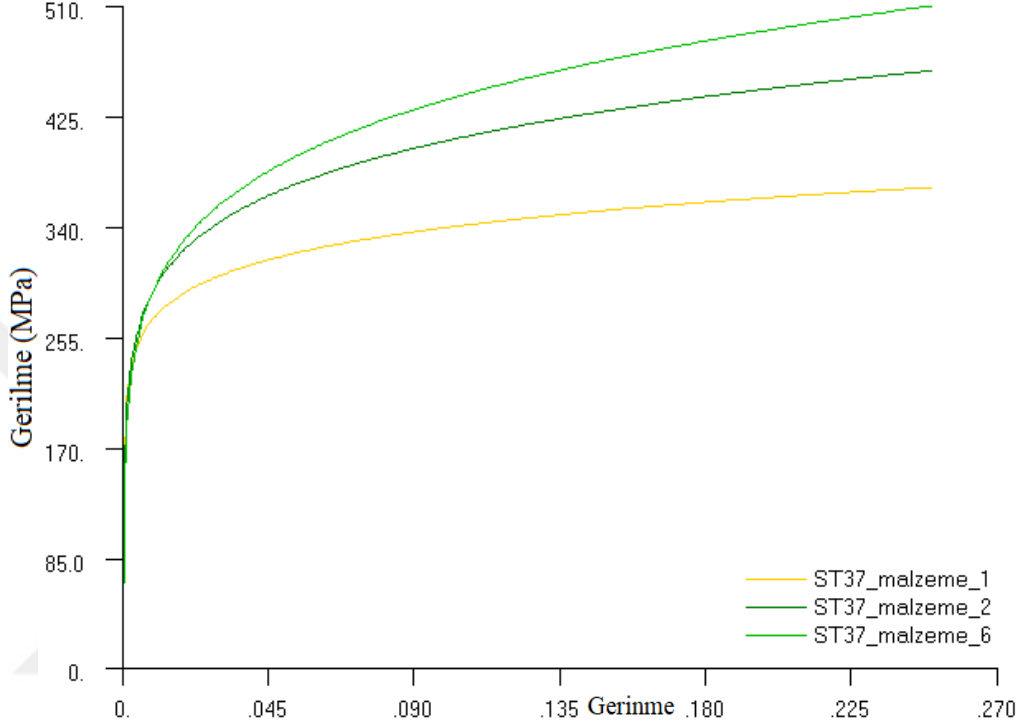
4.4.11 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 11

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28 Simülasyon 11 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456

Malzemenin analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 11. Simülasyonda 6. malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin $n=6,1$) kullanılmıştır (Şekil 4.43).



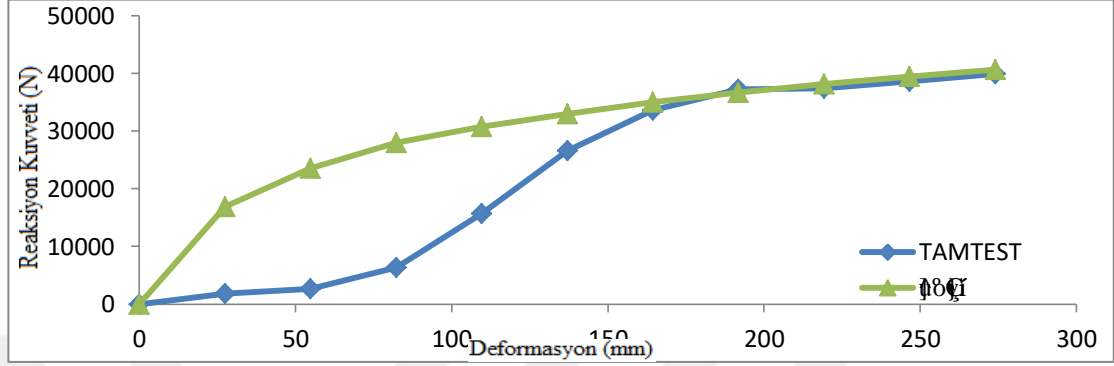
Şekil 4.43 Malzeme 1, malzeme 2 ve malzeme 6 gerinme-gerilme grafikleri

Çizelge 4.28’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.29’da ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.44’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.29 Simülasyon 11 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	11. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	11. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	16840	0,02	0,23
2	54,8	2661	23500	0,06	0,55
3	82,2	6386	27950	0,12	0,70
4	109,6	15643	30800	0,30	0,80
5	137	26607	33000	0,58	0,87
6	164,4	33613	35000	0,83	0,93

7	191,8	37249	36690	0,97	0,98
8	219,2	37426	38160	1,02	1,03
9	246,6	38580	39500	1,04	1,06
10	274	39910	40700	1,08	1,10
				Toplam 6,03	Toplam 8,27



Şekil 4.44 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.44'te gösterildiği gibi, simülasyonun son adımlarında (yüklemenin 50 mm'yi geçtiği bölgede) reaksiyon kuvvetleri gerçek fiziksel test ile uyumludur. Dolayısıyla önceki simülasyonlarda da belirtildiği gibi, simülasyonlar sırasında kabin yapısının direngenliği (stiffness) ve sınır koşulları, gerçek fiziksel testlerle ancak son adımlarda (50 mm sonrası) tutarlı modellenebilmiştir. Bunun sebebi de arka bağlantıdaki süspansiyon direngenliğinin (yay sabitinin) yüklemenin bütün adımlarında sabit olmamasından kaynaklanıyor olmasıdır. Başka bir deyişle, süspansiyon yay sabiti, yüklemenin ilk adımlarında (50 mm öncesi) düşük direngenliğe (stiffness) sahip iken, yüklemenin son adımlarında (50 mm sonrası) yüksek direngenliğe (rijit) sahiptir. Bu nedenle, arka bağlantının rijit yada yüksek direngenliğe sahip yay sabiti ile modellendiği simülasyonlar ile gerçek fiziksel test sonuçları, son adımlarda tutarlı çıkmaktadır.

4.4.12 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 12

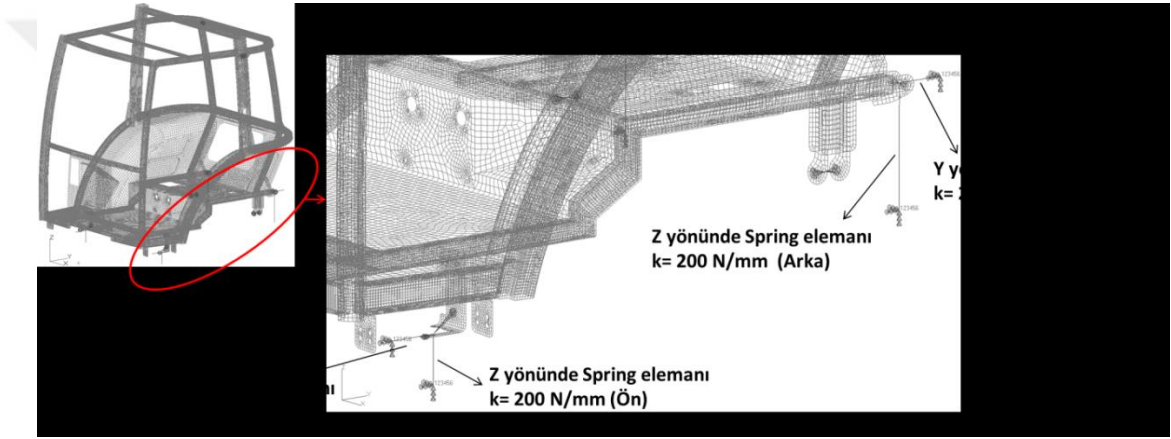
Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.30 Simülasyon 12 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=200 N/mm)

	Y yönünde Spring elemanı (K=200 N/mm)
Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elemanı (K=200 N/mm)
	Y yönünde Spring elemanı (K=200 N/mm)

Önceki simülasyonlarda, malzeme modellemesi elastik bölgede gerçek malzeme eğimine yakın modellenmiş simülasyon reaksiyon kuvvetleri son adımlarda (100 mm sonrası yükleme) TAMTEST sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Simülasyon 7 sonucunda ilk adımlarda, süspansiyondan dolayı kabin yapısının yüklenmediği hareket ettiği çıkarımı yapılmıştı. Bu nedenle Simülasyon 12 denemesinde y ve z yönlerindeki sınır koşulları yerine ‘Spring’ elemanlar tanımlanmıştır. 12. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.45’te gösterilmiştir.



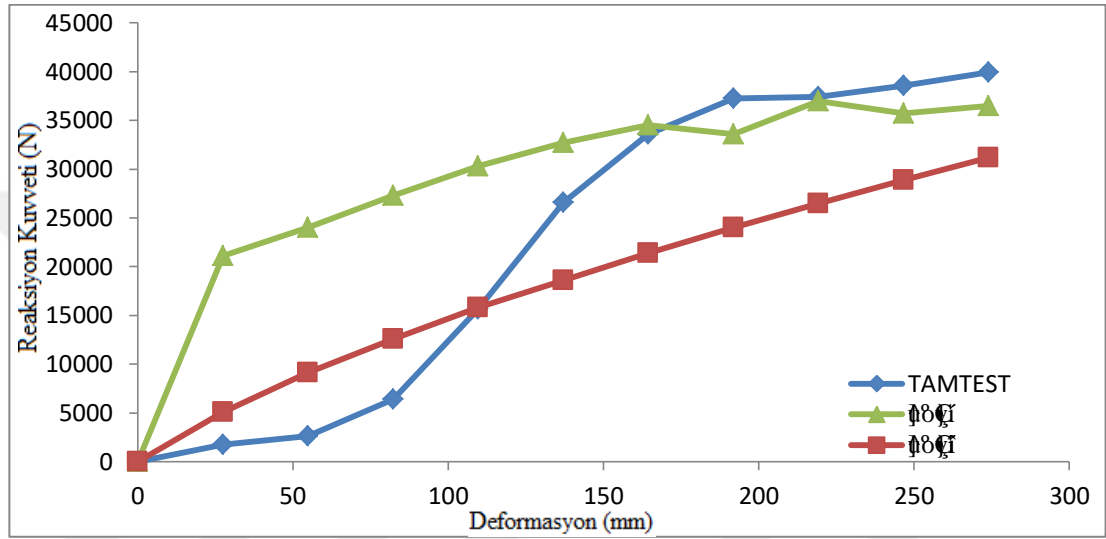
Şekil 4.45 Simülasyon 12 sınır koşulları

Çizelge 4.30’da belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.31’de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.46’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.31 Simülasyon 12 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	12. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	12. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	5100	0,02	0,07
2	54,8	2661	9150	0,06	0,20
3	82,2	6386	12600	0,12	0,30

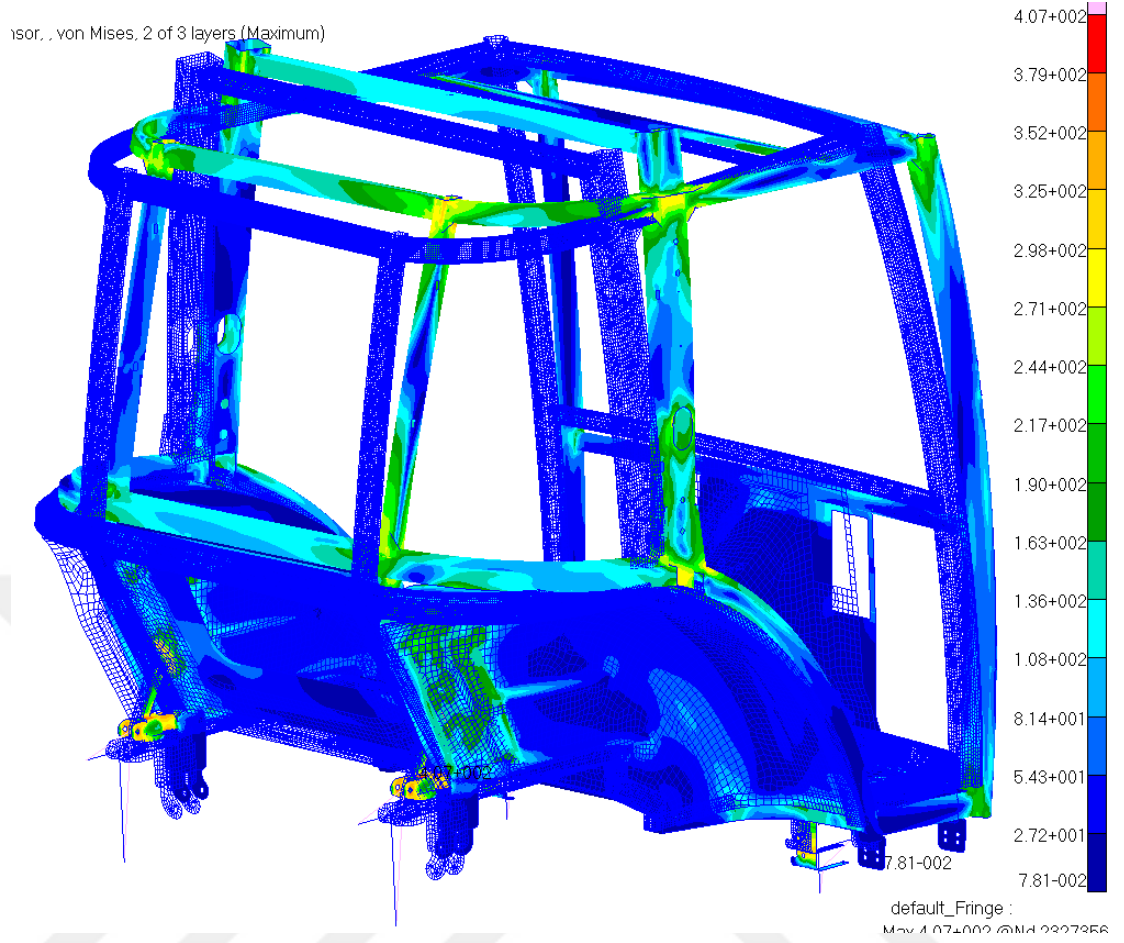
4	109,6	15643	15800	0,30	0,39
5	137	26607	18600	0,58	0,47
6	164,4	33613	21400	0,83	0,55
7	191,8	37249	24000	0,97	0,62
8	219,2	37426	26500	1,02	0,69
9	246,6	38580	28900	1,04	0,76
10	274	39910	31200	1,08	0,82
				Toplam 6,03	Toplam 4,87



Şekil 4.46 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.46'da gösterildiği gibi sınır koşulları rijit yerine yay sabiti ile değiştirilince reaksiyon kuvvetlerinin değeri değişmiştir. Simülasyon 1'de rijit olarak belirlenen sınır koşullarının direngenliği (stiffness) değerleri yüksek olduğu için reaksiyon kuvvetleri de yüksektir.

Şekil 4.47'de Simülasyon 12 için Von-Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.47 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

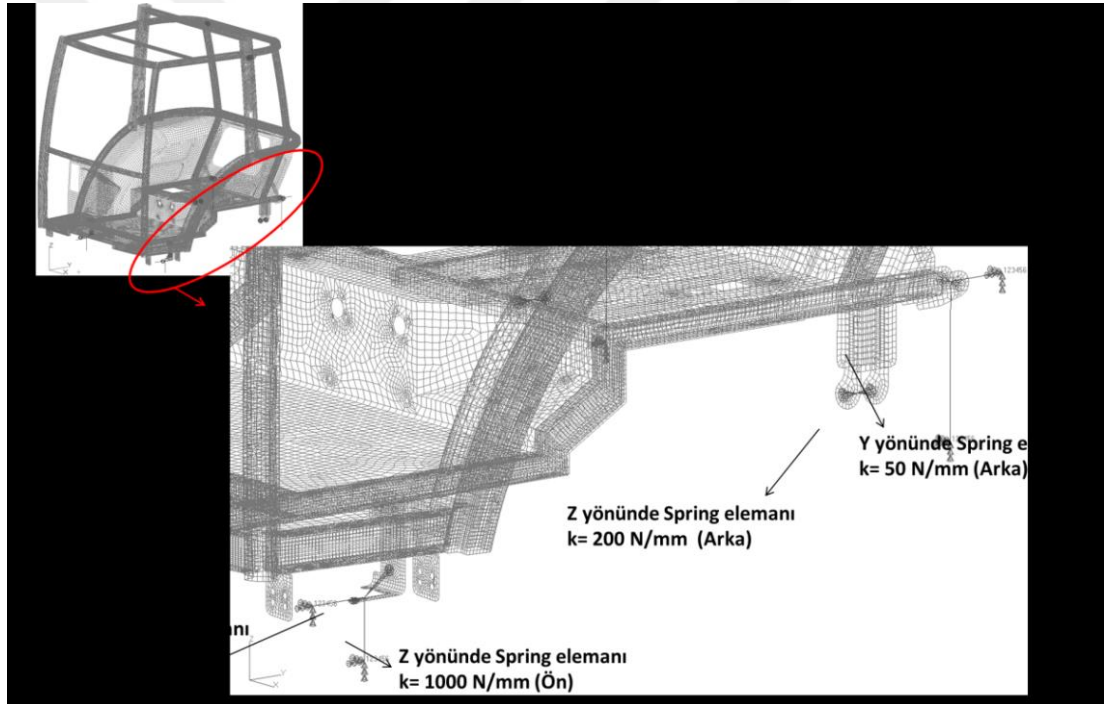
4.4.13 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 13

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.32’de verilmiştir.

Çizelge 4.32 Simülasyon 13 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elemanı (K=1000 N/mm) Y yönünde Spring elemanı (K=50 N/mm)
Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elemanı (K=200 N/mm) Y yönünde Spring elemanı (K=50 N/mm)

Simülasyon 12 den farklı olarak ön tarafın Z yönündeki Spring Elemanının direngenliği (stiffness) artırılarak, ön ve arka tarafın Y yönündeki Spring eleman direngenliği azaltılmıştır (Çizelge 4.32). Böylece Spring Eleman direngenlik (stiffness) değişiminin simülasyon sonuçlarına etkisinin irdelenmesi hedeflenmiştir. 13. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.48’de gösterilmiştir.

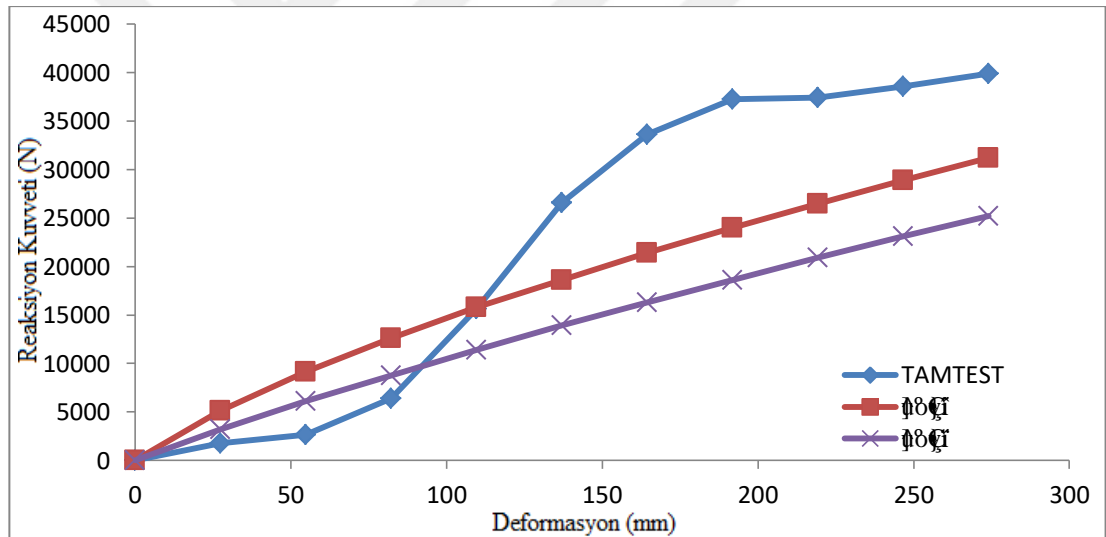


Şekil 4.48 Simülasyon 13 sınır koşulları

Çizelge 4.32’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.33’te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.49’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.33 Simülasyon 13 reaksiyon kuvvetleri

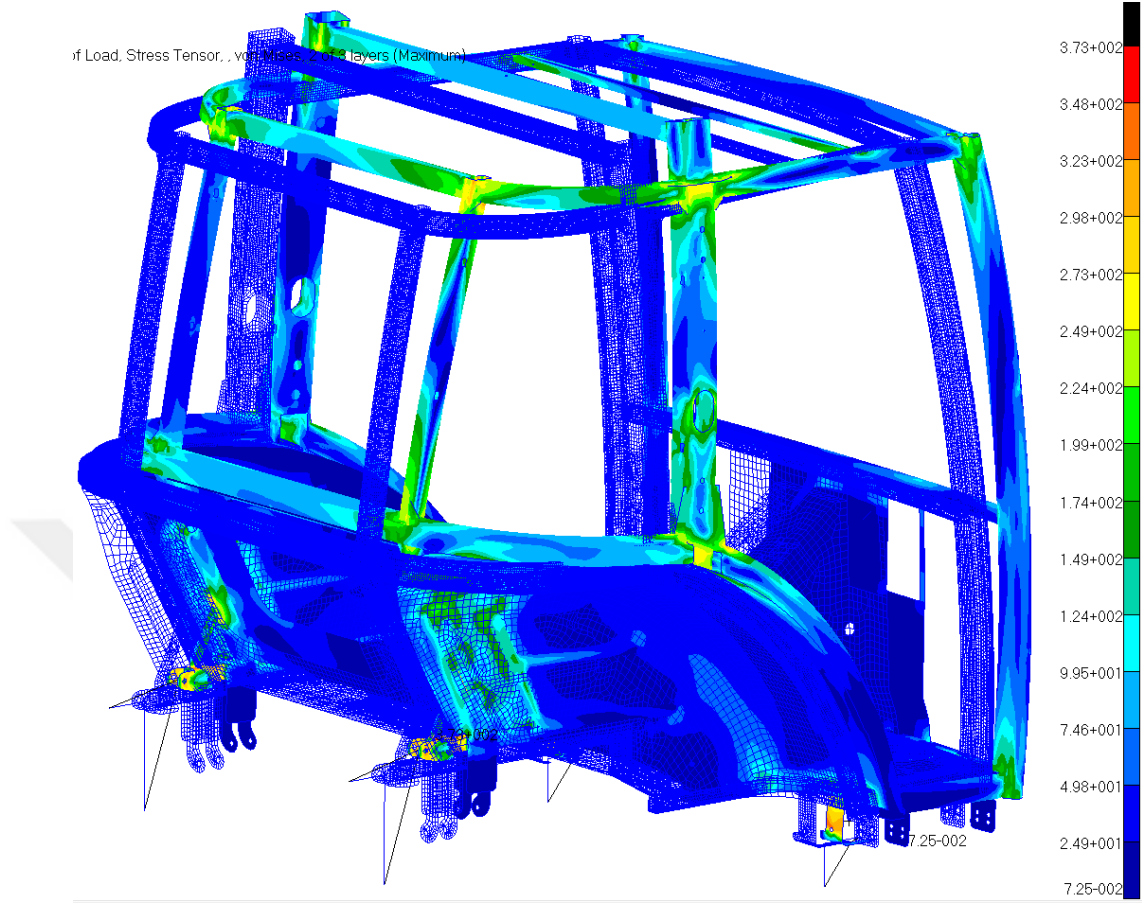
Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	13. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	13. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	3220	0,02	0,04
2	54,8	2661	6090	0,06	0,13
3	82,2	6386	8780	0,12	0,20
4	109,6	15643	11400	0,30	0,28
5	137	26607	13900	0,58	0,35
6	164,4	33613	16300	0,83	0,41
7	191,8	37249	18600	0,97	0,48
8	219,2	37426	20900	1,02	0,54
9	246,6	38580	23100	1,04	0,60
10	274	39910	25200	1,08	0,66
				Toplam 6,03	Toplam 3,70



Şekil 4.49 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Çizelge 4.32’de gösterildiği gibi Spring Elemanların direngenliği (stiffness) değerleri Simülasyon 12 deki Spring Elemanların direngenliği (stiffness) değerlerine göre düşüktür. Dolayısıyla reaksiyon kuvvetleri düşmüştür.

Şekil 4.50’de Simülasyon 13 için Von-Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Spring Eleman direngenlikleri azaldığı için kabin yapısı daha az yüklenmiştir ve Von Mises Gerilme dağılımı Simülasyon 12’ye göre düşüktür.



Şekil 4.50 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

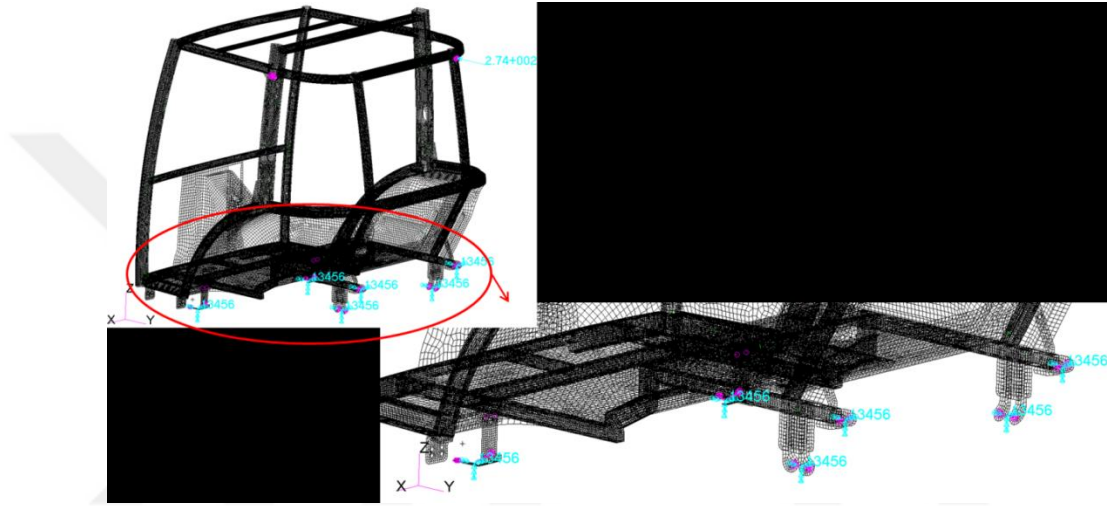
4.4.14 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 14

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.34'te verilmiştir.

Çizelge 4.34 Simülasyon 14 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>6. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	Rijit 13456 (y serbest)
Arka Sınır Koşulları	Rijit 13456 (y serbest)

Önceki simülasyonlarda, malzeme modellemesi elastik bölgede gerçek malzeme eğimine yakın modellenmiş simülasyon reaksiyon kuvvetleri son adımlarda (100 mm sonrası yükleme) TAMTEST sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Simülasyon 7 sonucunda ilk adımlarda, süspaniyondan dolayı kabin yapısının yüklenmediği hareket ettiği çıkarımı yapılmıştı. Bu nedenle Simülasyon 14 denemesinde yükleme yönündeki sınır koşullarının (y yönünde) serbest bırakılarak analiz sonuçlarına etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. 14. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.51’de gösterilmiştir.



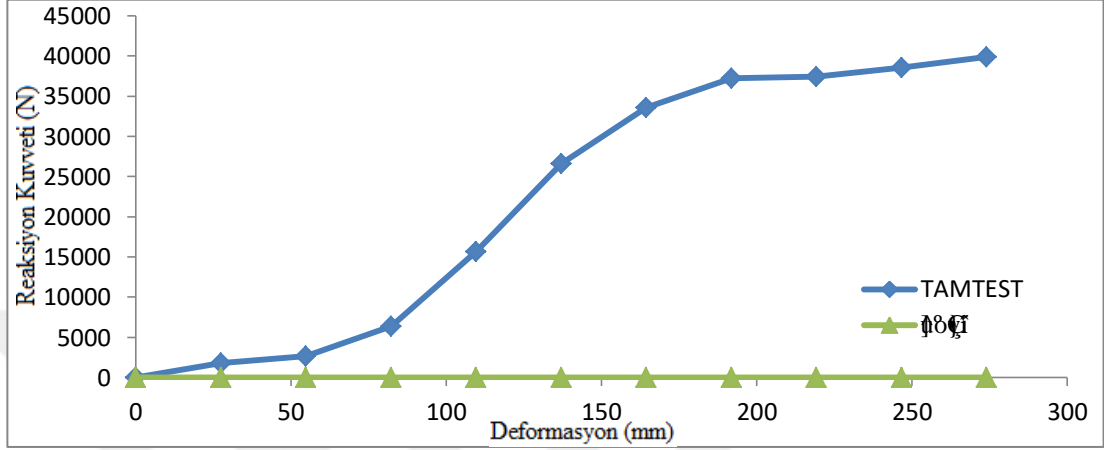
Şekil 4.51 Simülasyon 14 sınır koşulları

Çizelge 4.34’te belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.35’te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.52’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.35 Simülasyon 14 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	14. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	14. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	0,0000039	0,02	0,0000
2	54,8	2661	0,0000360	0,06	0,0000
3	82,2	6386	0,0000350	0,12	0,0000
4	109,6	15643	0,0000210	0,30	0,0000
5	137	26607	0,0000670	0,58	0,0000
6	164,4	33613	0,0000310	0,83	0,0000

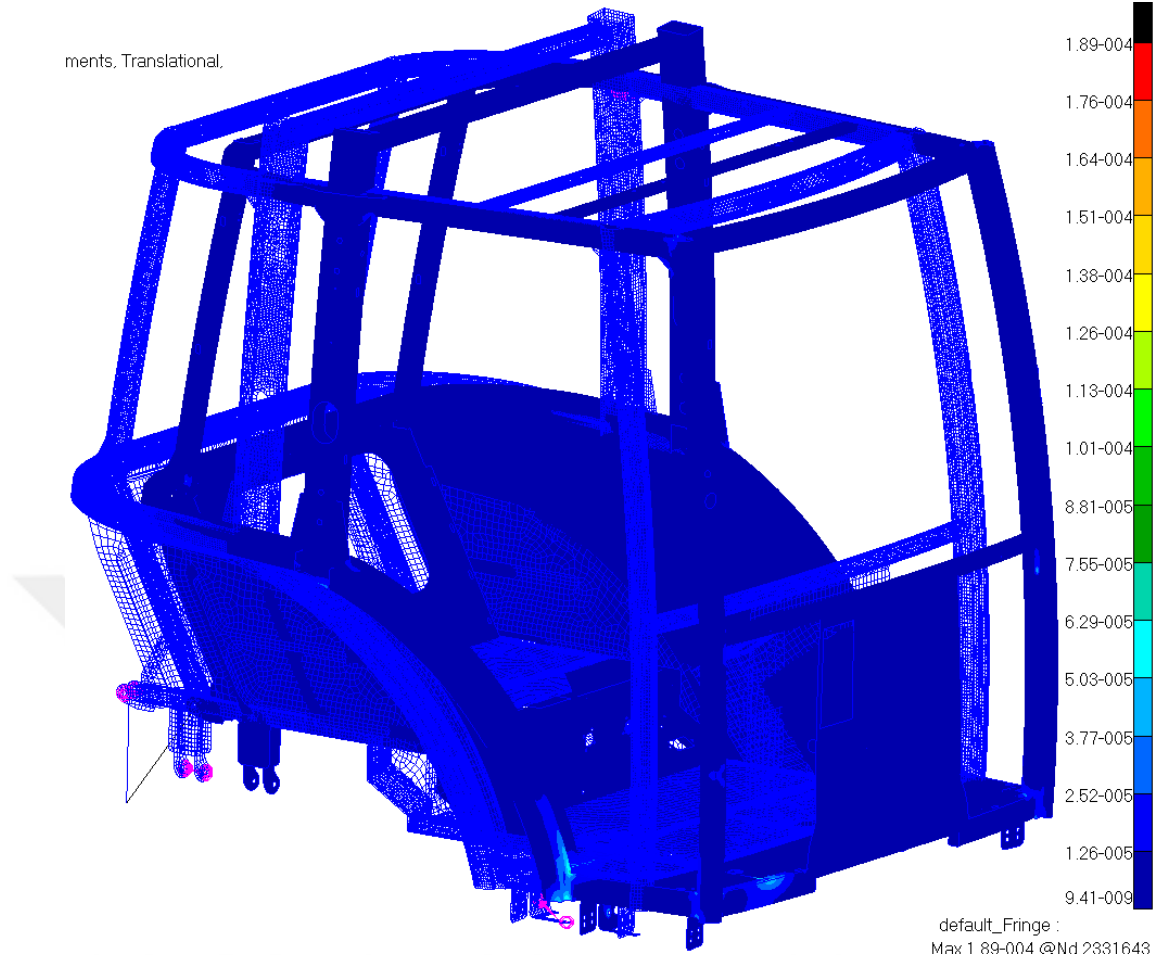
7	191,8	37249	0,0001000	0,97	0,0000
8	219,2	37426	0,0001800	1,02	0,0000
9	246,6	38580	0,0000048	1,04	0,0000
10	274	39910	0,0000340	1,08	0,0000
				Toplam 6,03	Toplam 0,00



Şekil 4.52 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.52'de gösterildiği gibi, kabin yapısı yükleme yönünde (y yönünde) serbest olduğu için reaksiyon kuvvetleri sıfır çıkmıştır. Gerçek fiziksel testin (TAMTEST) ilk adımlarında reaksiyon kuvvetleri düşüktür. Başka bir deyişle gerçek fiziksel testte (TAMTEST) yükleme yönündeki (y yönünde) sınır koşulu serbest değildir fakat reaksiyon kuvvetinin düşük çıkmasına sebep olacak kadar düşük direngenliğe (stiffness) sahiptir.

Kabin yapısı y yönünde serbest olduğu için Şekil 4.53'te gösterildiği gibi kabin yapısı hiç yüklenmemiş, hareket etmiştir (rigid body motion).



Şekil 4.53 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

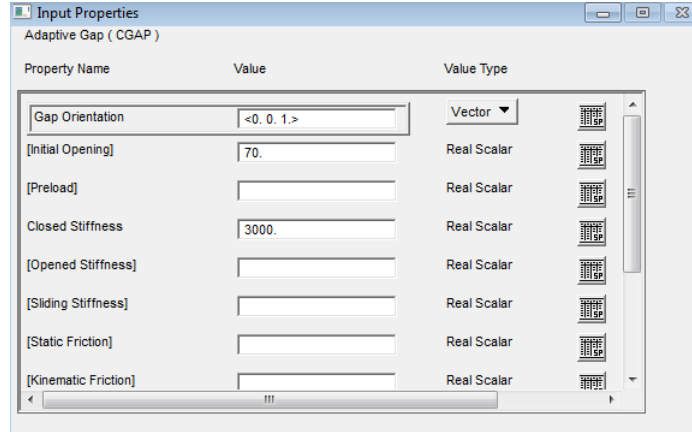
4.4.15 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 15

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.36'da verilmiştir.

Çizelge 4.36 Simülasyon 15 parametreleri

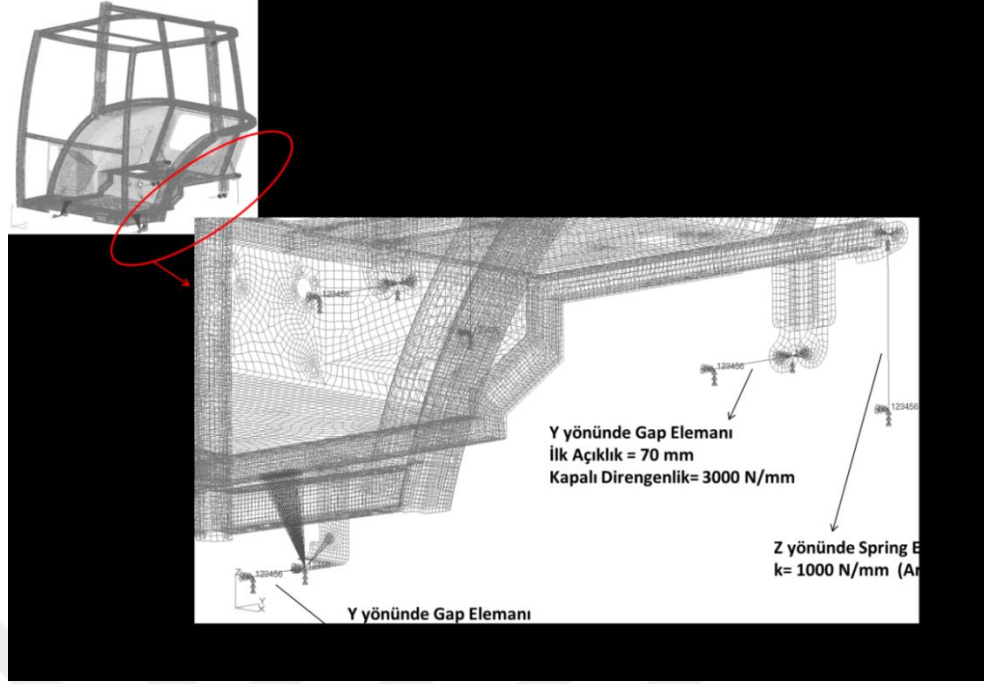
Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)
Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=1000 N/mm) Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)

TAMTEST sonuçlarına göre kabin yapısı test yüklemesinin ilk adımlarında (yaklaşık 100 mm ye kadar) çok az yüklendiği için, kabinin yükleme yönü olan Y yönünde ilk adımlar için düşük direngenliğe sahip sınır koşulları olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu nedenle 15. Simülasyon da yüklemenin ilk adımlarının direngenliğini modelleyebilmek için “Gap Eleman” kullanılmıştır. “Gap Elemanları” basma yükü (compression) altında çalışan kontak elemanlarıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar modelinde basma yükünü alacak şekilde yükleme yönünde modellenmiştir. “Gap Elemanlarının” direngenlik katsayısı (stiffness) 3000 N/mm olarak modellenmiştir. Fakat “Gap Elemanının” ilk açıklık (Initial Opening) değeri 70 mm olarak girilmiştir. Böylece kabin yapısı yükleme yönü olan Y yönünde 70 mm ye kadar serbest olurken 70 mm den sonra 3000 N/mm’lik yay sabiti ile sınırlandırılmıştır. Sonlu elemanlar paket programında, “Gap Elemanı” özelliklerinin girildiği pencere Şekil 4.54’te gösterilmiştir.



Şekil 4.54 Gap elemanı özellikleri

15. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.55’te gösterilmiştir.

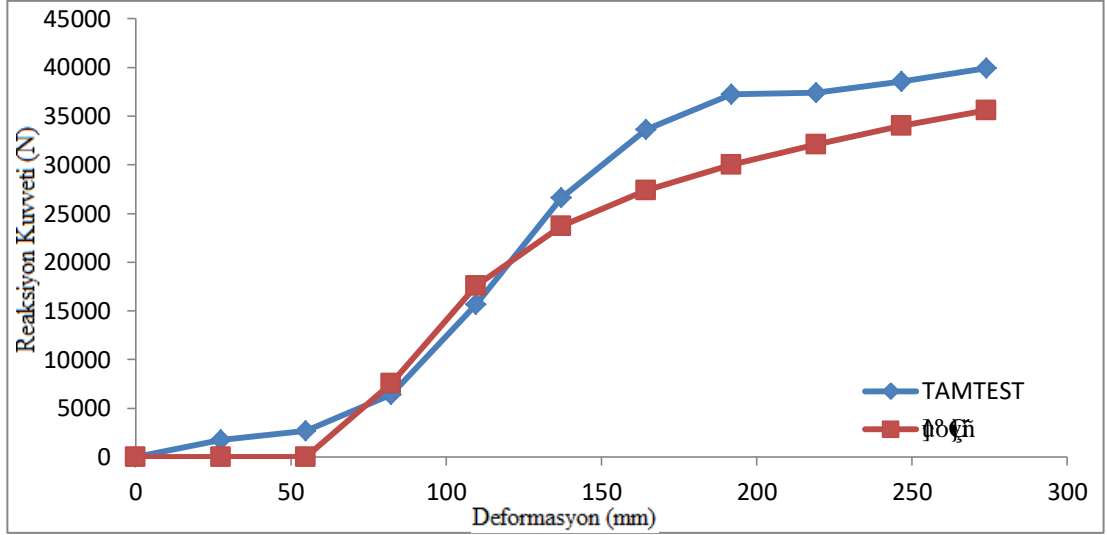


Şekil 4.55 Simülasyon 15 sınır koşulları

Çizelge 4.36'da belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.37'de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.56'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.37 Simülasyon 15 reaksiyon kuvvetleri

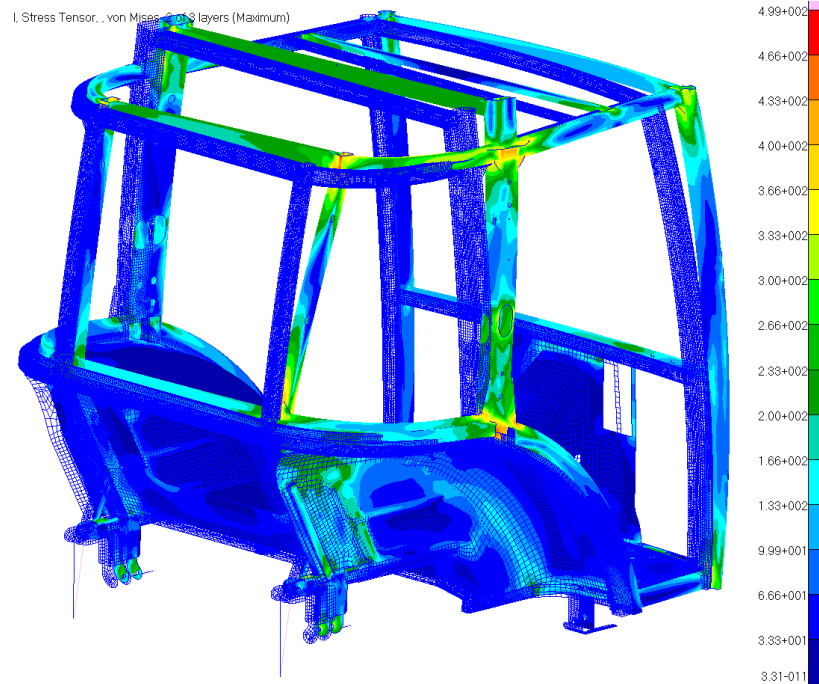
Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	15. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	15. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	0	0,02	0,00
2	54,8	2661	0	0,06	0,00
3	82,2	6386	7570	0,12	0,10
4	109,6	15643	17600	0,30	0,34
5	137	26607	23700	0,58	0,57
6	164,4	33613	27400	0,83	0,70
7	191,8	37249	30000	0,97	0,79
8	219,2	37426	32100	1,02	0,85
9	246,6	38580	34000	1,04	0,91
10	274	39910	35600	1,08	0,95
				Toplam 6,03	Toplam 5,21



Şekil 4.56 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Şekil 4.56’da gösterildiği gibi, kabin yapısı yükleme yönünde (y yönünde) 70 mm’ye kadar serbest olduğu için reaksiyon kuvvetleri sıfır çıkmıştır. Fakat 70 mm’den sonra Gap Elemanının ilk açıklık değeri aşıldığı için kabin yapısı yükleme yönü olan Y yönünde 3000 N/mm’lik yay sabitine sahip Gap elemanları ile sınırlandırıldığı için kabin yapısı yüklenmeye başlamış ve reaksiyon kuvvetleri artmıştır.

Şekil 4.57’de Simülasyon 15 için Von-Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.57 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.4.16 Dört direkli YKKY - arkadan yükleme yük durumu simülasyon 16

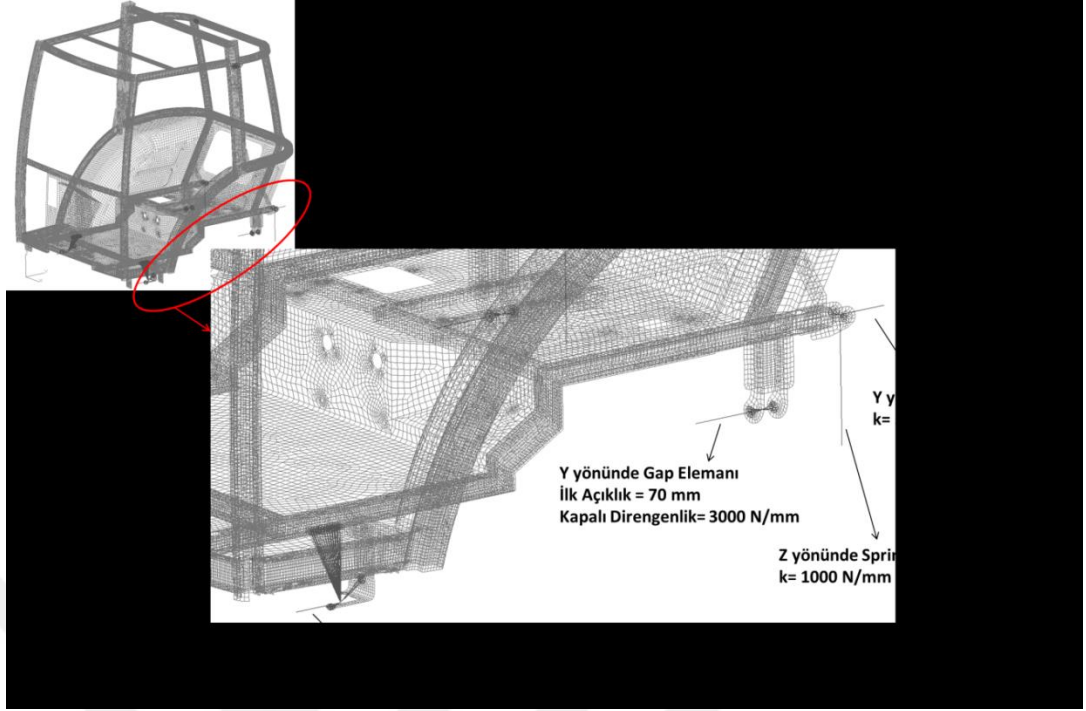
Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.38’de verilmiştir.

Çizelge 4.38 Simülasyon 16 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>6. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)
Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=1000 N/mm) Y yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)

TAMTEST sonuçlarına göre kabin yapısı test yüklemesinin ilk adımlarında (yaklaşık 100 mm ye kadar) çok az yüklendiği için, kabinin yükleme yönü olan Y yönünde ilk adımlar için düşük direngenliğe sahip sınır koşulları olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu nedenle 15. Simülasyon da yüklemenin ilk adımlarının direngenliğini modelleyebilmek için Gap Eleman kullanılmıştır. Fakat kabin yapısı yükleme yönünde (y yönünde) 70 mm’ye kadar serbest olduğu için reaksiyon kuvvetleri sıfır çıkmıştır. Bu nedenle Gap Elamanına tanımlanan ilk açıklık (initial opening) değeri olan 70 mm kapanana kadar düşük direngenliğe (stiffness) sahip Spring Eleman tanımlanarak reaksiyon kuvvetlerinin ilk adımları için de artırılması hedeflenmiştir. Başka bir deyişle, kabin yapısı Simülasyon 16 da, 70 mm ye kadar düşük direngenliğe sahip Spring Eleman (50 N/mm) ile sınırlandırılırken, 70 mm den sonra Gap Elemanının direngenliği (3000 N/mm) ile sınırlandırılmıştır.

16. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.58’de gösterilmiştir.

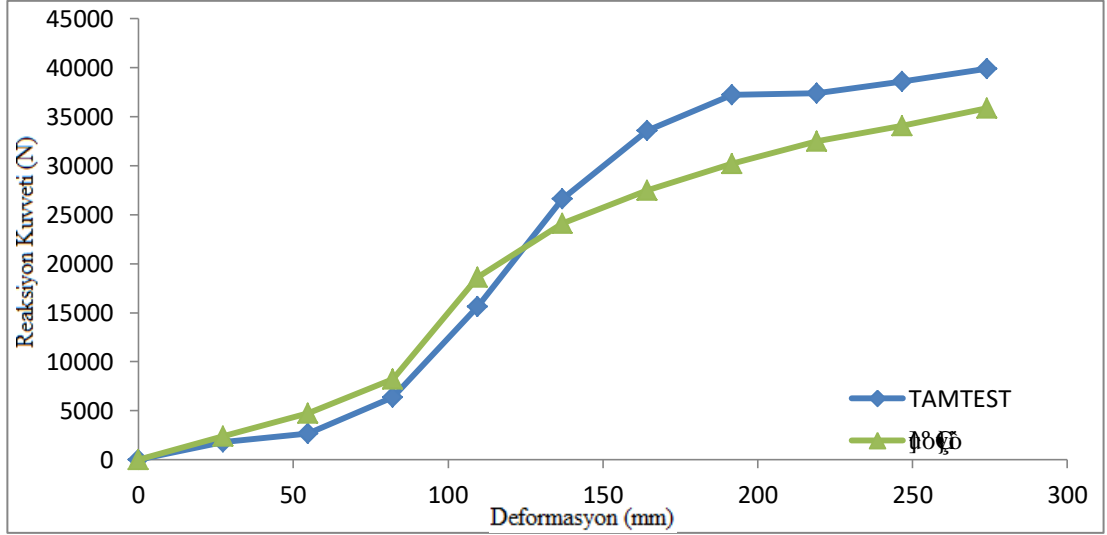


Şekil 4.58 Simülasyon 16 sınır koşulları

Çizelge 4.38’de belirtilen parametrelere göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarından deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.39’da ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.59’da gösterilmiştir.

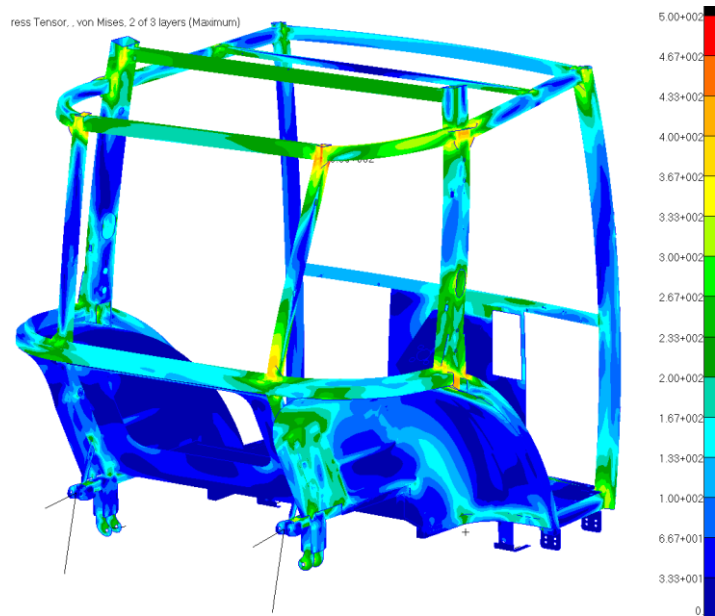
Çizelge 4.39 Simülasyon 16 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	16. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	16. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	27,4	1774	2420	0,02	0,03
2	54,8	2661	4740	0,06	0,10
3	82,2	6386	8250	0,12	0,18
4	109,6	15643	18600	0,30	0,37
5	137	26607	24100	0,58	0,58
6	164,4	33613	27500	0,83	0,71
7	191,8	37249	30200	0,97	0,79
8	219,2	37426	32500	1,02	0,86
9	246,6	38580	34100	1,04	0,91
10	274	39910	35900	1,08	0,96
				Toplam 6,03	Toplam 5,49



Şekil 4.59 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

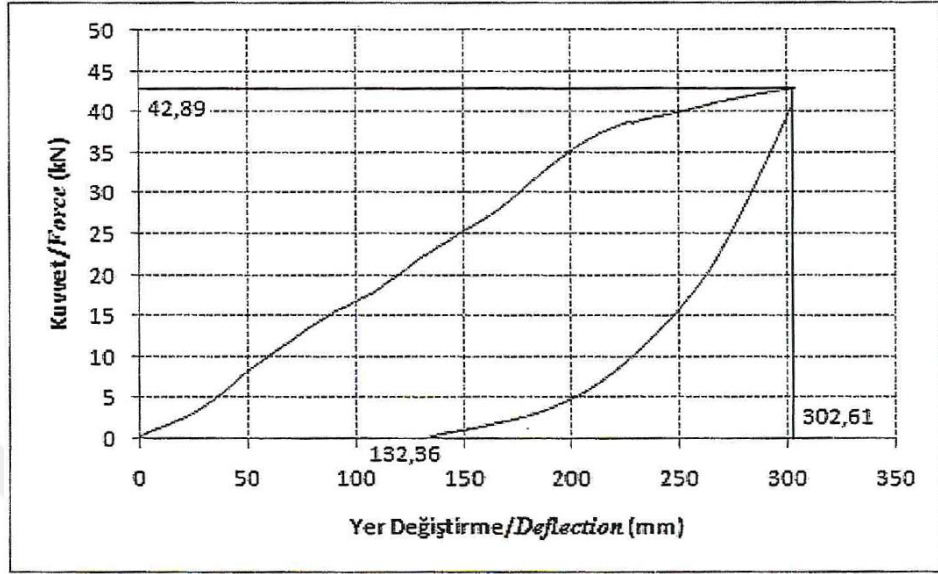
Şekil 4.59’da gösterildiği gibi, kabin yapısı yükleme yönünde (y yönünde) 70 mm’ye kadar düşük direngenliğe (stiffness=50 N/mm) sahip Spring Eleman ile modellendiği için reaksiyon kuvvetleri TAMTEST in ilk adımlarındaki reaksiyon kuvvetleri gibi düşük çıkmıştır. Fakat 70 mm’den sonra Gap Elemanının ilk açıklık değeri aşıldığı için kabin yapısı yükleme yönü olan Y yönünde 3000 N/mm’lik yay sabitine sahip Gap elemanları ile sınırlandırıldığı için kabin yapısı yüklenemeye başlamış ve reaksiyon kuvvetleri artmaya başlamıştır. Şekil 4.60’ta Simülasyon 16 için Von-Mises gerilme dağılımını gösterilmiştir.



Şekil 4.60 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.5. Dört Direkli YKKY - Yandan Yükleme Yük Durumu

TAMTEST tarafından gerçekleştirilen yandan yükleme test sonucu Şekil 4.61'de gösterilmiştir.



Şekil 4.61 TAMTEST yandan yükleme test sonucu

Grafik 10 eşit parçaya bölünerek, reaksiyon kuvvetleri Çizelge 4.40'ta tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 4.40 TAMTEST yandan yükleme test sonucu

Adım	Deformasyon (mm)	Fiziksel Test Sonucu Reaksiyon Kuvveti (N)
0	0	0
1	30,26	4141
2	60,52	9958
3	90,78	15874
4	121,04	20706
5	151,3	25044
6	181,56	30861
7	211,82	35700
8	242,08	38650
9	272,34	41214
10	302,6	42890

Devam eden bölümlerde farklı malzemeler, sınır koşulları, analiz yöntemleri, eleman tipleri gibi parametreler kombine edilerek gerçekleştirilmiş TAMTEST sonuçları ile uyumlu simülasyon sonucu elde edilmeye çalışılmıştır.

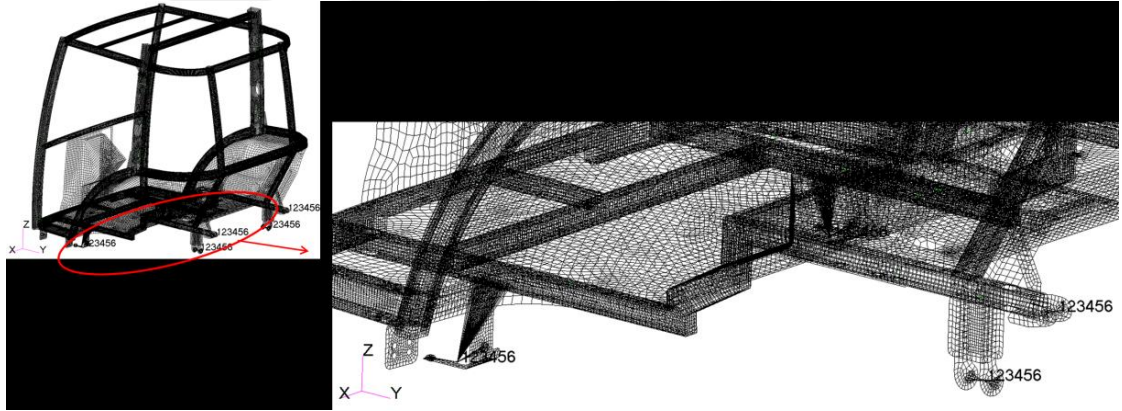
4.5.1 Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 1

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.41 Simülasyon 1 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	1. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Rijit 123456

Kabin tasarımı, şaseye önden rijit olarak bağlı iken arkadan süspansiyonlar aracılığıyla bağlıdır. Süspansiyonun analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 1. simülasyonda arkadaki süspansiyon bağlantısı ihmal edilmiştir. Bu nedenle ön ve arka bağlantıları rijit olarak modellenmiştir. 1. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.62’de gösterilmiştir.

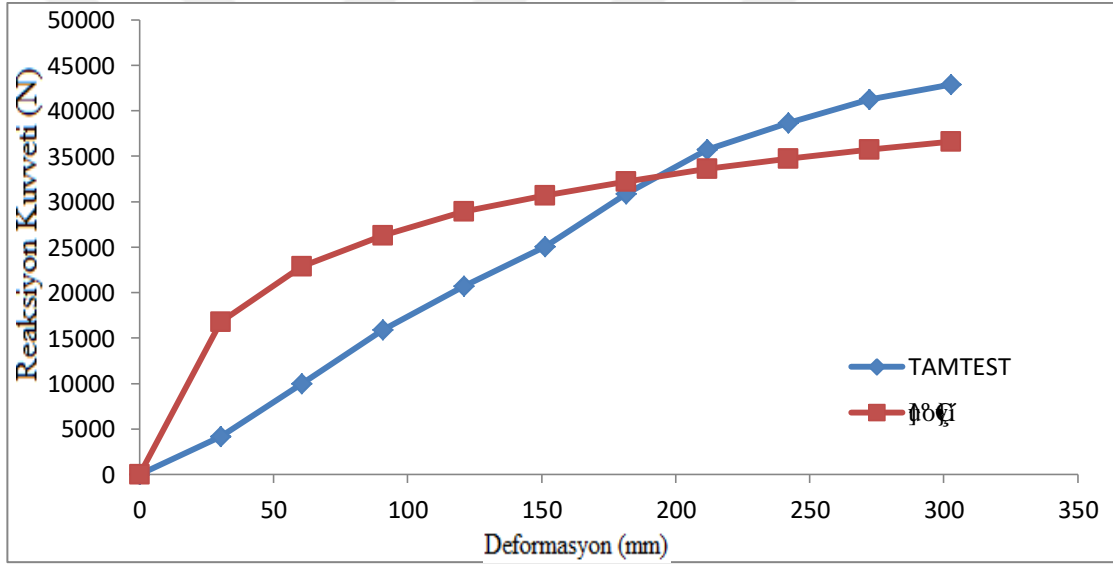


Şekil 4.62 Simülasyon 1 sınır koşulları

Çizelge 4.41’de belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.42’de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.63’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.42 Simülasyon 1 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	1. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	1. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	30,26	4141	21100	0,06	0,25
2	60,52	9958	24000	0,21	0,60
3	90,78	15874	27300	0,39	0,74
4	121,04	20706	30300	0,55	0,84
5	151,3	25044	32700	0,69	0,90
6	181,56	30861	34500	0,85	0,95
7	211,82	35700	33600	1,01	1,00
8	242,08	38650	37000	1,12	1,03
9	272,34	41214	35700	1,21	1,07
10	302,6	42890	36500	1,27	1,09
				Toplam 7,37	Toplam 8,48

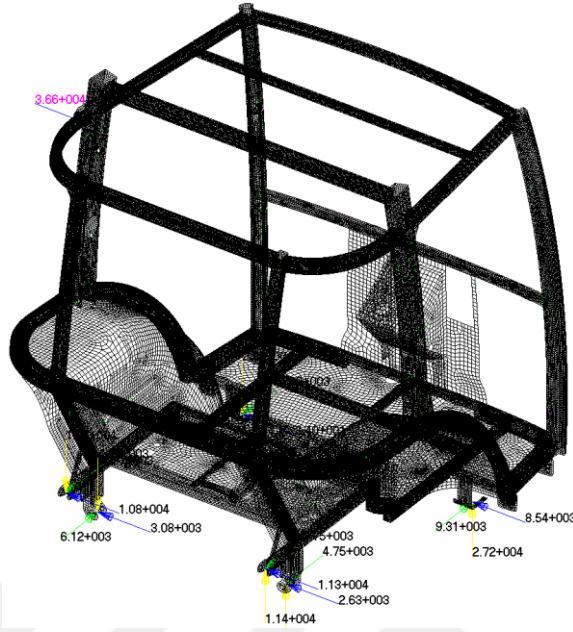


Şekil 4.63 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

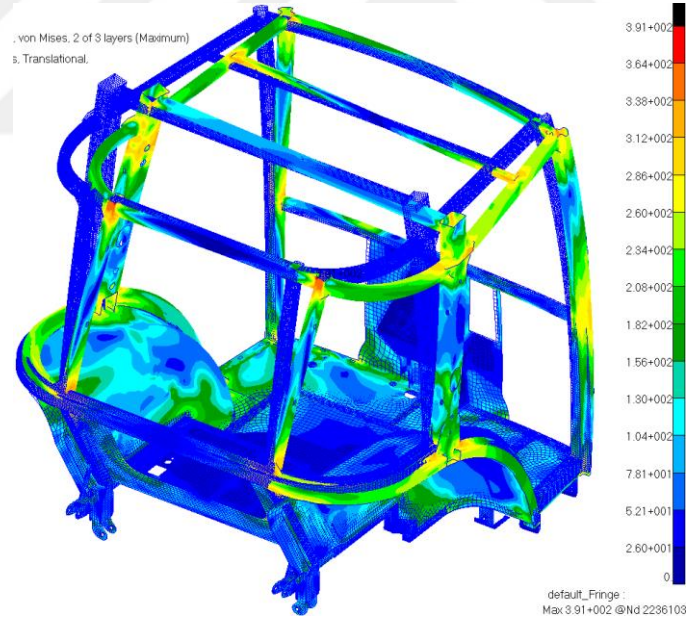
Simülasyon 1 analiz sonuçları son adımlarda TAMTEST sonuçları ile benzerlik gösterse de ilk adımdaki reaksiyon kuvvetleri olması gerekenden yüksek çıkmıştır. Yüklemenin ilk adımlarındaki sınır koşullarının direngenliği (stiffness) gerçek sınır koşullarını direngenliğinden (stiffness) yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir.

Deplasman uygulanan noktadaki yükleme (x yönünde 36600 N), sağ bağlantılar tarafından dengelenmektedir. Son basamaktaki (10. adım) reaksiyon kuvvetleri Şekil

4.64'te gösterilmiştir. Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.65'te gösterilmiştir. Sağ arka direğin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.64 Reaksiyon kuvvetleri



Şekil 4.65 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.5.2 Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 2

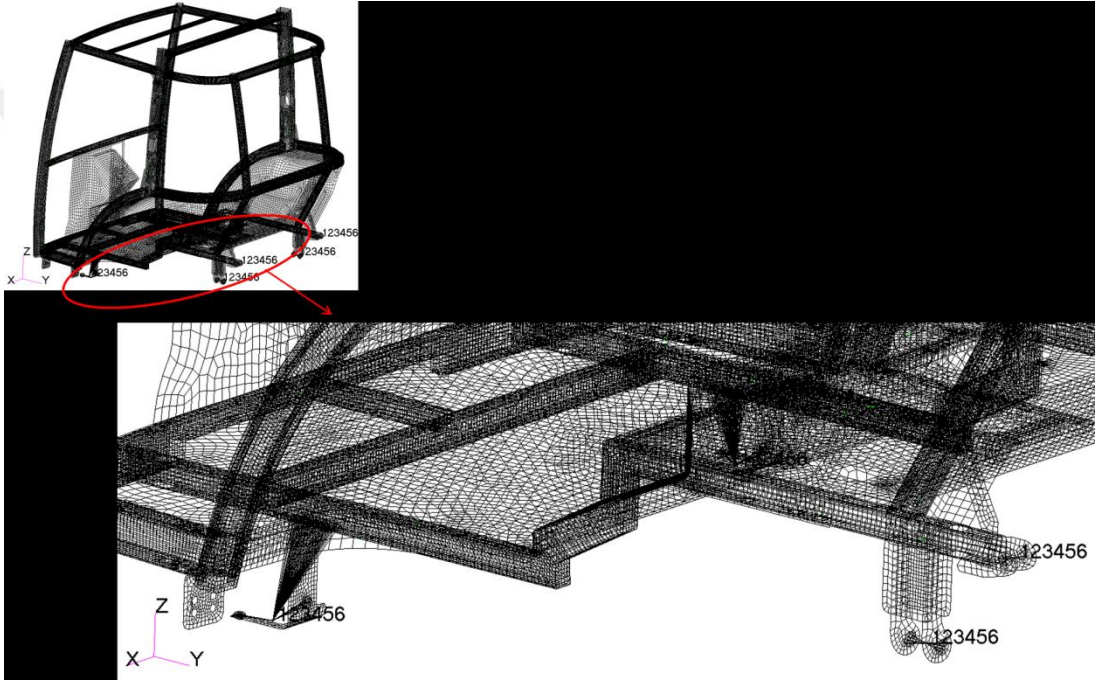
Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.43'te verilmiştir.

Çizelge 4.43 Simülasyon 2 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
-----------------------	-------------------------------------

Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Ön Sınır Koşulları	Rijit 123456
Arka Sınır Koşulları	Rijit 123456

Malzemenin analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi için 1. Simülasyonda kullanılan 1. Malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin $n=10,6$) yerine 2. Simülasyonda 6. Malzeme (Ramberg-Osgood parametresinin $n=6,1$) kullanılmıştır. 2. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.66'da gösterilmiştir.

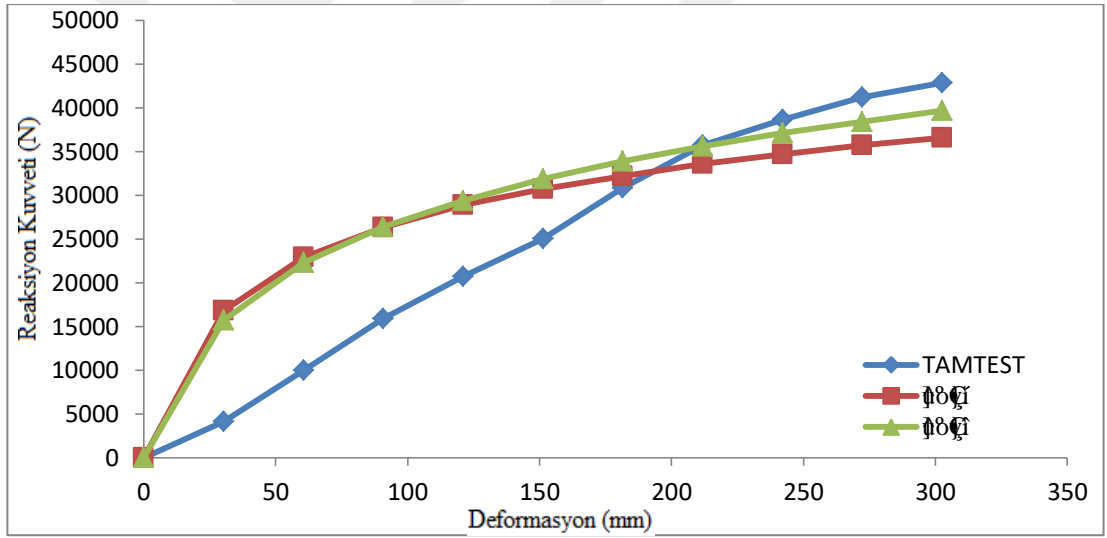


Şekil 4.66 Simülasyon 2 sınır koşulları

Çizelge 4.43'te belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.44'te ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.67'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.44 Simülasyon 2 reaksiyon kuvvetleri

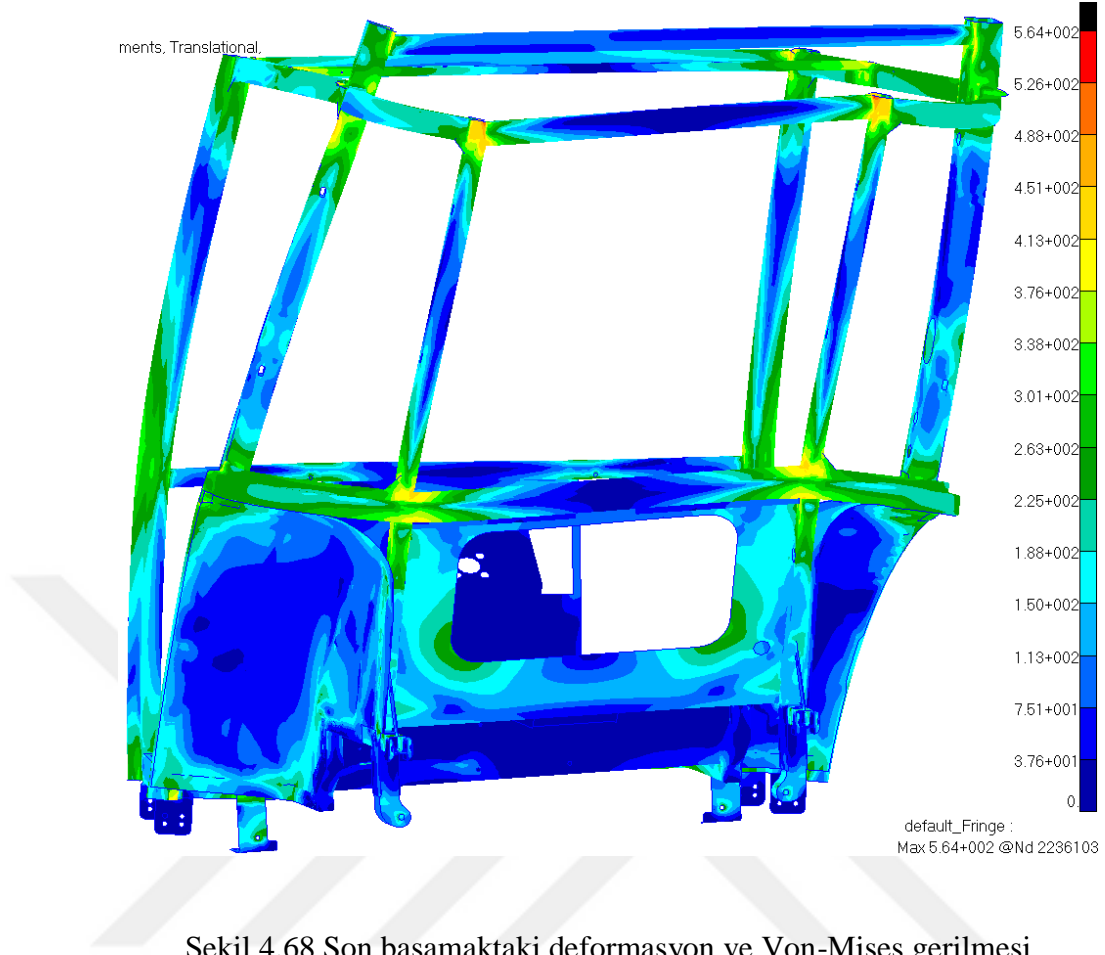
Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	2. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	2. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	30,26	4141	15700	0,06	0,24
2	60,52	9958	22300	0,21	0,57
3	90,78	15874	26400	0,39	0,74
4	121,04	20706	29400	0,55	0,84
5	151,3	25044	31900	0,69	0,93
6	181,56	30861	33900	0,85	1,00
7	211,82	35700	35600	1,01	1,05
8	242,08	38650	37100	1,12	1,10
9	272,34	41214	38400	1,21	1,14
10	302,6	42890	39700	1,27	1,18
				Toplam 7,37	Toplam 8,79



Şekil 4.67 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Simülasyon 2 ve Simülasyon 1 analiz sonuçları çok yakın çıkmış olsa da Simülasyon 2 sonuçları son adımlarda TAMTEST sonuçlarına daha yakın çıkmıştır.

Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.68'de gösterilmiştir. Sağ arka direğin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.68 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.5.3 Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyon 3

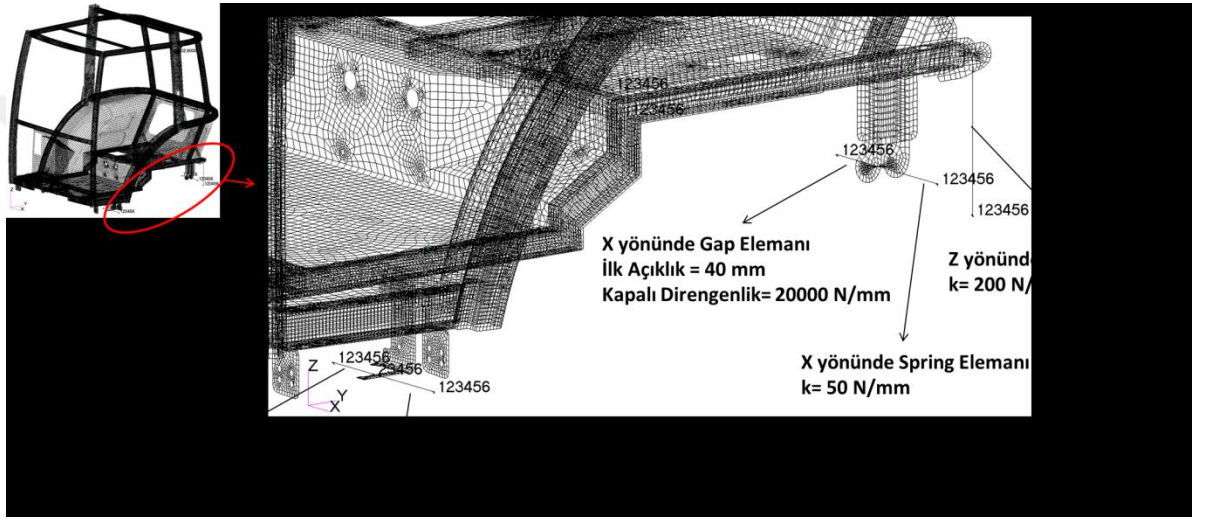
Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.45'te verilmiştir.

Çizelge 4.45 Simülasyon 3 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL106) ve 10 Basamaklı
Eleman Tipi	2D
Malzeme	<u>6. Malzeme</u>
Ön Sınır Koşulları	X yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) X yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=40mm, K=20000 N/mm)

Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=200 N/mm) X yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) X yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=40mm, K=20000 N/mm)
-----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

TAMTEST sonucu elde edilen reaksiyon kuvvetlerinin, yüklemenin ilk adımlarında da simülasyon sonuçları ile tutarlı olabilmesi için Simülasyon 3’de Spring ve Gap Elemanlar kullanılmıştır. 3. simülasyon için sınır koşulları Şekil 4.69’da gösterilmiştir.



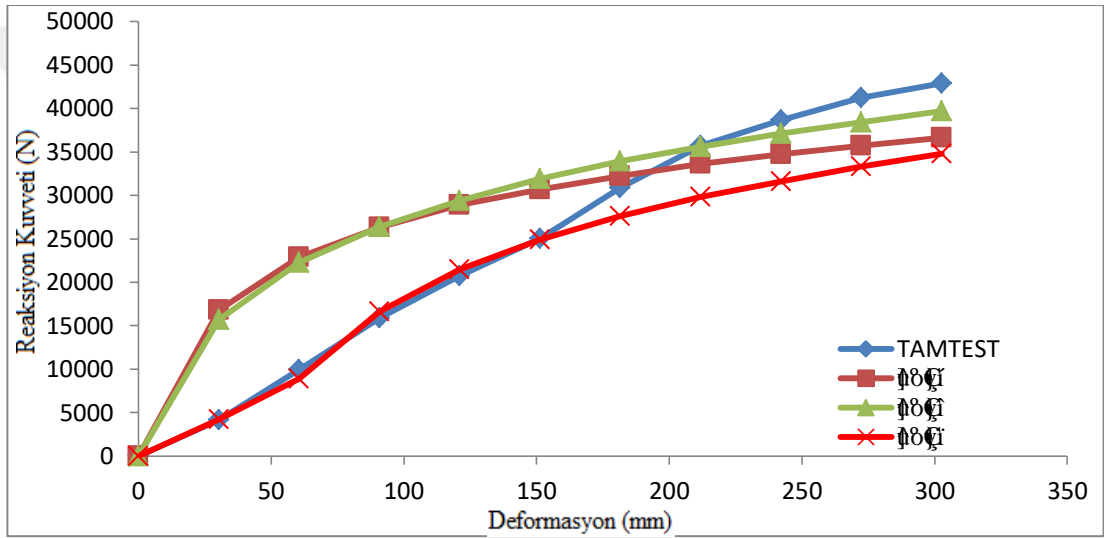
Şekil 4.69 Simülasyon 3 sınır koşulları

Çizelge 4.45’te belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.46’da ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.70’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.46 Simülasyon 3 reaksiyon kuvvetleri

Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	3. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	3. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
------	----------------	-------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

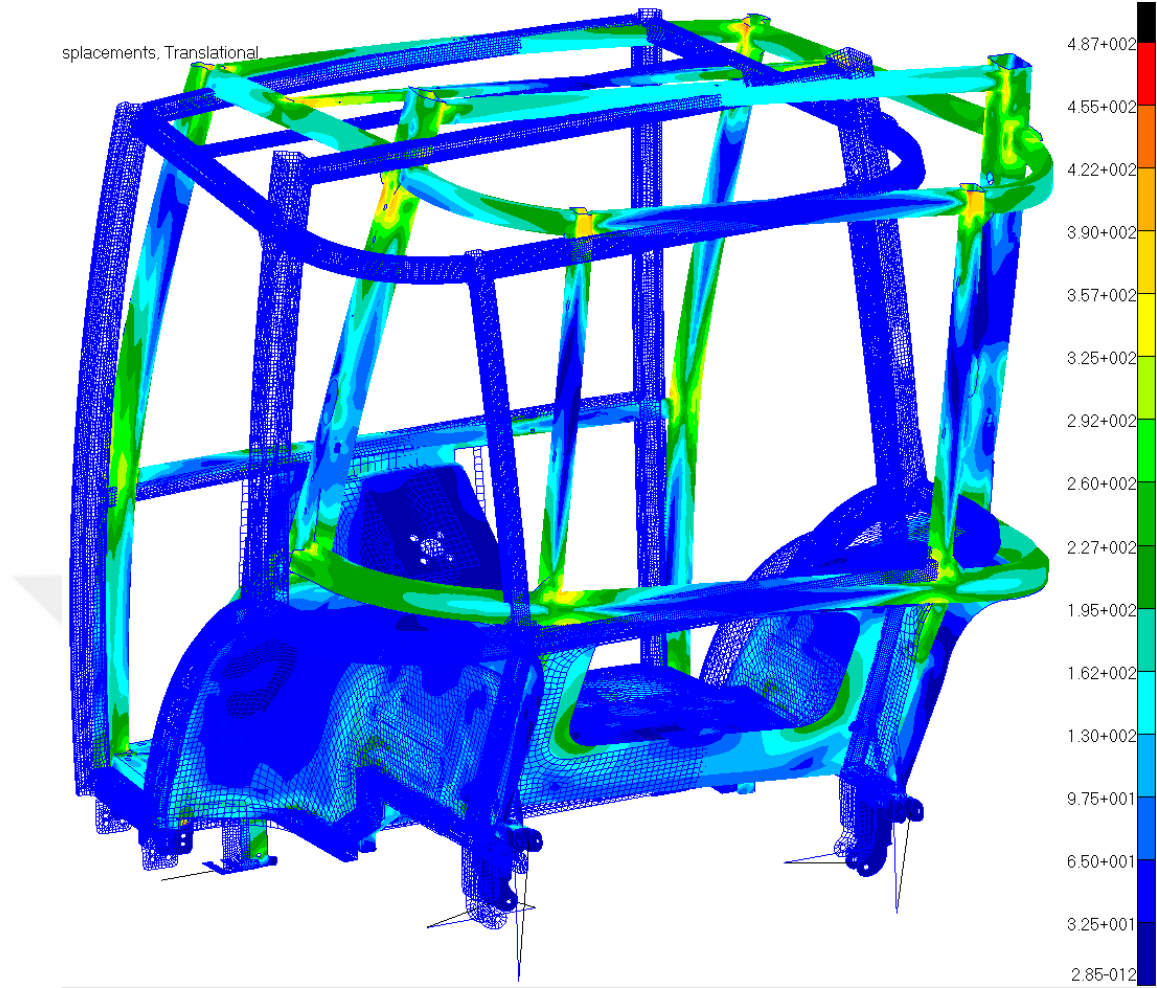
0	0	0	0	0	0
1	30,26	4141	4210	0,06	0,06
2	60,52	9958	8880	0,21	0,20
3	90,78	15874	16600	0,39	0,39
4	121,04	20706	21500	0,55	0,58
5	151,3	25044	24900	0,69	0,70
6	181,56	30861	27600	0,85	0,79
7	211,82	35700	29800	1,01	0,87
8	242,08	38650	31600	1,12	0,93
9	272,34	41214	33300	1,21	0,98
10	302,6	42890	34800	1,27	1,03
				Toplam 7,37	Toplam 6,53



Şekil 4.70 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

3. Simülasyonun ilk adımlarında, düşük direngenliğe (stiffness) sahip Gap ve Spring elemanlar birlikte kullanıldığı için reaksiyon kuvvetleri TAMTEST sonuçları ile tutarlı çıkmıştır. Bu koşulda gerçekleştirilen fiziksel testin (TAMTEST) ilk adımlarında kabin yapısının düşük direngenliğe sahip sınır koşullarından (süspansiyon ve ilk boşluklar) tam olarak yüklenmediği anlamına gelmektedir.

Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.71'de gösterilmiştir. Sağ arka direğin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.71 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.5.4 Dört direkli YKKY - yandan yükleme yük durumu simülasyonu 4

Analizde kullanılan parametreler Çizelge 4.47’de gösterilmiştir.

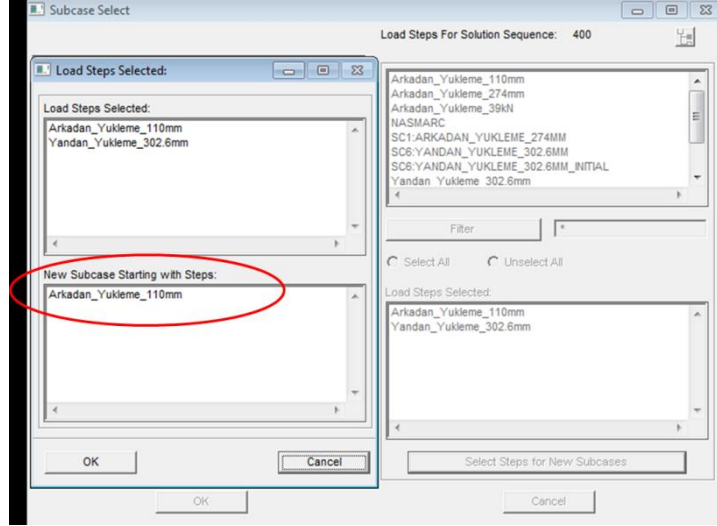
Çizelge 4.47 Simülasyon 4 parametreleri

Analiz Yöntemi	Non-Linear (SOL400) 2 Yük Durumu art arda analiz
Eleman Tipi	2D
Malzeme	6. Malzeme
Arkadan Yükleme Ön Sınır Koşulları	Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)
Arkadan Yükleme Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=1000 N/mm) Y yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) Y yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=70mm, K=3000 N/mm)

Yandan Yükleme Ön Sınır Koşulları	X yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) X yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=40mm, K=20000 N/mm)
Yandan Yükleme Arka Sınır Koşulları	Z yönünde Spring elamanı (K=200 N/mm) X yönünde Spring elamanı (K=50 N/mm) X yönünde Gap Elamanı (İlk Açıklık=40mm, K=20000 N/mm)

Yandan yükleme testi, arkadan yükleme testinden sonra gerçekleştirildiği için yandan yükleme testi plastik deformasyona uğramış kabinde gerçekleştirilmiştir. TAMTEST arkadan yükleme test sonuçlarına göre kabin yapısı üzerinden yük kaldırıldığı zaman kabin yapısı 106,75 mm plastik deformasyon kalmıştır. Dolayısıyla yandan yükleme testi, deforme olmuş ve kabin direngenliği (stiffness) değişmiş kabin üzerinde gerçekleştirilmiştir. TAMTEST arkadan yükleme testi sonrasında, kabin yapısının direngenliği arkadan yükleme yönünde (y yönünde) değiştiği için, yandan yükleme yönündeki (x yönünde) direngenliği önemli ölçüde değiştirmemiş olabilir fakat Simülasyon 4’de bu direngenlik değişikliğinin analiz sonuçları üzerine etkileri incelenmek istenmiştir.

Şekil 4.72’de gösterildiği gibi SOL400 (Implicit Non-Linear Analysis) analiz yönteminde Arkadan Yükleme 110 mm yük durumu, Yandan Yükleme yük durumunun başlangıç adımı olarak seçilmiştir. Böylece analiz programı, Arka Yükleme 110 mm yük durumunu çözdükten sonra, deforme olmuş yapı üzerine Yan Yükleme yük durumunun simülasyonunu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.73’te kalıcı deformasyon olan Arkadan Yükleme 110 mm yüklemesi sonrası, Yandan Yükleme yük senaryosunun başlangıç adımı gösterilmiştir.

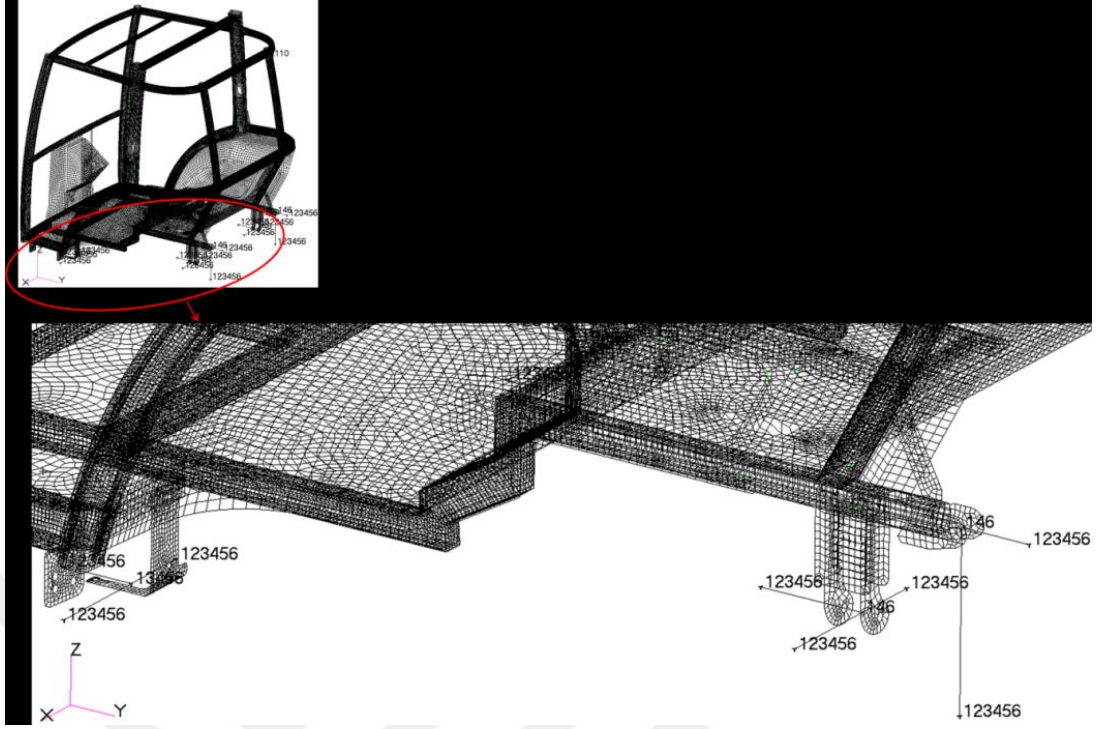


Şekil 4.72 SOL400 (implicit non-linear analysis) yük senaryo sıralaması

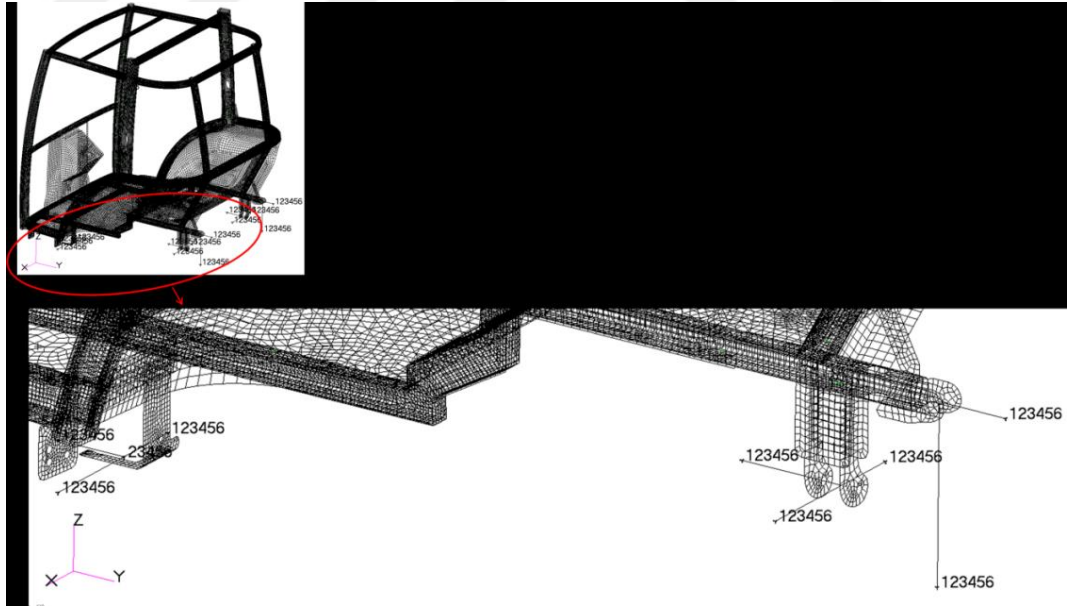


Şekil 4.73 Simülasyon 4 arka yükleme (110 mm) yük durumu sınır koşulları

Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te sırasıyla Arkadan Yükleme (110 mm) sınırı koşulları ve Yandan Yükleme sınır koşulları gösterilmiştir. Arkadan Yükleme sınırı koşulları TAMTEST sonuçları ile en tutarlı analiz sonuçlarının çıktığı Simülasyon 16'daki sınır koşulları kullanılmıştır. Yandan Yükleme sınır koşulları TAMTEST sonuçları ile en tutarlı analiz sonuçlarının çıktığı Simülasyon 3'deki sınır koşulları kullanılmıştır.



Şekil 4.74 Simülasyon 4 arka yükleme (110 mm) yük durumu sınır koşulları

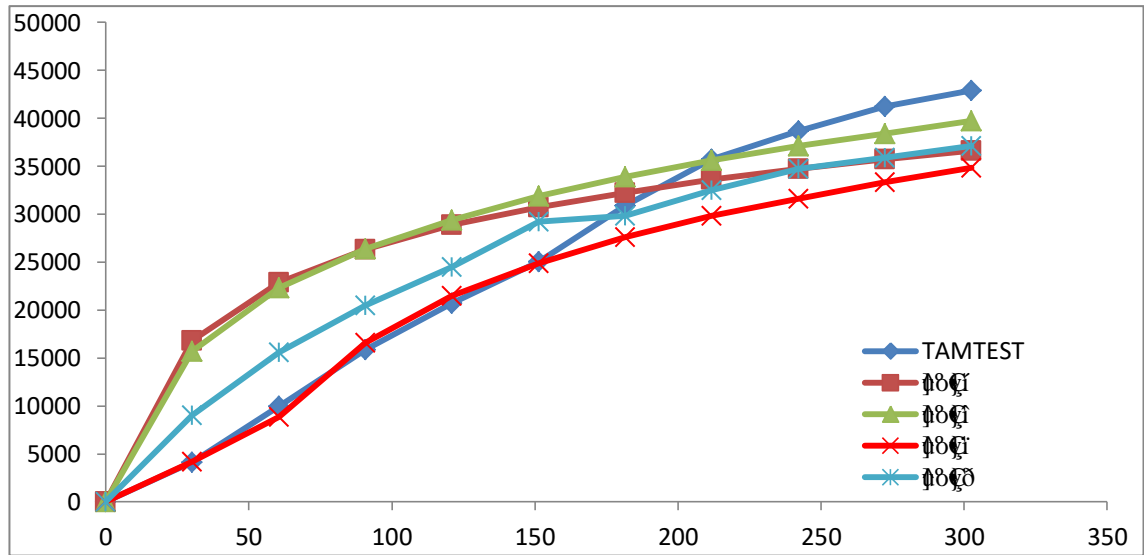


Şekil 4.75 Simülasyon 4 yandan yükleme yük durumu sınır koşulları

Çizelge 4.47’de belirtilen parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Deplasman uygulama noktasındaki reaksiyon kuvvetleri ve her basamakta absorbe edilen enerji miktarı, TAMTEST sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.48’de ve Deplasman-Reaksiyon Kuvveti Grafikleri Şekil 4.76’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.48 Simülasyon 4 reaksiyon kuvvetleri

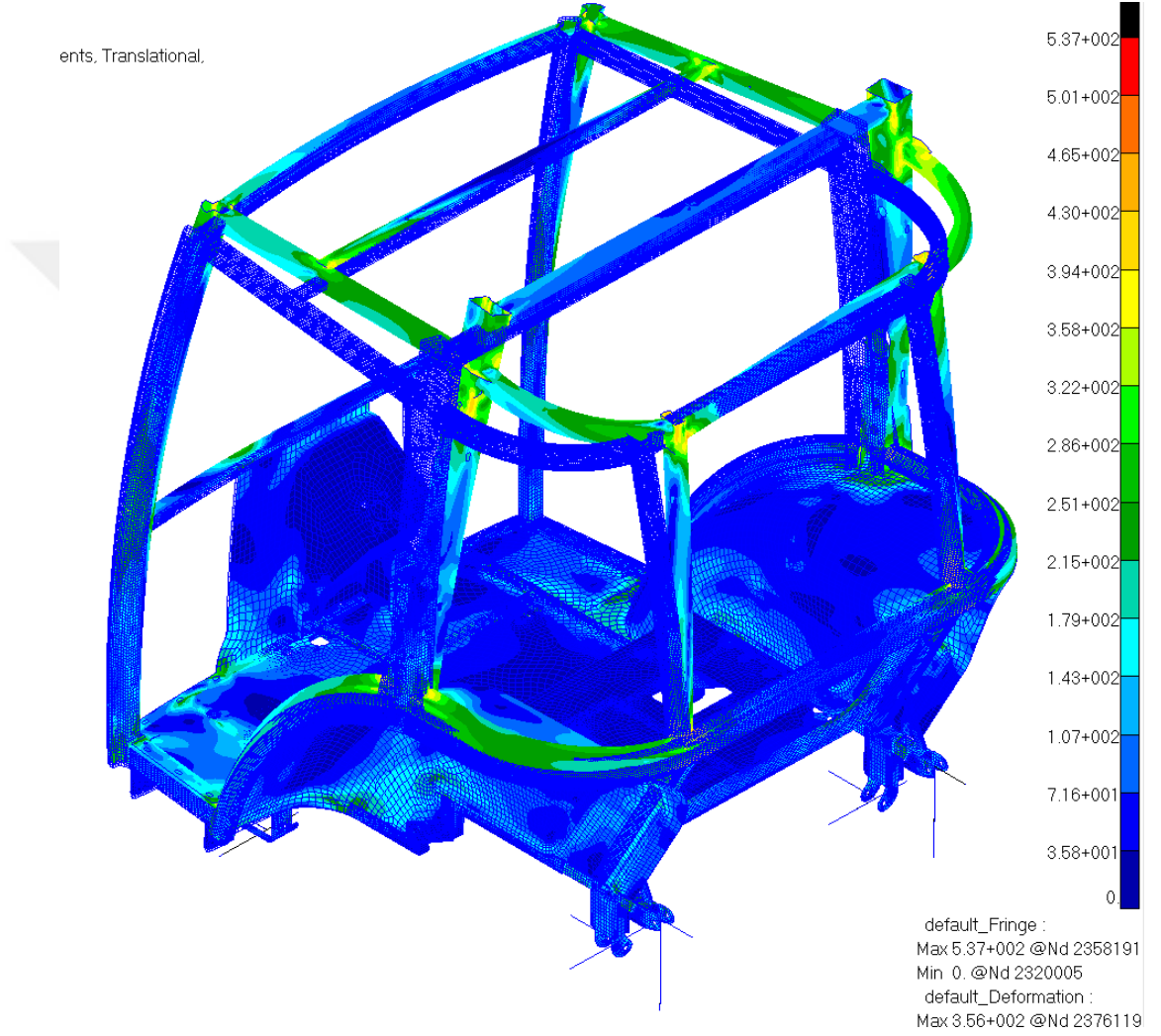
Adım	Deplasman (mm)	TAMTEST Reaksiyon Kuvveti (N)	4. Simülasyon Reaksiyon Kuvveti (N)	TAMTEST Enerji Absorbesi (kJ)	4. Simülasyon Enerji Absorbesi (kJ)
0	0	0	0	0	0
1	30,26	4141	9010	0,06	0,14
2	60,52	9958	15600	0,21	0,37
3	90,78	15874	20500	0,39	0,55
4	121,04	20706	24500	0,55	0,68
5	151,3	25044	29200	0,69	0,81
6	181,56	30861	29800	0,85	0,89
7	211,82	35700	32500	1,01	0,94
8	242,08	38650	34700	1,12	1,02
9	272,34	41214	35900	1,21	1,07
10	302,6	42890	37100	1,27	1,10
				Toplam 7,37	Toplam 7,57



Şekil 4.76 Deformasyon - reaksiyon kuvveti grafiği

Arkadan yükleme yönündeki kalıcı deformasyon yükleme yönündeki direngenliği etkilediği için Yandan Yükleme yönündeki yükleme sonuçlarını önemli ölçüde değiştirmemiştir.

Yükleme sonucu Von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.77’de gösterilmiştir.



Şekil 4.77 Son basamaktaki deformasyon ve Von-Mises gerilmesi

4.6. İstatiksel Bulgular ve Genel Değerlendirme

İstatistiksel analiz SPSS 22.0 (Statistical Programme Social Sciences) paket programı ile yapılmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde, kantitatif (nicel) veriler için tanımlayıcı istatistiksel metotlardan ortalama, standart sapma, medyan, minimum ve maksimum değerler verilmiştir. Normal dağılan verilerin tespitinde, kolmogrow smirrov testi uygulanmıştır. Verilerin normal dağılmaması ve her grupta 10 veri (simülasyon) olması sebebiyle, ikili grupların karşılaştırılmasında mann whitney u testi kullanılmıştır. Tüm istatistiksel hesaplamalar, %95 güven aralığında, p ve lt; 0,05 anlamlılık düzeyinde değerlendirilmiştir.

İstatistik çalışma sonuçları “Ekler” bölümünde özetlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 2 direkli ve 4 direkli traktör koruyucu yapıları için simülasyon prosedürü geliştirilmiştir. Literatür çalışmasıyla başlayan çalışmada, öncelikle mevcut simülasyon yöntemleri belirli kabin yapılarına uygulanmıştır.

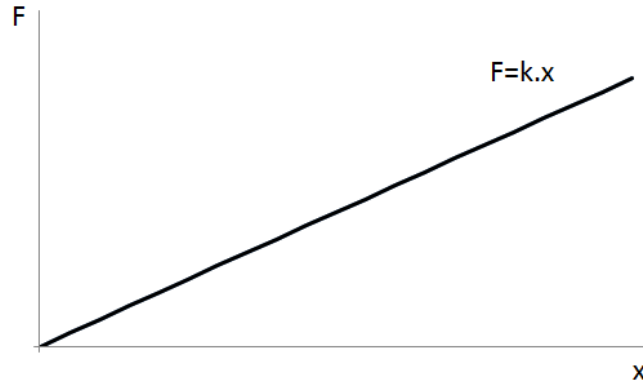
Traktör kabin yapıları bilgisayar ortamında modellenerek birçok sonlu elemanlar analiz denemesi gerçekleştirilmiştir. Her denemede analiz sonuçlarını etkileyecek olan parametreler (malzeme, sınır koşulu, analiz yöntemi vb.) değiştirilerek, analiz parametrelerinin analiz sonuçlarına etkisi belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analiz denemelerinin amacı, gerçekleştirilmiş olan fiziksel test sonuçları ile tutarlı olacak parametrelerin belirlenmesi ve simülasyon yaklaşımı geliştirilmesidir.

Gerçekleştirilen kabin testlerinin amacı, hesaplanmış olan enerji miktarının kabin tarafından absorbe edilmesini sağlamaktır. Kabin yapısının analiz benzetişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Buna göre kabin yapısı ve kabin bağlantı noktaları belirli bir direngenliği olan yay gibi düşünülebilir. Bu yay sabitlerinin direngenliği (stiffness) yapının geometrisi (kalınlık, uzunluk, kesit vb.) ve malzeme özelliklerine bağlıdır.



Şekil 5.1 Kabin testi simülasyon benzetişimi

Yüklemelerin elastik bölgede olduğu testlerde yapının direngenliği (stiffness) değişmediği için (ya da ihmal edilecek kadar az değiştiği için), yapıyı deforme etmek için gerekli olan kuvvet, deformasyon ile doğrusal olarak değişecektir.

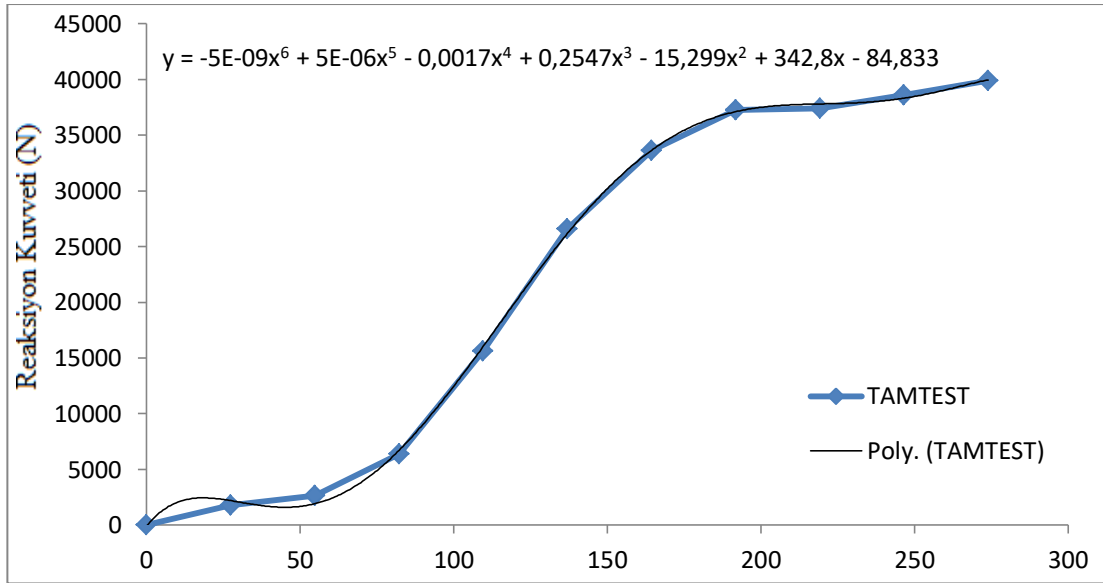


Şekil 5.2 Elastik bölge yüklemesi kuvvet-deformasyon grafiği

Yüklemenin plastik bölgeye geçtiği testlerde ise kabin direngenliği (stiffness) ve sınırı koşullarının direngenliği (stiffness) plastik deformasyondan dolayı her adımda değiştiği için Kuvvet-Deformasyon grafiği doğrusal olarak değişmektedir. (Şekil 5.2)

Şekil 5.3'te arkadan yükleme testinin kuvvet-deformasyon grafiğinin 6. dereceden denklemi gösterilmiştir. Buna göre bu denklemin türevi alınacak olursa, yapının ve sınır koşullarının direngenliğinin (stiffness) deformasyona bağlı denklemi elde edilmiş olacaktır:

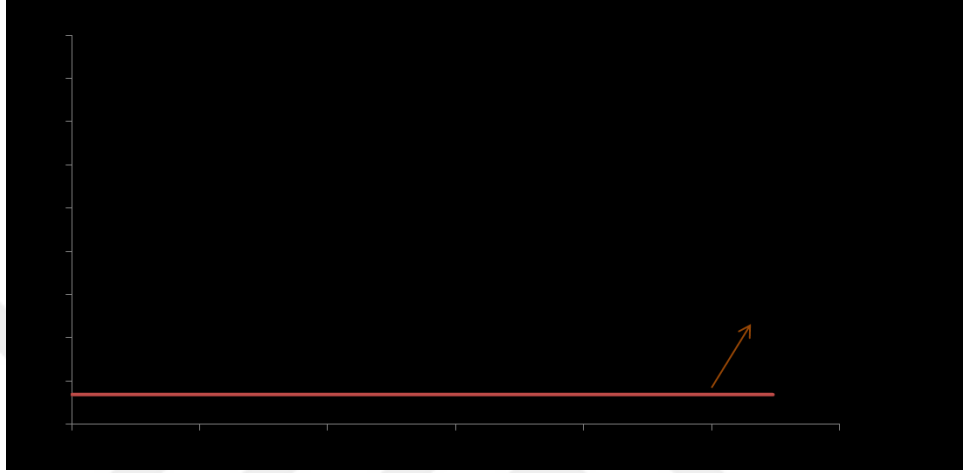
$$k = -3E-08x^5 + 2,5E-05x^4 - 0,0068x^3 + 0,7641x^2 - 30,598x + 342,8 \quad \text{Eşitlik 5-1}$$



Şekil 5.3 Plastik bölge yüklemesi kuvvet-deformasyon grafiği

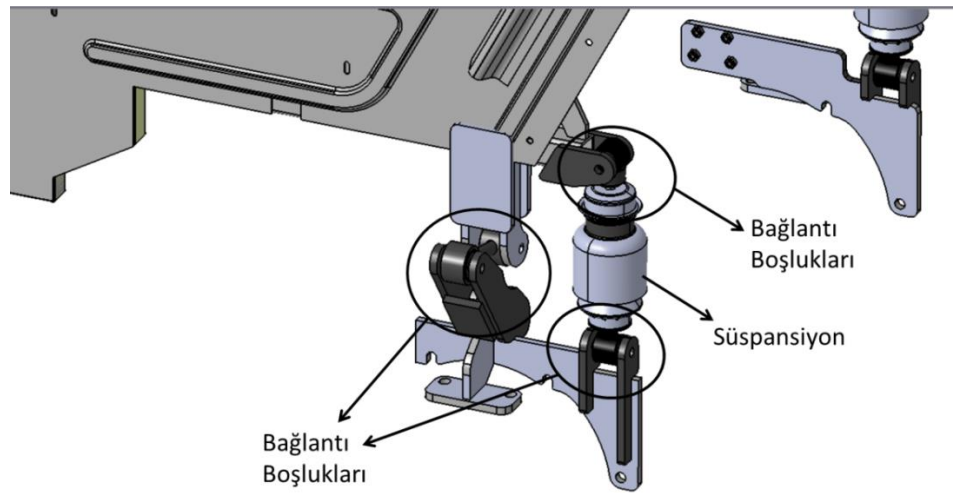
Başka bir deyişle, benzetimi yapılan arka yükleme testinin yay sabitinin deformasyona bağlı denklemi elde edilmiştir. Buna göre doğrusal olmayan arka gövde testi için kabin

yapısının direngenlik (stiffness) değişimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen simülasyonların başarısı, kabin yapısının ve sınır koşullarının direngenliğinin (stiffness) deformasyona bağlı olarak ne kadar doğru modellendiği ile yakından ilintilidir. Kabinin direngenliği (stiffness) yüklemenin her adımında değiştii için, simülasyonlarda da kabin yapısının direngenliğinin deformasyona bağlı olarak değişken olarak modellenmesi gerekmektedir.



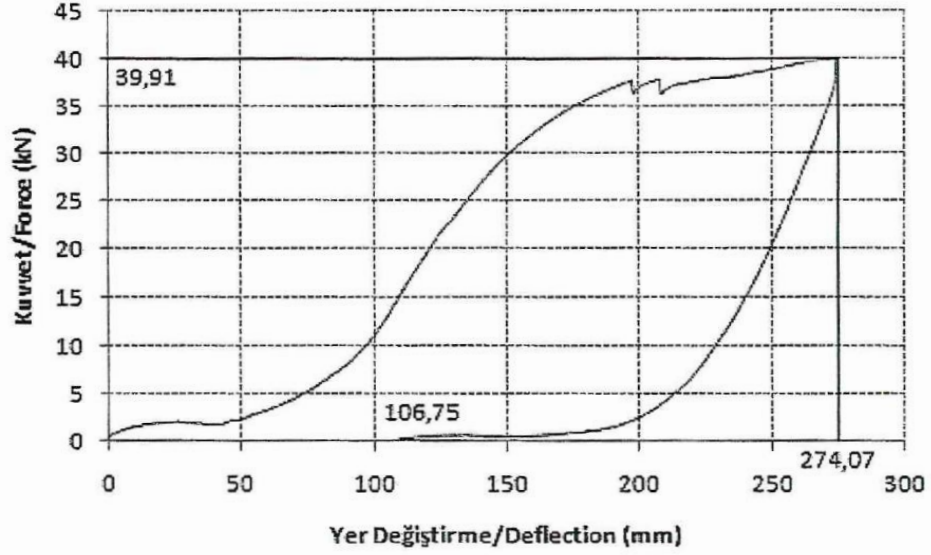
Şekil 5.4 Kabin yapısı direngenlik (stiffness) grafiği

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda birçok farklı parametrenin analizlerin sonucuna olan etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarına en majör etkilerin sınır koşullarının modellenmesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.5'te süspansiyon ve süspansiyon bağlantıları gösterilmiştir.



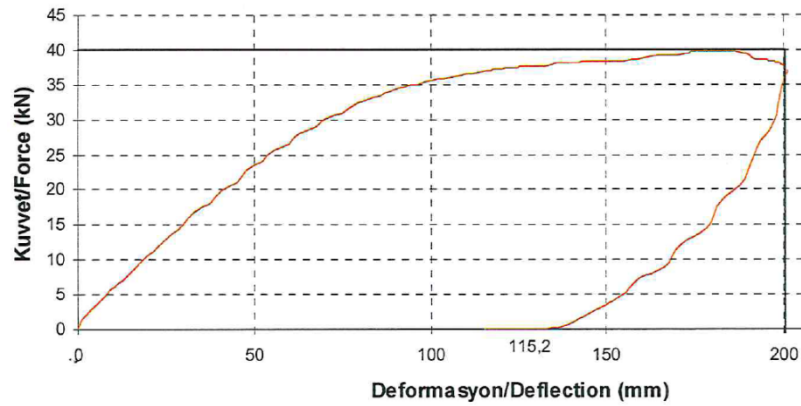
Şekil 5.5 Kabin arka süspansiyon bağlantısı

Şekil 5.6’da süspansiyonlu kabin iskeleti test sonucu gösterilmiştir. Bu test sonucuna göre süspansiyonun ve süspansiyon bağlantı boşluklarından dolayı yapı hareket ettiği için yüklemenin ilk adımlarında düşük reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra yüklemenin bütün yer değiştirmesi 274 mm çıkmıştır.



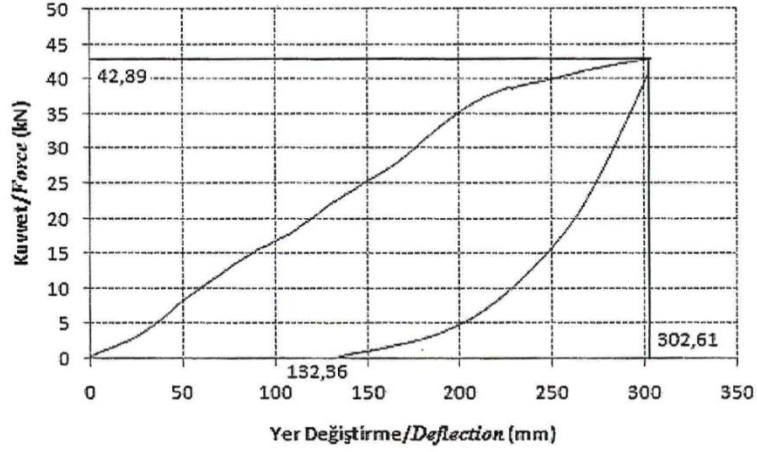
Şekil 5.6 Süspansiyonlu çerçeve iskeleti arkadan yükleme test sonucu

Şekil 5.7’de süspansiyonsuz kabin iskeleti test sonucu gösterilmiştir. Bu test sonucuna göre süspansiyonun ve süspansiyon bağlantı boşlukları olmadığından dolayı yapı hareket etmediği için yüklemenin ilk adımlarında yapı yüklenmeye başlamış ve yüksek reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra yüklemenin bütün yer değiştirmesi 200 mm çıkmıştır; süspansiyonlu çerçeve model test sonucunun toplam yer değiştirmesinden (274 mm) düşüktür.



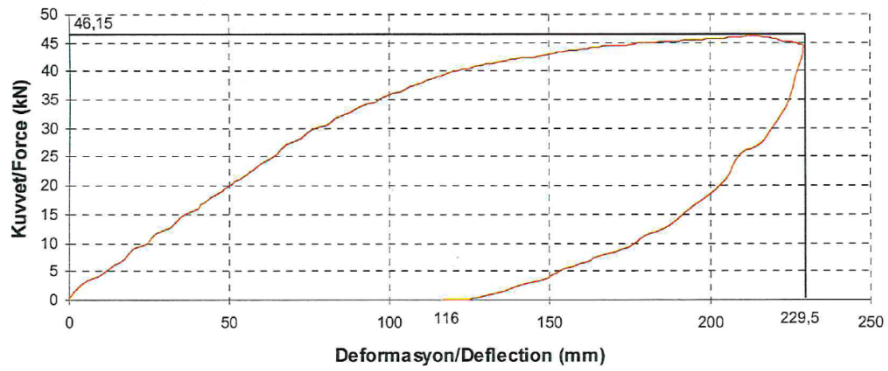
Şekil 5.7 Süspansiyonsuz çerçeve iskeleti arkadan yükleme test sonucu

Şekil 5.8’de süspansiyonlu yapı iskeleti test sonucu gösterilmiştir. Bu test sonucuna göre süspansiyonun ve süspansiyon bağlantı boşluklarından dolayı kabini hareket ettiği için yüklemenin ilk adımlarında düşük reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra yüklemenin bütün yer değiştirmesi 302 mm çıkmıştır.



Şekil 5.8 Süspansiyonlu çerçeve iskeleti yandan yükleme test sonucu

Şekil 5.9’da süspansiyonsuz kabin iskeleti test sonucu gösterilmiştir. Bu test sonucuna göre süspansiyonun ve süspansiyon bağlantı boşlukları olmadığından dolayı yapı hareket etmediği için yüklemenin ilk adımlarında kabin yüklenmeye başlamış ve yüksek reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra yüklemenin bütün yer değiştirmesi 229 mm çıkmıştır; süspansiyonlu kabin model test sonucunun toplam yer değiştirmesinden (302 mm) düşüktür.



Şekil 5.9 Süspansiyonsuz çerçeve iskeleti yandan yükleme test sonucu

KAYNAKLAR

Anonim, 2014 2003/37/AT Tip Onayı Yönetmeliği

Anonim, 2012 87/402/AT Tip Onayı Yönetmeliği

Anonim, 2019. <http://iloencyclopaedia.org/component/k2/94-58-safety-applications/rollover>, erişim tarihi:21.04.2018

Anonim, 2019. <http://safer-omur.net>, erişim tarihi:16.06.2018

Anonymous, 1943, NACA-TN-902, Description of Stress-Strain curves by three parameters

Anonymous, 1995. NIOSH Publication, Safe Grain and Silage Handling: 95-109

Anonymous, 2005, MSC. Nastran Implicit Nonlinear (SOL 600) User's Guide, 2005 : 47-168

Anonymous, 2013, OECD Tractor Codes Brochure,

Anonymous, 2014 IPENZ Practice Note 12 Operator Protective Structures

Anonymous, 2015a CEMA PT29, May 2015, Virtual Testing Requirements for Rops

Anonymous, 2015b OECD Annual Meeting, Potential Inclusion of Virtual Testing in the OECD Test Procedures

Anonymous, 2015c, GROUPE UTAC CERAM, Virtual Testing Method for Approval Technical Working Group Meeting – Tractor codes

Anonymous, 2018 OECD Standard Code for Official Testing of Protective Structures on Agricultural and Forestry Tractors-Code 4 (Static Test). OECD

Chisholm C. J., 1979a. Experimental Validation of a Tractor Overturning Simulation

Chisholm C. J., 1979b. The Effect of Parameter Variation on Tractor Overturning and Impact Behavior

- Fabbri and Ward, 2002, Validation of a Finite Element Program for Design of Roll-Over Protective Framed Structures (ROPS) for Agricultural Tractors
- Gölbaşı M., 2002. Tarım Alet-Makine ve Traktörlerin Kullanımından Kaynaklanan İş Kazaları Nedenlerinin ve Tahmini Kaza Maliyetleri İndeksinin Belirlenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Ankara.
- Hard, D., Myersand, L.J.R., Gerberich. S.G., 2002. Traumatic Injuries in Agriculture. Journal of Agricultural Safety and Health, 8 (1) : 51-65
- Murphy, D. and Buckmaster, D. 2003 Rollover Protection for Farm Tractor Operators. Penn State College of Agricultural Sciences, Agricultural and Biological Engineering
- Murphy D.J. and Sommer 2004. Display of Stability Data for Safe Tractor Operation. NEW YORK Northeast Center for Agricultural Safety and Health Annual Report Summary Fiscal Year
- OECD 2003. A new proposal for Roll-Over Protective Structures (ROPS) Self Deployable Protective Structures for Agricultural Tractors. AGR/CA/T(2003)23. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France
- OECD Standard Codes for the Official Testing of Agriculture and Forestry Tractors Virtual Testing, TAD/CA/T/WD(2015)10, Trade and Agriculture Directorate Committee for Agriculture, 2010
- Onurbaş A., 1996. Ülkemizdeki Traktörlerin Meyilde Yana Devrilmeden Sonraki Yuvarlanmaya Etkili Parametrelerin İncelenmesi. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 1439, Bilimsel Araştırma ve İncelemeler:797, Ankara

Peker A. ve Özkan A., 1994. 1973-1993 Yılları Arasında Karaman Yöresinde Meydana Gelen Traktör ve Tarım İş Makinaları Kazalarının Değerlendirilmesi, Tar. Mek. 15. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, Antalya.

Regulation (EU) No 167/2013

Regulation (EU) No 371/2010

Schwanghart, H. 1982. Umsturzverhalten von Traktoren und Auswirkungen auf die Schutzvorrichtungen und die Sicherheit. Institut für Kraftfahrtechnik, Forderwesen und Agrartechnik Lehrstuhl für Landmaschinen, Munchen, Germany

Silleli H., 2007, Research on Applying an Anchor Mechanism to Orchard and Vineyard Tractors Produced in Turkey

Silleli H. ve ark., 2009, Tarım ve Orman Traktörlerinde Ön Sert Bölgenin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma

Stellman, J. Mager. 1998 Encyclopedia of Occupational Health and Safety, Volume3

Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S., 1959, Theory of Plates and Shells

TÜİK, 2019

Young, Warren C. and Budynas, Richard G., 2002, Roark's Formulas for Stress and Strain

EKLER

Ek 1 Simülasyon 1 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	135
Ek 2 Simülasyon 1 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	136
Ek 3 Simülasyon 2 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	137
Ek 4 Simülasyon 2 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	138
Ek 5 Simülasyon 3 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	138
Ek 6 Simülasyon 3 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	139
Ek 7 Simülasyon 4 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	140
Ek 8 Simülasyon 4 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	141
Ek 9 Simülasyon 5 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	142
Ek 10 Simülasyon 5 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	143
Ek 11 Simülasyon 6 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	144
Ek 12 Simülasyon 6 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	145
Ek 13 Simülasyon 7 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	146
Ek 14 Simülasyon 7 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	147
Ek 15 Simülasyon 8 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	148
Ek 16 Simülasyon 8 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	149
Ek 17 Simülasyon 9 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	150
Ek 18 Simülasyon 9 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	151
Ek 19 Simülasyon 10 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	152
Ek 20 Simülasyon 10 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	153
Ek 21 Simülasyon 11 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	154
Ek 22 Simülasyon 11 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	155

Ek 23 Simülasyon 12 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	156
Ek 24 Simülasyon 12 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	157
Ek 25 Simülasyon 13 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	158
Ek 26 Simülasyon 13 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	158
Ek 27 Simülasyon 15 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	159
Ek 28 Simülasyon 15 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri	160



Simülasyon 1 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge modül, arka direk üst bölge modül ve ön direk üst bölge modül arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p<0,05$) (Ek 1). Bu farklılık simülasyon 1 sonuçlarında simülasyon 16 sonuçlarına göre medyan değerlerinin daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur. ($p>0,05$)

Ek 1 Simülasyon 1 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 1					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	304,64	32,97	314,81	230,61	335,94	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,971
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	17319,27	26832,56	6666,30	3589,84	90400,86	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,011
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	312,22	33,97	321,52	238,21	346,89	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,579
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	24525,56	32101,52	11736,53	5733,87	110335,09	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,015
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	246,00	18,53	249,16	217,42	270,53	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,063
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	50638,73	26680,14	41489,24	25273,33	109199,28	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,063
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	276,84	27,13	284,50	221,05	305,14	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,684
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	106427,88	72736,01	80113,20	42315,43	268261,66	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,105
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	220,08	31,28	228,90	154,87	252,61	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,089
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	81649,32	50004,96	64416,95	35031,72	187945,91	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,165
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	272,19	26,68	279,03	215,97	300,81	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,436
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	44265,16	39991,39	28278,84	15006,53	143600,38	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,043
Reaksiyon Kuvveti (N)	31270,00	5484,33	33150,00	21100,00	37000,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,075
Enerji Absorbesi (kJ)	0,81	0,22	0,89	0,29	1,00	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,063

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 1 ve simülasyon 16 gerilim analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge gerilim ve arka direk üst bölge gerilim arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p<0,05$) (Ek 2). Bu farklılık simülasyon 1 sonuçlarının simülasyon 16

sonuçlarına göre medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p>0,05$) (Ek 2).

Ek 2 Simülasyon 1 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 1					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0477	0,0314	0,0477	0,0026	0,0936	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,023
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0293	0,0200	0,0278	0,0022	0,0605	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,023
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0061	0,0030	0,0060	0,0020	0,0107	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,075
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0038	0,0022	0,0036	0,0008	0,0072	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,315
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0038	0,0022	0,0036	0,0008	0,0072	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,105
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0103	0,0063	0,0100	0,0015	0,0200	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,035

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 2 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge modül, arka direk üst bölge modül ve orta direk üst bölge modül arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır

($p < 0,05$) (Ek 3). Bu farklılık simülasyon 1 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre medyan değerlerinin daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p > 0,05$)

Ek 3 Simülasyon 2 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 2					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	307,11	31,99	317,87	235,36	336,59	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,853
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	15491,35	23750,45	6080,61	3515,74	80382,81	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,009
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	310,69	34,27	320,74	238,66	345,81	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,631
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	25157,04	31492,87	11908,55	5752,45	106926,65	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,019
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	242,48	23,95	247,78	197,35	270,81	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,089
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	57588,23	34120,62	45035,23	26906,32	132449,97	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,105
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	278,08	26,23	285,56	224,25	305,56	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,579
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	26615,85	21043,60	18427,11	11000,42	79127,27	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,043
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	217,85	32,89	226,57	143,10	251,08	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,123
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	82855,90	51326,18	63564,85	37864,91	197645,94	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,165
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	269,75	30,34	278,26	201,75	300,36	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,481
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	46644,91	43773,06	28855,90	15269,12	155670,72	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,052
Reaksiyon Kuvveti (N)	29590,00	6351,46	31600,00	17300,00	35700,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,218
Enerji Absorbesi (kJ)	0,76	0,23	0,85	0,24	0,97	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,143

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 2 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge gerinim ve arka direk üst bölge gerinim arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p < 0,05$) (Ek 4). Bu farklılık simülasyon 2 sonuçlarının simülasyon 16

sonuçlarına göre medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p>0,05$) (Ek 4).

Ek 4 Simülasyon 2 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 2					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0509	0,0320	0,0528	0,0029	0,0957	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,015
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0287	0,0201	0,0273	0,0022	0,0601	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,023
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0056	0,0029	0,0055	0,0015	0,0101	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,089
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0155	0,0084	0,0156	0,0028	0,0278	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,075
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0036	0,0020	0,0036	0,0007	0,0066	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,143
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0100	0,0063	0,0097	0,0013	0,0197	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,105

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 3 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 5).

Ek 5 Simülasyon 3 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 3					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	253,04	47,19	260,85	161,32	307,91	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,481
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	63732,04	60148,12	41122,69	8226,20	179241,55	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,853
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	250,36	49,00	259,02	160,95	307,84	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,529
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	89689,78	71106,33	68550,06	17252,44	218093,73	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,631
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	187,30	41,87	201,20	121,85	233,26	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,684
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	128525,51	52238,01	122803,00	61415,76	198714,19	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,143
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	245,70	30,89	250,28	180,26	281,66	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,579
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	51810,22	39362,46	37795,94	18064,66	142833,10	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,912
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	156,02	57,78	167,85	60,29	220,92	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,684
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	155880,54	48713,46	161843,69	83333,17	208616,17	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,052
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	224,88	49,84	240,36	128,38	276,00	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,684
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	115263,91	69749,11	100462,69	36153,56	218341,02	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,393
Reaksiyon Kuvveti (N)	20390,00	6840,80	18950,00	11200,00	30100,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,529
Enerji Absorbesi (kJ)	0,52	0,21	0,51	0,15	0,81	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 3 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 6).

Ek 6 Simülasyon 3 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 3	Simülasyon 16	P
--	--------------	---------------	---

	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0126	0,0133	0,0067	0,0009	0,0374	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,796
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0063	0,0060	0,0039	0,0007	0,0178	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,739
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0019	0,0011	0,0017	0,0006	0,0038	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,481
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0075	0,0049	0,0067	0,0013	0,0156	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,971
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0012	0,0008	0,0011	0,0003	0,0027	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,393
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0032	0,0025	0,0024	0,0006	0,0076	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 4 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 7).

Ek 7 Simülasyon 4 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

Simülasyon 4	Simülasyon 16	p
--------------	---------------	---

	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	272,78	48,30	286,98	168,70	321,39	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,684
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	43784,68	53275,50	16753,53	5470,16	167857,81	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,280
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	285,86	50,42	301,72	178,89	337,57	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	1,000
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	49322,36	58638,54	20994,12	7160,61	187909,70	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,165
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	209,44	38,19	223,63	137,17	249,43	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,739
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	97395,00	56911,31	74235,13	39622,73	198800,00	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,684
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	258,58	32,47	267,54	189,41	292,65	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,853
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	41328,93	38107,67	26208,69	13714,30	136662,59	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,280
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	181,09	56,23	203,82	69,55	235,15	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,796
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	126297,10	59169,34	111977,17	56028,78	207607,14	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,436
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	244,78	47,20	262,74	143,70	288,90	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,912
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	85767,35	69056,99	53794,40	23393,05	218050,48	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,739
Reaksiyon Kuvveti (N)	25230,00	7588,74	27050,00	12400,00	33600,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,739
Enerji Absorbesi (kJ)	0,65	0,24	0,70	0,17	0,92	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 4 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 8).

Ek 8 Simülasyon 4 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 4					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	

Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0234	0,0215	0,0189	0,0010	0,0588	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,353
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0186	0,0166	0,0152	0,0010	0,0471	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,190
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0031	0,0020	0,0030	0,0007	0,0063	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,971
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0108	0,0068	0,0104	0,0014	0,0213	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,393
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0020	0,0013	0,0018	0,0003	0,0042	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	1,000
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0055	0,0042	0,0050	0,0007	0,0124	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,631

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 5 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 9).

Ek 9 Simülasyon 5 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

Simülasyon 5					Simülasyon 16					P
%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	

Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	266,56	56,09	273,15	155,10	339,57	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,631
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	61324,47	51841,71	43664,07	12147,76	172328,22	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,684
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	256,73	53,79	259,74	154,54	332,44	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,631
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	89812,38	60198,35	76397,72	22513,67	209400,50	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,481
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	191,75	39,87	199,84	117,51	241,55	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,796
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	117677,07	46782,99	115333,06	53869,30	190765,62	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,218
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	258,20	40,10	265,24	174,57	306,26	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,971
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	52038,40	36805,14	39728,58	19333,50	138331,36	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,971
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	159,66	57,00	163,94	57,88	233,90	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,796
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	149962,26	47854,96	156910,43	72662,98	200271,54	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,089
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	229,94	53,97	239,27	123,25	297,21	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,796
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	110721,45	57765,35	102938,15	38177,73	209607,39	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,481
Reaksiyon Kuvveti (N)	23230,00	7055,19	24350,00	11300,00	31500,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,853
Enerji Absorbesi (kJ)	0,59	0,23	0,63	0,15	0,86	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	1,000

Simülasyon 5 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 10).

Ek 10 Simülasyon 5 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 5					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0093	0,0087	0,0064	0,0009	0,0280	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,684
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0050	0,0045	0,0035	0,0007	0,0148	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,631

Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0021	0,0013	0,0017	0,0006	0,0045	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,529
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0075	0,0048	0,0067	0,0013	0,0158	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	,0192	0,971
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0013	0,0009	0,0011	0,0003	0,0032	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	,0053	0,529
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0031	0,0023	0,0024	0,0006	0,0078	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	,0131	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 6 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 11).

Ek 11 Simülasyon 6 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 6					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	293,96	65,56	307,96	161,89	365,26	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,853
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	45350,61	50314,46	23089,48	7465,65	162378,03	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,529
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	292,11	67,68	310,04	161,35	367,00	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,684
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	63279,39	61991,70	34515,40	12627,27	196527,18	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,739

Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	211,96	42,27	223,66	131,55	259,50	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,579
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	93643,53	52033,71	75395,23	40705,44	190646,74	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,912
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	274,28	42,63	284,98	183,79	320,00	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,529
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	42568,46	36249,59	28533,51	15389,12	132318,57	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,481
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	180,78	57,96	200,90	66,78	240,03	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,796
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	120821,62	56875,10	109670,30	53963,05	199354,96	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,529
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	254,46	57,77	271,71	137,71	314,67	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,579
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	85165,47	63205,23	59752,17	26657,66	209293,10	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,912
Reaksiyon Kuvveti (N)	26040,00	8353,34	29350,00	12500,00	35800,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,841
Enerji Absorbesi (kJ)	0,66	0,26	0,76	0,17	0,96	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,436

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 6 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p > 0,05$) (Ek 12).

Ek 12 Simülasyon 6 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 6					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0195	0,0176	0,0145	0,0010	0,0489	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,529
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0117	0,0102	0,0097	0,0008	0,0291	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,579
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0032	0,0020	0,0030	0,0007	0,0064	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,971
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0105	0,0066	0,0101	0,0014	0,0208	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,481
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0021	0,0014	0,0019	0,0003	0,0044	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,971
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0053	0,0039	0,0047	0,0007	0,0118	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 7 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında enerji absorbesi dışında kalan bütün değişkenler açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p < 0,05$) Bu farklılık simülasyon 7 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır. Enerji absorbesi de simülasyon 7’de daha düşük olmasına karşın bu farklılık istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p > 0,05$) (Ek 13)

Ek 13 Simülasyon 7 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 7					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	91,33	54,18	91,78	10,37	170,88	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,011
Arka Direk Alt Bölge Modül(Mpa)	8728,23	14,26	8732,80	8696,13	8740,20	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,002
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	87,84	53,04	87,67	9,47	166,80	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,011
Arka Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	9607,15	9,29	9608,99	9588,58	9618,27	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	<0,001
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	62,24	37,21	61,88	7,16	117,75	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,011
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	8615,64	96,29	8585,43	8529,02	8798,20	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	<0,001

Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	119,79	69,55	121,11	14,43	220,76	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,015
Orta Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	8438,32	19,33	8432,83	8419,14	8477,36	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	<0,001
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	36,00	21,37	36,37	3,81	67,03	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,007
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	8984,83	36,05	8973,38	8952,31	9060,86	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	<0,001
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	62,84	36,38	63,73	7,53	115,28	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,009
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	9495,29	11,34	9492,81	9483,53	9519,14	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	<0,001
Reaksiyon Kuvveti (N)	8169,00	3569,36	8155,00	3020,00	13500,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,043
Enerji Absorbesi (kJ)	0,21	0,10	0,20	0,04	0,35	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,063

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 7 ve simülasyon 16 gerilim analiz sonuçları karşılaştırıldığında orta direk alt bölge gerilim arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p < 0,05$) (Ek 14). Bu farklılık simülasyon 7 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p > 0,05$) (Ek 14).

Ek 14 Simülasyon 7 ve Simülasyon 16 gerilim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 7					Simülasyon 16					
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim	0,0105	0,0062	0,0105	0,0012	0,0196	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,796
Arka Direk Üst Bölge Gerilim	0,0091	0,0055	0,0091	0,0010	0,0173	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,853
Orta Direk Alt Bölge Gerilim	0,0072	0,0042	0,0073	0,0008	0,0134	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,035
Orta Direk Üst Bölge Gerilim	0,0142	0,0083	0,0144	0,0017	0,0262	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,105
Ön Direk Alt Bölge Gerilim	0,0040	0,0024	0,0041	0,0004	0,0075	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,105
Ön Direk Üst Bölge Gerilim	0,0066	0,0038	0,0067	0,0008	0,0122	0,0050	0,0047	0,0040	,0001	0,0131	0,315

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 8 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında enerji absorbesi dışında kalan bütün değişkenler açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p < 0,05$) (Ek 15). Bu farklılık simülasyon 8 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre medyan değerlerinin daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır. Enerji absorbesi de simülasyon 8’de daha düşük olmasına karşın bu farklılık istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p > 0,05$) (Ek 15).

Ek 15 Simülasyon 8 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 8					Simülasyon 16					p
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	91,33	54,17	91,78	10,37	170,87	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,011
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	8728,08	14,20	8732,70	8696,13	8740,25	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,002
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	87,83	53,03	87,67	9,47	166,76	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,011
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	9607,21	9,19	9608,85	9588,58	9618,15	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	<0,001
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	62,24	37,21	61,88	7,16	117,75	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,011
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	8615,71	96,34	8585,50	8529,13	8798,18	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	<0,001
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	119,79	69,55	121,11	14,43	220,74	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,015
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	8438,30	19,33	8432,63	8419,41	8477,36	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	<0,001
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	36,00	21,37	36,37	3,81	67,03	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,007

Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	8984,86	35,97	8973,32	8952,16	9060,86	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	<0,001
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	62,84	36,38	63,73	7,53	115,28	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,009
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	9495,38	11,41	9492,65	9483,40	9519,14	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	<0,001
Reaksiyon Kuvveti (N)	8169,00	3569,36	8155,00	3020,00	13500,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,043
Enerji Absorbesi (kJ)	0,21	0,10	0,20	0,04	0,35	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,063

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 8 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge gerinim ve arka direk üst bölge gerinim arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p < 0,05$) (Ek 16). Bu farklılık simülasyon 8 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p > 0,05$) (Ek 16).

Ek 16 Simülasyon 8 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 8					Simülasyon 16					
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0105	0,0062	0,0105	0,0012	0,0196	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,796
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0091	0,0055	0,0091	0,0010	0,0173	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,853
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0072	0,0042	0,0073	0,0008	0,0134	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,035
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0142	0,0083	0,0144	0,0017	0,0262	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,105
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0040	0,0024	0,0041	0,0004	0,0075	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,105
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0066	0,0038	0,0067	0,0008	0,0122	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,315

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 9 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 17).

Ek 17 Simülasyon 9 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 9					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	252,16	37,27	258,11	161,89	291,70	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,436
Arka Direk Alt Bölge Modül(Mpa)	39066,79	53351,29	9494,55	4283,24	162378,03	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,089
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	251,50	37,53	260,49	161,35	289,14	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,481
Arka Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	57571,08	65150,76	26121,27	7260,01	196527,18	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,353
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	205,56	39,77	214,23	131,55	251,22	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,912
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	100581,17	49971,93	89998,43	43591,99	190646,74	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,684
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	242,70	22,90	252,07	183,79	259,12	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,393
Orta Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	38610,32	38020,07	22804,11	11216,17	132318,57	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,190
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	181,08	58,76	203,46	66,78	237,75	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,739
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	119456,54	56429,66	107064,79	53331,00	199354,96	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,579
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	230,36	39,61	250,69	137,71	255,85	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,739
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	82774,65	65693,59	58099,70	20578,42	209293,10	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,684
Reaksiyon Kuvveti (N)	23680,00	6614,76	25450,00	12500,00	31000,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,971

Enerji Absorbesi (kJ)	0,61	0,22	0,66	0,17	0,84	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,971
Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.											

Simülasyon 9 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 18).

Ek 18 Simülasyon 9 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 9					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0295	0,0254	0,0279	0,0010	0,0681	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,190
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0148	0,0140	0,0104	0,0008	0,0398	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,436
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0028	0,0017	0,0024	0,0007	0,0058	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,912
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0116	0,0075	0,0112	0,0014	0,0231	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,280
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0021	0,0014	0,0019	0,00030	0,0045	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,971
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0053	0,0041	0,0044	0,0007	0,0124	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,739
Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.											

Simülasyon 10 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 19).

Ek 19 Simülasyon 10 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 10					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	296,33	73,61	316,12	147,77	375,55	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,739
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	41821,50	45331,72	21395,16	9047,51	146891,37	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,739
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	290,03	70,88	306,71	148,33	369,34	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,739
Arka Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	57181,77	52519,06	35026,99	15086,24	174917,24	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,739
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	209,17	42,80	219,07	120,38	257,51	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,796
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	81916,75	43895,74	68516,84	36992,63	171977,99	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,853
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	273,71	49,68	286,40	170,17	327,06	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,436
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	40943,94	33307,07	27864,49	15738,34	122250,01	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,436
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	178,90	58,76	195,57	61,68	242,64	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,796
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	108988,97	48434,76	99637,50	52035,95	179827,45	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,912
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	251,10	60,54	266,49	125,62	316,59	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,684
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	76731,87	53541,87	56713,14	27349,15	188621,89	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,912
Reaksiyon Kuvveti (N)	22980,00	10837,98	24800,00	,00	34500,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,971
Enerji Absorbesi (kJ)	0,68	0,26	0,72	0,18	0,98	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,481

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 10 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 20).

Ek 20 Simülasyon 10 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 10					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0176	0,0144	0,0151	0,0010	0,0415	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,739
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0105	0,0083	0,0089	0,0008	0,0245	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,739
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0035	0,0021	0,0032	0,0007	0,0070	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,739
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0107	0,0066	0,0104	0,0014	0,0208	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,436
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0022	0,0015	0,0020	0,0003	0,0047	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,853
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0053	0,0038	0,0048	0,0007	0,0116	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 11 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge gerilim, arka direk alt bölge modül, arka direk üst bölge gerilim, arka direk üst bölge modül, orta direk üst bölge gerilim, orta direk üst bölge modül, ön direk üst bölge modül ve reaksiyon kuvveti arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p<0,05$)

(Ek 21). Bu farklılık arka direk alt bölge gerilim, arka direk üst bölge gerilim, orta direk üst bölge gerilim, orta direk üst bölge modül ve reaksiyon kuvveti arasında simülasyon 11 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Arka direk alt bölge modül, arka direk üst bölge modül, orta direk üst bölge modül, ön direk üst bölge modül arasında simülasyon 11 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha düşük çıkmasından kaynaklanmaktadır.

Ek 21 Simülasyon 11 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 11					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	351,76	57,88	368,21	229,89	411,65	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,035
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	18442,66	20947,86	9870,94	5662,15	73307,92	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,035
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	346,48	59,44	361,93	227,58	411,21	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,043
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	28262,09	28023,99	16634,51	8968,09	98096,53	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,043
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	252,18	37,56	260,94	178,01	295,75	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,029
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	49205,57	30118,71	38007,09	24126,70	119709,97	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,029
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	297,24	40,99	307,44	213,00	342,15	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,105
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	28612,04	20320,09	20913,43	12816,68	78540,31	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,105
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	223,08	44,46	233,56	131,54	272,42	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,105
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	72450,63	43228,72	56692,33	34257,77	169506,80	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,089
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	289,54	51,09	303,02	180,50	343,61	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,105
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	45633,41	37450,89	30723,12	17614,03	137468,51	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,043
Reaksiyon Kuvveti (N)	32214,00	7610,97	34000,00	16840,00	40700,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,043
Enerji Absorbesi (kJ)	0,83	0,27	0,90	0,23	1,10	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,052

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 11 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında arka direk alt bölge gerinim, arka direk üst bölge gerinim, orta direk alt bölge gerinim arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p < 0,05$) (Ek 22). Bu farklılık simülasyon 11 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p > 0,05$) (Ek 22)

Ek 22 Simülasyon 11 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 11					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0375	0,0239	0,0377	0,0031	0,0727	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,035
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0227	0,0150	0,0220	0,0023	0,0459	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,043
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0069	0,0036	0,0069	0,0015	0,0123	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,029
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0148	0,0081	0,0148	0,0027	0,0267	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,105
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0042	0,0024	0,0041	0,0008	0,0080	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,089
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0101	0,0062	0,0100	0,0013	0,0195	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,043

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 12 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında ön direk alt bölge modül arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p<0,05$) (Ek 23). Bu farklılık simülasyon 12 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenler açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p>0,05$) (Ek 23).

Ek 23 Simülasyon 12 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 12					Simülasyon 16					P
	̄	SS	Medyan	Min	Max	̄	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim(Mpa)	195,93	62,17	211,95	67,32	263,77	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,190
Arka Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	101538,09	45126,52	93198,98	47042,53	171741,64	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,218
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	193,40	63,75	210,68	61,19	262,48	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,190
Arka Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	123944,38	46990,88	118065,24	63630,34	190046,08	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,218
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	153,21	54,30	166,39	44,29	212,98	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,280
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	129490,78	36155,40	128925,43	77646,29	172318,17	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,143
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	206,37	53,40	220,97	90,67	261,78	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,247
Orta Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	82688,39	43468,85	69059,13	38171,71	168525,27	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,247
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	108,78	50,92	120,13	22,47	173,13	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,143
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	167192,06	18868,94	179825,80	130961,85	180605,45	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,005
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	171,97	62,66	187,30	47,65	241,61	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,218
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	140074,00	41185,38	139713,50	81597,18	189173,95	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,105
Reaksiyon Kuvveti (N)	19325,00	8656,38	20000,00	5100,00	31200,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,481
Enerji Absorbesi (kJ)	0,49	0,25	0,51	0,07	0,82	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,579

Veriler ortalama (\bar{x}), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 12 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 24).

Ek 24 Simülasyon 12 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 12					Simülasyon 16					
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0026	0,0017	0,0023	0,0004	0,0056	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,190
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0020	0,0013	0,0018	0,0003	0,0041	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,190
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0014	0,0008	0,0013	0,0003	0,0027	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,247
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0034	0,0021	0,0032	0,0005	0,0069	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,247
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0007	0,0004	0,0007	0,0001	0,0013	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,143
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0015	0,0009	0,0013	0,0003	0,0030	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,190

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 13 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında ön direk alt bölge modül, ön direk üst bölge modül arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu anlaşılmıştır ($p<0,05$) (Ek 25). Bu farklılık

simülasyon 13 sonuçlarının simülasyon 16 sonuçlarına göre ortalama ve medyan değerlerinin daha yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır. Diğer değişkenlerde simülasyon sonuçları arasındaki farklılık istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p>0,05$).

Ek 25 Simülasyon 13 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 13					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	167,58	65,56	182,66	41,83	242,02	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,105
Arka Direk Alt Bölge Modül(Mpa)	121526,66	41204,99	120443,80	63975,05	172146,41	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,165
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	164,13	66,87	178,78	37,96	239,89	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,122
Arka Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	145309,73	40305,81	147378,31	85461,99	190053,71	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,143
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	126,42	55,22	137,46	27,17	191,60	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,123
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	147051,49	27043,62	154543,78	101969,45	172148,39	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,052
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	183,23	59,37	199,83	56,86	244,99	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,123
Orta Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	100963,84	44849,60	90365,74	49075,77	168712,38	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,143
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	85,72	46,51	87,54	14,36	145,98	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,063
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	176188,09	8412,32	179945,34	155136,42	180413,54	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	<0,001
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	143,58	63,44	155,66	30,03	218,68	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,123
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	158822,65	31820,27	165225,81	106517,01	189175,23	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,023
Reaksiyon Kuvveti (N)	14749,00	7374,84	15100,00	3220,00	25200,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,165
Enerji Absorbesi (kJ)	0,37	0,21	0,38	0,04	0,66	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,247

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 13 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 26).

Ek 26 Simülasyon 13 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

	Simülasyon 13					Simülasyon 16					P
	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0017	0,0012	0,0015	0,0002	0,0038	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,105
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0013	0,0009	0,0012	0,0002	0,0028	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,123
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0010	0,0006	0,0009	0,0002	0,0019	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,123
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0024	0,0016	0,0022	0,0003	0,0050	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,123
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0005	0,0003	0,0005	0,0001	0,0009	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,063
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0010	0,0006	0,0009	0,0002	0,0021	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,123

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 15 ve simülasyon 16 gerilim, modül, reaksiyon kuvveti ve enerji absorbesi analiz sonuçları karşılaştırıldığında hiçbir değişken açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 27).

Ek 27 Simülasyon 15 ve Simülasyon 16 analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırmalarından elde edilen P değerleri

Simülasyon 15	Simülasyon 16	p
---------------	---------------	---

	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	239,99	149,49	301,47	,00	382,54	251,82	132,05	302,56	33,13	383,46	0,684
Arka Direk Alt Bölge Modül(Mpa)	162200,42	257221,18	26960,03	8145,68	641025,64	68276,34	74282,84	26615,54	8022,28	173467,20	0,631
Arka Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	234,32	146,80	290,45	,00	379,08	246,29	129,43	292,84	31,59	381,14	0,684
Arka Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	109255,28	123751,29	44421,79	13285,84	320512,82	82554,28	78243,96	43069,03	12893,64	190665,65	0,631
Orta Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	167,17	103,57	211,70	,00	266,90	176,52	91,22	212,95	23,76	268,77	0,684
Orta Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	126248,73	111161,31	76347,09	34104,39	320512,82	95446,08	58751,72	74684,21	34146,77	172182,35	0,684
Orta Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	213,33	125,03	268,51	,00	322,88	228,03	100,94	269,80	43,38	322,90	0,684
Orta Direk Üst Bölge Modül(Mpa)	293689,51	522455,85	36590,16	16773,74	1282051,28	69826,12	64324,69	35931,39	16781,72	168781,96	0,739
Ön Direk Alt Bölge Gerilim (Mpa)	150,98	97,58	189,05	,00	250,10	157,19	89,58	190,03	16,65	252,36	0,684
Ön Direk Alt Bölge Modül (Mpa)	173718,33	183586,01	103619,82	47259,69	641025,64	111644,70	54265,31	101689,47	47284,74	176359,51	0,739
Ön Direk Üst Bölge Gerilim (Mpa)	199,28	124,77	251,01	,00	319,00	208,84	111,12	252,63	26,20	320,52	0,684
Ön Direk Üst Bölge Modül (Mpa)	218768,80	320254,91	67694,36	25070,55	961538,46	94833,44	70187,47	65924,74	24540,27	187636,14	0,684
Reaksiyon Kuvveti (N)	20797,00	13776,52	25550,00	,00	35600,00	21831,00	12620,05	25800,00	2420,00	35900,00	0,684
Enerji Absorbesi (kJ)	0,52	0,38	0,64	0,00	0,95	0,55	0,35	0,65	0,03	0,96	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

Simülasyon 15 ve simülasyon 16 gerinim analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerinim sonuçları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığı anlaşılmıştır ($p>0,05$) (Ek 28).

Ek 28 Simülasyon 15 ve Simülasyon 16 gerinim analiz sonuçlarının istatistiksel karşılaştırılmalarından elde edilen P değerleri

Simülasyon 15	Simülasyon 16	p
---------------	---------------	---

	%	SS	Medyan	Min	Max	%	SS	Medyan	Min	Max	
Arka Direk Alt Bölge Gerinim	0,0169	0,0174	0,0122	0,0000	0,0470	0,0174	0,0178	0,0124	0,0002	0,0478	0,684
Arka Direk Üst Bölge Gerinim	0,0100	0,0104	0,0070	0,0000	0,0285	0,0103	0,0106	0,0073	0,0002	0,0296	0,684
Orta Direk Alt Bölge Gerinim	0,0032	0,0029	0,0028	0,0000	0,0078	0,0033	0,0028	0,0029	0,0001	0,0079	0,684
Orta Direk Üst Bölge Gerinim	0,0081	0,0071	0,0075	0,0000	0,0192	0,0083	0,0070	0,0077	0,0003	0,0192	0,739
Ön Direk Alt Bölge Gerinim	0,0021	0,0019	0,0019	0,0000	0,0053	0,0022	0,0019	0,0019	0,0001	0,0053	0,684
Ön Direk Üst Bölge Gerinim	0,0048	0,0046	0,0039	0,0000	0,0127	0,0050	0,0047	0,0040	0,0001	0,0131	0,684

Veriler ortalama (%), standart sapma (SS), medyan, minimum (min), maksimum (max) değerler ile değerlendirilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmada mann whitney u testi kullanılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet YAŞARTEKİN

Doğum Yeri : Şanlıurfa

Doğum Tarihi: 21.06.1983

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : İzmit Atılım Lisesi (1999-2001)

Lisans : ODTÜ Makina Mühendisliği Anabilim Dalı (2001-2007)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı (2009-2012)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Yapısal Analiz Mühendisi, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, 2008 - Halen