

**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖRNEK BİR EMU BOJİ ŞASİSİNİN
STATİK ANALİZİ**

Recep UYGUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU**

**EKİM 2017
ÇORUM**

**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖRNEK BİR EMU BOJİ ŞASİSİNİN
STATİK ANALİZİNİN**

Recep UYGUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU**

**EKİM 2017
ÇORUM**

Recep Uygun tarafından hazırlanan “Örnek Bir EMU Boji Şasisinin Statik Analizi” adlı tez çalışması 04/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

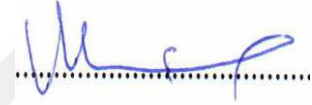
Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU (Danışman)



Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN



Yrd.Doç.Dr. Mithat ŞİMŞEK



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 09/01/2018 tarih ve 2018/12 sayılı kararı ile Recep UYGUN’un Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / Doktora derecesi alması onanmıştır.



Doç.Dr.Cengiz BAYKASOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı beyan ederim.



Recep UYGUN

ÖRNEK BİR EMU BOJİ ŞASİSİNİN STATİK ANALİZİ

Recep UYGUN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2017

ÖZET

Bu tez çalışmasında, örnek bir EMU bojisine ait şasinin Ansys Workbench 14.5 kullanılarak sonlu elemanlar analizi metoduyla statik analizinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Boji yol tarafından üretilen titreşimlerin azaltılarak vagon gövdesine geçmesini sağlayan, hareket esnasında vagonun virajları daha kolay almasını ve yönlenmesini sağlayan mekanik bir sistemdir. Boji şasisi ise boji üzerindeki ekipmanların bağlandığı, bojiye gelen yüklerin sönümlendiği yapıdır. Söz konusu yapıya ait 3 boyutlu çizim Ansys Workbench 14.5 programına aktarılmıştır. Program modülünde Uluslararası Demiryolları Birliği UIC 515 – 4 standardına uygun olarak boji şasisine gelen yükler statik olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda oluşan gerilmeler genel olarak akma sınırının altında kaldığından EMU (elektrikli tren seti) boji şasisinin UIC 515-4 (uluslararası demiryolu birliği) standardına göre genel olarak uygun olduğu görülmüş ve iyileştirme yapılması gereken komponentler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EMU, boji, statik analiz, sonlu elemanlar metodu, Ansys Workbench

STATIC ANALYSIS OF AN EXAMPLE OF EMU BOGIE FRAME

Recep UYGUN

HITIT UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2017

ABSTRACT

In this thesis, a numerical investigation for the static analysis of an EMU bogie chassis is proposed by performing the finite element analysis method. In this system, the bogie provides maneuverability by reducing the mechanical vibrations due to the numerous ground effects. What is more, bogie chassis is the significant structure where the loads on the bogie are compensated. By taking the Railway Association UIC 515-4 standard into account, a rigorous analysis is utilized in Ansys Workbench 14.5[®] for the aforementioned system. The contribution of this study lies in two aspects. In the former one, it has been shown that the stress levels on the bogie chassis are below the yielding point as it is specified in the considered standard. In the latter one, the components to be improved in terms of the strength are identified.

Keywords: EMU, bogie, static analysis, Finite Element Method, Ansys Workbench

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teşvik ve destekleri ile her türlü problemin üstesinden gelmemde bana yardımcı olan saygıdeğer danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU'na ve Yrd. Doç. Dr. Emin ERDİN'e, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez konum ile ilgili literatür araştırımda desteğini esirgemeyen TÜVASAŞ'taki çalışma arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Erbil BİLGİN'e , cad verisinin hazırlanması ve Ansys Workbench analizine katkılarından dolayı kadim dostlarım Hakan BALCI ile Başaran Bahadır KOÇER'e ve profesyonel destek aldığım Arman İNAN'a, tezin düzenlenmesindeki desteklerinden dolayı Recep BAYDEMİR'e, hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim canım aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. Boji	8
2.1.1. Aks Sayısına Göre Bojiler	8
2.1.2. Beşikli ve Beşiksiz Bojiler.....	10
2.1.3. Jakobs Bojiler	11
2.2. EMU Bojisi.....	12
2.2.1. Boji planı	15
2.2.2 Boji konfigürasyonları	16
2.2.3. Boji şasisi.....	22
2.2.4. Tekerlek seti tertibatı	23
2.2.5. Aks kutusu / Aks yatağı.....	24
2.2.6. Tahrik ünitesi	24
2.2.7. Birincil süspansiyon.....	26
2.2.8. İkincil süspansiyon ve düzleştirme sistemi.....	27
2.2.9. Yalpa önleme çubuğu tertibatı	28
2.2.10. Merkezi pivot tertibatı	29
2.2.11. Bağlantı donanımı.....	30
2.2.12. Boru tesisatı	31
2.2.13. Sensörler ve kablolar	31
2.2.14. Tekerlek boden yağlama sistemi	31
2.2.15. Kum püskürtücü.....	32

2.2.16. Kurtarma sistemi.....	33
3. BOJİ ŞAŞİSİNİN STATİK ANALİZ YÖNTEMİ	34
3.1. Statik Analiz Tanımlamaları	34
3.1.1. Statik analiz kavramı	34
3.1.2. Sonlu elemanlar analizi kavramı	34
3.1.3. ANSYS Workbench 14.5 ile bilgisayar destekli analiz kavramı.....	35
3.2. EMU Bojisine Ait Şasinin Statik Analizinin Gerçekleştirilmesi	35
3.2.1. Malzeme seçimi	35
3.2.2. SE (Sonlu Elemanlar) modeli	36
3.2.3. Yükleme şartları ve EN 13749 (boji şasisi standartları).....	36
4. BOJİ ŞAŞİSİNİN STATİK DAYANIMININ ANSYS WORKBENCH 14.5 KULLANILARAK İNCELENMESİ.....	44
4.1. Analiz Şartlarının Ansys Workbench 14.5 Programına Aktarılması	44
4.2. Ansys Workbench 14.5 Statik Analiz Sonuçları	52
4.2.1. İstisnai yükler 1 (İ1) : maksimum dikey yük + maksimum yanal yük + burulma	52
4.2.2. İstisnai yükler 2 (İ2) : maksimum dikey yük + maksimum boyuna yük + burulma.....	54
4.2.3. İstisnai yükler 3 (İ3) : maksimum dikey yük + ivmelenme etkisi	56
4.2.4. İstisnai yükler 4 (İ4) : boş vagon kütlesi + düşük hız derayman etkisi .	57
4.3. Sonuçların İncelenmesi	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bojinin temel özellikleri	14
Çizelge 2.2. Dört tip boji arasındaki farklar.....	15
Çizelge 2.3. Boji konfigrasyonu.....	17
Çizelge 2.4. Tekerlek özellikleri	24
Çizelge 3.1. Boji üzerine etki eden kuvvetler	35
Çizelge 3.2. Boji üzerine etki eden istisnai kuvvetler	38
Çizelge 3.3. Yükleme Şartları	39
Çizelge 4.1. Boji şasisi üzerinde gerçekleştirilen yüklemeler	59
Çizelge 4.2. Boji şasisi üzerinde gerçekleştirilen istisnai yüklemeler	59
Çizelge 4.3. Bojinin kritik komponentlerinde meydana gelen maks. gerilmeler.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. 4 farklı yükleme durumu için oluşan maksimum gerilme değerleri.....	60
Şekil 4.2. Destek barında meydana gelen maksimum gerilmeler.....	61
Şekil 4.3. Destek plakasında meydana gelen maksimum gerilmeler.....	62
Şekil 4.4. Bağlantı sportunda meydana gelen maksimum gerilmeler.....	63
Şekil 4.5. Merkezi dikey plakada meydana gelen maksimum gerilmeler.....	63

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tek akslı yük vagonu bojisi	9
Resim 2.2. İki akslı konvensiyonel yolcu vagonu bojisi	9
Resim 2.3. Üç akslı lokomotif bojisi	9
Resim 2.4. Beşik sistemli ve beşik systemsiz boji.....	11
Resim 2.5. Jakobs bojiler	11
Resim 2.6. Milli tren tasarımı	12
Resim 2.7. Mc (Motorlu araç) ön bojisinin konfigürasyonu	18
Resim 2.8. Mc (Motorlu araç) arka bojisinin konfigürasyonu	19
Resim 2.9. T (Motorsuz araç) ön bojisinin konfigürasyonu	20
Resim 2.10. T (Motorsuz araç) arka bojisinin konfigürasyonu	21
Resim 2.11. Mc (Motorlu araç) boji şasisi ve T (Motorsuz araç) boji şasisi.....	22
Resim 2.12. Tekerlek seti	23
Resim 2.13. Aks kutusu ve yatağı	24
Resim 2.14. Tahrik ünitesi	25
Resim 2.15. Cer motorunun düşmesini önlemek için güvenlik sağlanması	26
Resim 2.16. Bir çift silindirik bağlı kauçuk yay ile dikey damperli halka yay kombinasyonu.....	26
Resim 2.17. İki tane pnömatik yay, iki tane düzleştirme valf tertibatı ve iki tane yalpa damperi	27
Resim 2.18. Denge çubuğu sistemi	28
Resim 2.19. Bir adet adet dökme merkez pivot gövdesi, tekli cer bağlantısı, yanal damper ve iki adet yanal tamponu.....	29
Resim 2.20. Fren kumpas elemanı ve fren balataları.....	30
Resim 2.21. Tekerlek boden yağlama sistemi.....	32

Resim 2.22. Kum ejektörü	32
Resim 2.23. Cankurtaran sistemi	33
Resim 3.1. SEM (sonlu elemanlar metodu) boji matematik modeli	36
Resim 3.2. Boji şasisine gelen yüklerin şematik gösterimi.....	36
Resim 3.3. İstisnai Yükler 1 (İ1) için boji şasisi sınır şartları	40
Resim 3.4. İstisnai Yükler 2 (İ2) için boji şasisi sınır şartları	41
Resim 3.5. İstisnai Yükler 3 (İ3) için boji şasisi sınır şartları	42
Resim 3.6. İstisnai Yükler 4 (İ4) için boji şasisi sınır şartları	43
Resim 4.1. Engineering data (mühendislik verisi) sekmesi	44
Resim 4.2. Yeni malzeme sekmesi atanması	45
Resim 4.3. S355J2 kodlu malzeme özelliklerinin girilmesi.....	45
Resim 4.4. Uygun modülün seçilmesi	46
Resim 4.5. Cad datasının programa aktarılması	46
Resim 4.6. Yükleme ve sınır şartlarının kurgulandığı model sekmesine giriş.....	47
Resim 4.7. Cad datasının parçaları için malzeme atamasının yapılması	47
Resim 4.8. Automatic mesh işlemi	48
Resim 4.9. Mesh işleminin tamamlanması	48
Resim 4.10. İ1'e göre sabitlemelerin uygulanması	49
Resim 4.11. İ1'e göre yüklerin uygulanması	49
Resim 4.12. Von-Mises gerilimlerinin hesaplanması	50
Resim 4.13. Farklı mesh metoduyla mesh yapılması	51
Resim 4.14. Farklı mesh metodu olarak multizone metodunun atanması	51
Resim 4.15. Multizone metodu sonrası şasinin mesh görünümü.....	51
Resim 4.16. Ansys Workbench 14.5 'te farklı durumların birbirine bağlanması	52

Resim 4.17. İ1 – Von-Mises gerilmesi [Pa] – boji şasisi genel görünümü.....	53
Resim 4.18. İ1 – minimum Von-Mises gerilmesi [Pa] – birincil süspansiyon bağlantı noktası	53
Resim 4.19. İ1 - maksimum Von-Mises gerilmesi [Pa] - boji şasisi kol ucu.....	54
Resim 4.20. İ2 - Von-Mises gerilmesi[Pa]- üstten genel görünüm.....	54
Resim 4.21. İ2 – maksimum Von-Mises gerilmesi [Pa] – şasi destek barı	55
Resim 4.22. İ2 – minimum Von-Mises gerilmesi [Pa] – birincil süspansiyon bağlantı noktası	55
Resim 4.23. İ3 -Von-Mises gerilmesi [Pa]- boji şasisi genel görünüm	56
Resim 4.24. İ3 - maksimum Von-Mises gerilmesi [Pa]- destek barı	56
Resim 4.25. İ3 - Von-Mises gerilim [Pa] - birincil süspansiyon bağlantı noktası ...	57
Resim 4.26. İ4 -Von-Mises gerilmesi[Pa] - üstten genel görünüş	57
Resim 4.27. İ4 -Von-Mises gerilmesi[Pa] – ikincil süspansiyon bağlantı noktası....	58
Resim 4.28. İ4 - minimum Von-Mises gerilmesi[Pa] - birincil süspansiyon bağlantı noktası	58
Resim 4.29. a) Destek plakası b) Bağlantı sportu c) Destek barı	62
Resim 4.30. Merkezi Dikey Plaka	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

F_a	Amortisör ivmelenme kuvveti
F_{xmaks}	Bojideki toplam boyuna kuvvet
F_{xsmaks}	Bojideki toplam amortisör ivmelenme kuvveti
F_{ymaks}	Bojideki toplam yanıl kuvvet
F_{zmaks}	Bojideki toplam dikey kuvvet
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m^+	Boji kütlesi
MPa	Megapascal
M_v	Çalışır durumdaki aracın kütlesi
P_1	İstisnai tasarım yükü
Pa	Pascal
R_m	Kopma gerilmesi
S_z	Burulma
σ_{AK}	Akma gerilmesi

Kısaltmalar

BA652	Yük Vagonu Bojisi Modeli
BA661	Yük Vagonu Bojisi Modeli
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım

DEMU	Dizel Elektrikli Tren Seti
DHMU	Dizel Hidrolik Tren Seti
DMMU	Dizel-Mekanik Tren Seti
DMU	Dizel Tren Seti
EA4T	Çelik Malzeme Tipi
EMU	Elektrikli Tren Seti
EN 10025	Yapısal Çelik Standardı
EN 13103	Boji Motorsuz Aks Üretim Standardı
EN 13104	Boji Motorlu Aks Üretim Standardı
EN 13260	Boji Tekerlek Seti Uluslararası Standardı
EN 13261	Boji Aks Malzeme Standardı
EN 13262	Boji Tekerleği Uluslararası Standardı
EN 13749	Boji Şasisi Yapısı Uluslararası Standardı
ERRI	Avrupa Raylı Sistemler Araştırma Enstitüsü
GFRP	Cam fiber takviyeli polimer
SEM	Sonlu elemanlar metodu
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TÜVASAŞ	Türkiye Vagon Sanayi Anonim Şirketi
UIC	Uluslararası Demiryolu Birliği
Y 25	Yük Vagonu Bojisi Modeli
Y 32	Yolcu Vagonu Bojisi Modeli

1. GİRİŞ

Raylı sistem araçlarında, araçla yol arasındaki bağlantıyı sağlayan, yolcu ve araç ağırlığını üzerinde taşıyan donanım olarak bojiler, şüphesiz bu araçların statik ve dinamik olarak incelenmesi gereken en kritik kesitleridir. Bojiler daha iyi sürüş özellikleri sağlamak, rayda daha az aşınmaya yol açmak ve daha az raydan çıkma tehlikesi sunmak ile yükümlü bileşendir. Bojideki dingil sayısı arttıkça ray kıvrımlarından geçişteki konumlanışları daha da önem kazanmaya başlar. Bojilerin temel işlevleri;

1. Tren gövdesini desteklemek
2. Düz ve virajlı yollarda kararlı kalmak ve aracın kararlılığını korumak,
3. Yol düzensizliklerinden kaynaklı titreşimleri sönmüleyerek konforlu bir yolculuk sağlamak,
4. Tren yüksek hızlarda kurplardan geçerken oluşacak merkezkaç kuvvet etkilerini azaltmak,
5. Ray aşınması ve yol düzensizliği oluşumunu minimize etmek olarak sıralanabilir (Sabırlı, 2012).

Bojileri sınıflandırmak çok çeşitli tasarımların var olmasından ve raylı taşıt çeşitliliğinin fazlalığından dolayı son derece zordur. Ancak bojileri genel olarak, yaptıkları işlere göre; taşıyıcı ve çekici, aks sayısına göre; tek, çift veya üç akslı, süspansiyon yapısına göre; mafsallı veya mafsalsız, tasarımlarına göre ise klasik ve gelişmiş bojiler olarak sınıflandırmak mümkündür. Yolcu vagonu ve lokomotif bojileri iki aşamalı yay sistemine sahipken, yük treni bojileri genelde tek aşamalı yaya sahiptirler (Metin, 2007).

Çakır ve arkadaşları (1994), raylı taşımacılıkta sürüş konforu ve yolcu konforu hesaplama teknikleri ile ilgili bilgiler vermiştir. Termal, titreşim, gürültü gibi konforu birinci dereceden etkileyen faktörlerin sınır değerleri ve bunu sağlayacak tasarım aşamasında alınması gerekli tedbirleri detaylı olarak inceleyerek uygun çözümler önermişlerdir.

Karayel ve arkadaşları (1997), sistem dinamik davranışının modifikasyonu ile seyahat kalitesinin artırılmasını amaçlayarak, raylı araç süspansiyon sisteminin optimum tasarımı ve aktif süspansiyon sisteminin mevcut sisteme adaptasyonu üzerine yaptıkları çalışmalarında ilk önce raylı taşıtlarda oluşabilecek titreşimler ve bunlara sebep olan faktörleri incelemişlerdir. Daha sonra taşıt titreşimlerinin incelenmesinde titreşim konforu bakımından göz önünde bulundurulması gereken kriterleri belirtmişlerdir ve taşıt titreşimlerinin kontrolü için ve dinamik simülasyonun yapılabilmesi için süspansiyon sistemlerini incelemişlerdir. Titreşim konforunun iyileştirilmesinin gelişmiş süspansiyon sistemlerine sahip bojilerin kullanılması ile mümkün olacağı sonucuna varmışlardır. Bunun için de uygun süspansiyon sistemi kullanılmasının gerekli olduğunu ve dinamik kuvvetlerin taşıta geçmesinin önlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Oyan (1998), Taipei hızlı tren sistemleri ile ilgili yaptığı çalışmada MSC/NASTRAN[®] genel amaçlı sonlu eleman metodu programını kullanarak bir bojinin sonlu eleman analizini çalışmıştır. Aşırı yükleme tasarım faktörü katsayısını göz önüne alarak yapılan hesaplamalar sonucunda boji iskeletinin statik analiz ve yorulma analizi için emniyet şartlarını sağladığını belirtmiştir.

Claus ve arkadaşları (1998), demiryolu vagonu bojisinin karakteristik simülasyonlarını çalışmışlardır. Sonlu eleman programı ANSYS[®] ile vagon bojisinin statik analizini ve modal analizini çalışmışlardır. Boji iskeletinin elastik deformasyonlarını ve güç spektral yoğunluklarını hesaplamışlardır. Boji iskeletindeki quasi-statik gerilim dağılımlarını hesaplamışlardır ve çıkan analiz sonuçlarından gerilimin yüksek olduğu dağılım bölgelerini incelemişlerdir.

Ferguson (2000), Tombereau tipli bir vagona monte edilmiş Y25 tipi bojinin düşük frekans aralığındaki dinamik davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Modelin sonlu eleman analizinin sonuçları, deneysel ölçüm sonuçlarının birim kuvvet ve moment tahriği için uyumlu olduğunu göstermiştir.

Çak (2002), vagon bojisi kullanarak yolcu vagonlarının onarım alanına taşıyan transport sistemlerini incelemiş ve yeni bir transport sistemi hesaplaması yapmıştır. Tasarım ve hesaplamaları TCDD'de kullanılan en uzun ve en ağır vagona göre

yapmıştır. Transport sisteminin tasarlanması için taşıma güçleri için verilen teknik özelliklere göre transport sistemine koyulacak bojinin Y 32 bojisi olması uygun görülmüştür. Yaptığı çalışmanın sonucunda transport sistemine adaptasyonu için geliştirilen Y 32 bojisini kullanarak yolcu vagonlarının transport sistemi ile onarım alanına taşınmasının maliyet açısından ve zaman tasarrufu açısından uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Kırışik (2002), demiryolu vagonunun titreşim modelini çıkarmak ve analizini yapabilmek için sistemin diferansiyel denklem takımları şeklindeki hareket denklemlerini çıkarmıştır ve Matlab bilgisayar programında belirli bir 't' anı için çözmüştür. Yaptığı çalışmada ray, elastik zemin ve vagonu üç aşamada ele almıştır. İlk aşamada, ray ve elastik zemin birlikte düşünülüp, literatürden elde edilen sayısal değerler kullanılarak çözülmüştür. İkinci aşamada, vagon plaka olarak modellenmiştir ve analitik çözüm yoluna gidilmiştir. Üçüncü aşamada, vagon ile ray arasındaki tekerlek sistemi, yay ve sönümleyici olarak düşünülüp vagon ve ray üzerine etkisi yardımıyla her iki model beraberce ele alınıp çözülmüştür. Elde edilen sonuçları kaynaklarda verilen sonuçlarla karşılaştırdığında değerlerin gerçek fiziksel değerlere daha yakın olduğunu ortaya koymuştur.

Jong (2002), Almanya demiryolları için yaptığı çalışmada lokomotif bojisini ve Y 32 yolcu vagonu bojisini ADAMS® simülasyon programını kullanarak incelemiştir. Yaptığı analizlerde ilk olarak modelin parçalarını ayrı ayrı olarak ele almış ve deneysel olarak ölçülen doğal frekans değerleriyle simülasyonda hesaplanan değerleri karşılaştırmıştır. İkinci olarak ise modelin tümünü ele almış ve ölçülen değerler ile hesaplanan değerleri karşılaştırmıştır. Yaptığı simülasyon çalışmasının sonucunda hesaplanan doğal frekans değerleriyle deneysel verilerin birbirine çok yakın değerlerde olduğunu belirtmiştir.

Fraczeks (2002), Y 25 tipi yük bojisi kullanan esnek tankerler ve rijit araç gövdesinden oluşan çok yapılı bir raylı taşıtı ADAMS yazılımını kullanarak modellemiştir ve dinamik analizini çalışmıştır. Simülasyon sırasında aracı tam yüklü ve yüksüz olarak göz önüne alarak farklı yol parametreleri ve sürtünme tiplerini kullanmıştır. Dinamik simülasyonlardan boji üstündeki yapıların enine ve yanal tepki kuvvetlerini ve gerilme dağılımlarını incelemiştir.

Roman ve arkadaşları (2005), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak demiryolu bojilerinin ve vagonlarının yapısal geçerliliğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sanal zorlanma ölçüsü isimli yeni bir sonlu eleman aracı geliştirmişlerdir ve bu geliştirilen araç gerçek bir zorlanma ölçeğine benzemesini sağlayan koşulların ortaya çıkarılması için tasarlanmıştır. Bu geliştirmenin sonucunda simülasyondan elde edilen gerilme ve zorlanma sonuçlarının deneysel sonuçlar gibi davranabileceği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Kim (2006), yatık Kore trenleri için yatık boji iskeletinin analizini yapmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle statik analiz ve dinamik analiz çalışması yapmıştır. Bu analizlerden boji iskeletindeki gerilme dağılım alanlarını incelemiştir.

Park ve arkadaşları (2006), UIC (uluslararası demiryolu birliği) standardındaki yükleme durumunu kullanarak gerilme dağılımını elde etmek için ve yorulma dayanımını hesaplamak için sonlu eleman analizini kullanmışlardır.

Şenalp ve arkadaşları (2006), ProEngineer[®] aracılığıyla geometrik tasarımını yaptıkları konteyner taşıyıcı treylerin statik ve dinamik yükleme analizlerini yapmıştır. Bu analizler şasinin statik yüklemesini ve konteynerin treyler üzerine oturtulurken 30 mm/sn hızla şasi üzerine çarpması sonucu oluşan gerilmeleri tespit etmek amacı ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için Ansys, çarpma analizleri için ise Ls-Dyna/Explicit[®] programları kullanılmıştır. Ayrıca ANSYS Workbench[®] ile de belli tip yüklemeler için yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Molatefi ve arkadaşları (2007), BA652 ve BA661 (yük vagonu boji modelleri) bojilerini kullanan bir yük vagonunun dinamik etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada tekerlekler ve ray arasında dönme momenti ile lineer olmayan sürtünme kuvvetlerini kullanmışlardır ve sürtünme kuvvetlerini modellemişlerdir. BA652 ve BA661 bojileri için birincil süspansiyon özellikleri testlerle belirlenmiştir. Lineer olmayan hareket denklemleri ve kinematik sınırlamaları zaman alanı ve limit çevrimleri içinde çözülmüştür. Bu iki tip parametrelerin simülasyonu sonucu birincil süspansiyon sisteminin iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Hesaplamalar sonucunda BA652 bojisi için lineer ve lineer olmayan kritik hızlar ve yükleme düğümleri vardır ve BA661 bojisi için 23 durum kritiktir, sistem çok düşük hızlarda

titreşim yapabilmektedir. Y 25 yük bojisi için aynı analiz yapıldığında ise birincil süspansiyona ek olarak Y25 bojisinin yan gövdelerine hareket dengesine yardımcı olması için sürtünme yastıklı yaylar yüklenmiştir. Birincil süspansiyon sistemleri için BA652 bojisinin yanal ve boylamasına rijitliği Y 25 bojisinden daha düşük değerlerde çıkmıştır.

Atalay (2007), Toshiba–E43000 lokomotifinin titreşim analizinin yapılması amacı ile dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. 54 serbestlik dereceli lokomotif modelinin oluşturulmasında her serbestlik derecesi için diferansiyel denklemler ayrı ayrı çıkartılmıştır. Ayrıca, seyir hızına etki eden faktörler detaylı olarak anlatılmış ve bu amaçla boylamsal dinamik modeli de oluşturulmuştur. Ray–tekerlek temas problemine; sünme faktörlerine detaylı olarak değinilmiş ve rayların elastikiyetleri konusunda çeşitli sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Dinamik analiz modeli ve titreşim analizleri Matlab–Simulink yazılımında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda kabinin yanal ve düşey titreşimlerini kontrol eden aktif titreşim kontrolcüsü tasarlanmıştır.

Özsoy (2008), TÜVASAŞ'ta üretilen TVS 2000 yolcu vagonları ile ilgili yaptığı çalışmada vagon gövdesi, boji gibi sistem alt parçalarının doğal frekans hesaplamasını yaparak titreşim şekillerini ve frekanslarını hesaplamıştır ve deneysel olarak araç seyir halindeyken ivme ölçümlerini yapmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucunda deneysel verileri sayısal verilerle karşılaştırarak yolcu vagonlarında oluşan titreşim konforu etkisini incelemiştir.

Bayraktar (2010), bir raylı taşıtın titreşim analizini gerçekleştirmek amacıyla 6-serbestlik dereceli raylı taşıt ve 16-serbestlik dereceli boji modelleri oluşturmuş ve diferansiyel denklemleri çıkarmıştır. MATLAB-Simulink® programının kullanıldığı frekansa bağlı simülasyonlarda aks miline ait titreşimler incelenmiştir.

Zehsaz ve arkadaşları (2011), yüksek hızlarda boji şasisine gelen gerilmeleri incelemiştir. Bu amaçla boji şasisi sonlu elemanlar metoduyla modellenmiştir. Değişik hızlarda ve farklı ray sertliklerinde boji şasisine gelen yükler için yapılan çalışmada boji hızının artmasının boji şasisinde meydana gelen gerilmeleri oldukça fark edilir boyutta arttırdığı ortaya konmuştur.

Esen ve arkadaşları (2011), tarafından yapılan çalışmada ilk olarak Türk Demiryolu vagonlarında kullanılan Y32 bojisinin Bilgisayar Destekli Modeli (BDT) oluşturularak statik yükler altındaki karakteristik davranışları incelenmiş ve paket program üzerinde bu yükler uygulanarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra boji gövdesinin dinamik analizi salınım modlarının hesaplanmasıyla tespit edilmiş ve gövdenin dayanabileceği maksimum gerilme aralıkları tayin edilmiştir.

Kim ve arkadaşları (2011), GFRP (cam fiber takviyeli kompozit) kompozitten yapılan bir boji şasisini geleneksel çelik boji şasisi ile değiştirmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda, kompozit boji şasisinin yapısal güvenlik şartlarına uygunluğu sonlu elemanlar metodu ve deneysel sonuçlarla incelenmiştir.

Zhou ve arkadaşları (2014), yüksek hızlı elektrikli tren setlerinde kullanılan motorlu boji şasislerinin statik analizini teorik olarak hesaplamışlardır.

Sebesan ve arkadaşları (2014), LDE 060-DA (lokomotif modeli) lokomotiflerinde kullanılan boji şasislerinin statik davranışlarını incelemişlerdir. Analiz işlemi Solidworks® ve Ansys® programlarında ayrı ayrı gerçekleştirilerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Zhao ve arkadaşları (2015), yüksek hızlı elektrikli tren setlerinde kullanılan bojişere ait şasislerin dayanım analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz işlemi için Ansys Workbench kullanılmıştır. Statik analiz sonuçları elde edilmiş, bu sonuçlardan hareketle Goodman-Smith diyagramı kullanılarak şasisin yorulma değerleri sunulmuştur.

Wu ve arkadaşları (2016), yüksek hızlı yolcu trenlerinde kullanılan motorsuz bojişerde, şasisin yapısal dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada, sonlu elemanlar analiz programı olarak Ansys Workbench kullanılmışlardır. Boji şasisi malzemesi olarak Q 345 (karbon çelik malzeme) seçilmiş ve 14 farklı çevrim için şasisin yapısal dayanımının standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, analiz hususu olarak statik analiz, ele alınan ürün olarak boji şasisi, kullanılan sonlu elemanlar analiz programı olarak

da Ansys ön plana çıkmaktadır. Ancak çalışmaların daha verimli olması açısından Ansys Workbench programının güncel versiyonu kullanılmalı, standartlardaki yüklerin uygulanışı detaylı olarak anlatılmalıdır.

Bu bağlamda, yapılan çalışmada güncel bir konu olan Milli Tren üretimi kapsamında henüz tasarım aşamasındaki bir boji şasisi ele alınılmış, Ansys Workbench programının güncel bir versiyonu olan 14.5 sürümü ile analiz gerçekleştirilmiş, analiz adımlarının uygulanışı detaylı olarak anlatılmış ve tasarımın iyileştirme gerektiren komponentleri belirlenmiştir. Böylece hem bilimsel literatüre katkıda bulunulmuş, hem de Milli Tren Projesine kapsamında çalışma yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Boji

Raylı taşıtlar, vagon sandığı ve bojilerin uygun bir şekilde birleştirilmesiyle oluşur. Boji; yol tarafından üretilen titreşimlerin azaltılarak vagon gövdesine geçmesini sağlayan, hareket esnasında vagonun virajları daha kolay almasını ve yönlenmesini sağlayan mekanik bir sistemdir. Bojiler; üzerinde barındırdığı seyir güvenliği ve yolcu konforu sağlayan ekipmanlarıyla, taşıt dinamiği bakımından en önemli elemandır (Özsoy, 2008).

Genel olarak konforlu bir bojiden beklenen özellikler şöyledir; uzun olan demiryolu taşıtlarının kıvrımlı raylarda daha uyumlu bir geçiş yapmasını sağlamak, tekerlek takımı ile boji gövdesi arasındaki rijit bağı yok ederek yol düzensizliklerinden dolayı oluşan titreşim etkilerini azaltmak, ikinci bir yay basamağı elde ederek sürüşteki konforu artırarak daha iyi sürüş özellikleri sağlamak ve raydan çıkma tehlikesini minimuma indirmektir.

Birçok farklı tasarım olmasından dolayı bojileri sınıflandırmak zordur ancak temel tasarımlar göz önüne alındığında aks sayısına göre, beşikli-beşiksiz olmasına göre ve Jacobs olarak sınıflandırılır.

2.1.1. Aks Sayısına Göre Bojiler

Aks sayısına göre bojileri tek akslı, iki akslı ve üç akslı bojiler olarak sınıflandırılır. Tek akslı bojiler genel olarak yüksek konfor aranmayan yük vagonlarında kullanılırlar. İki akslı bojiler en yaygın olan gruptur. DMU, EMU, yolcu taşıyan çekilen araçlar ve hızlı tren bojileri iki akslı bojilere örnektir.

Üç akslı bojiler genel olarak lokomotiflerde çalışan bojilerdir. Lokomotiflerin sahip oldukları ekipmanlar dolayısıyla ağırlıkları fazladır. Sandık ağırlıklarını akslar üzerinde güvenli bir şekilde taşımak amacıyla aks sayısı artırılmıştır. Böylece aks başına düşen aks yükü azaltılmıştır. Resim 2.1, Resim 2.2 ve Resim 2.3'te örnekler görülmektedir (Bilgin, 2015).



Resim 2.1. Tek akslı yük vagonu bojsi



Resim 2.2. İki akslı konvansiyonel yolcu vagonu bojsi (Bilgin, 2015)



Resim 2.3. Üç akslı lokomotif bojsi

2.1.2. Beşikli ve Beşiksiz Bojiler

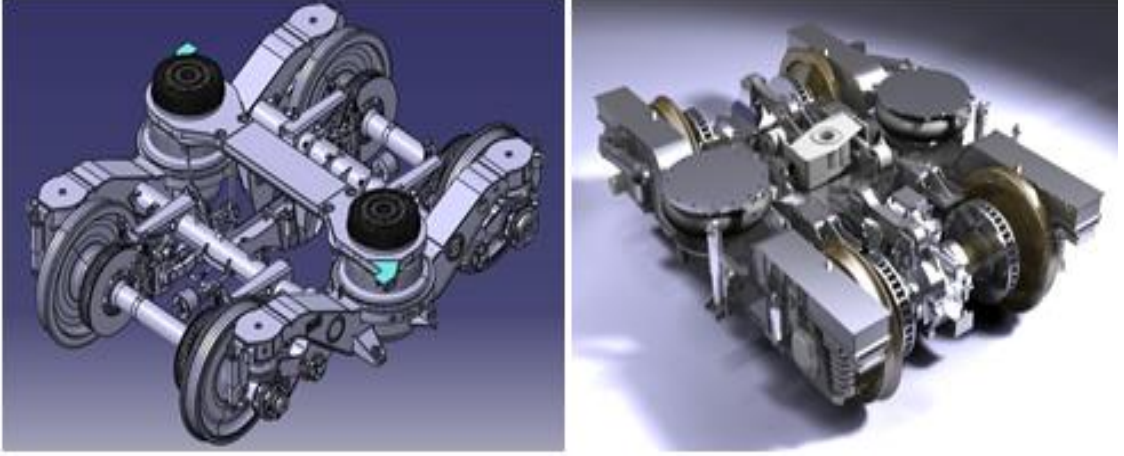
Boji tasarımında temel olarak belirlenen komponentlerden biride boji - vagon sandığı bağlantı elemanlarıdır. Vagon sandığı ile boji bağlantısı; ikincil süspansiyonun vagon sandığına direkt bağlanması veya ikincil süspansiyon ile vagon sandığı arasına beşik adı verilen bir ara eleman konularak yapılır.

Genel olarak bojilerde ikinci süspansiyon elemanı olarak lineer yaylar ve kauçuk elemanlar tercih edilmektedir (Bilgin, 2015). Helisel yaylar ve kauçuk gruplarının iki noktadan sabitlenerek merkezlenmesi ve ikincil süspansiyon sisteminin torsiyon çubuğu bağlantısıyla dengeli olarak hareket etmesi amacıyla, ikincil süspansiyon sistemi beşik adı verilen elemana bağlanır. Yaylanma hareketi beşik üzerinden sağlanırken sönümlenme elemanları olan ikincil süspansiyon amortisör grupları da beşik üzerine bağlanır.

Modern bojilerde ikincil süspansiyon elemanı olarak hava yayları tercih edilmektedir. Hava yayı kullanımıyla sağ-sol ikincil süspansiyon elemanları arasındaki yükseklik farkı, vagon sandığı üzerine bağlanan dengeleme valfleri ile gerçekleşir. Böylece her iki yay grubu tekil olarak çalışabilmektedir.

Beşiksiz sistemlerin en önemli avantajlarından biri de sandık boji bağlantılarının, merkez pivot olarak adlandırılan dönme merkezinden, tek noktada hareket yapıldığı için dar kurplarda düşük dönme direncine sahip olmalarıdır. Böylece karp hareketlerine bağlı tekerlek aşınma miktarı azalmış olacaktır (Bayraktar, 2010).

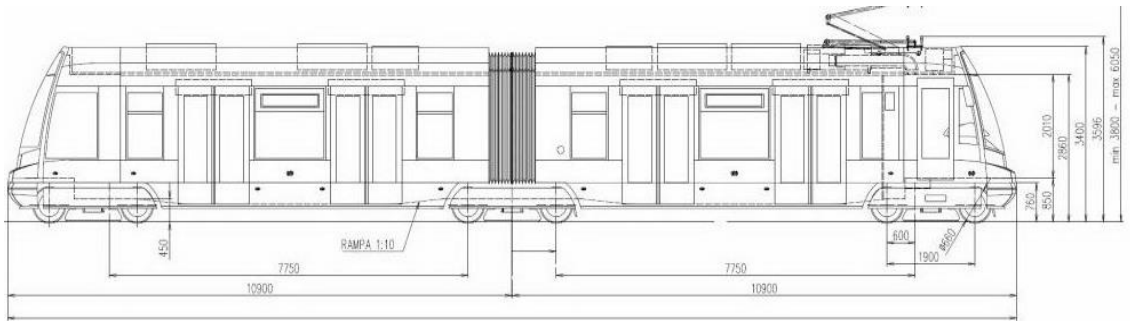
Resim 2.4'te beşikli ve beşiksiz sistem boji örnekleri gösterilmiştir.



Resim 2.4. Beşik sistemli ve beşik sistemli boji

2.1.3. Jakobs Bojiler

Adını Alman demiryolu mühendisi Wilhelm Jakobs'dan alan Jakobs bojilerin özelliği, klasik bojilerden farklı olarak bir boji üzerinde 2 vagon sandığı taşınmasıdır. Birbirini takip eden vagonlardan birinci vagonun son noktası ile ikinci vagonun baş noktası aynı boji üzerine oturtulur, genellikle set halinde çalıştırılan araçlarda Jakobs boji tercih edilmektedir. Klasik bojilerden bir farkı da her vagon sandığı için ayrı süspansiyon grubu olmak üzere, 4 noktada ikinci süspansiyon elemanı bulundurmasıdır. Resim 2.5'te Jakobs boji örneği sunulmuştur (Bilgin, 2015).



Resim 2.5. Jakobs bojiler

2.2. EMU Bojisi

Çoklu Set olarak adlandırılan tren setleri , tek bir sürücü kabini tarafından kontrol edilebilen birden fazla motorlu aracın, motorsuz araçlarla birleştirilerek set haline getirildiği sistemlerdir.

Çoklu setler kullandıkları güç kaynağına göre Dizel Çoklu Set (DMU) ve Elektrikli Çoklu Set (EMU) olarak isimlendirilirler. Ayrıca Dizel Setler transmisyon tiplerine göre Dizel-Elektrikli Çoklu Set (DEMU), Dizel-Mekanik Çoklu Set (DMMU) , Dizel Hidrolik Çoklu Set (DHMU) olarak da sınıflandırılabilirler.

Geleneksel tek bir çekici ve birden fazla çekici araçtan oluşan lokomotifli tren setlerinin yerini DMU,EMU ve DEMU ismi verilen çoklu çeki araçlarının set içerisinde yer aldığı tren setleri almaktadır. Bu bağlamda, ülkemizin raylı sistemleri geliştirme politikaları kapsamında içerisinde TÜVASAŞ tarafından Milli Tren Projesi olarak EMU (Electrical Multiple Unit) elektrikli tren setleri üretilecektir (TCDD, 2015).

Tasarımının son hali Resim 2.6’da gösterilen Milli EMU projesinde , ihale aşamasına geçilmiş olup, Milli Tren’in 2019 yılında raylarda olması planlanmaktadır.



Resim 2.6. Milli tren tasarımı (TCDD, 2015)

EMU boji tasarımı dünyanın birçok şehrinde kullanılan uygunluğu kanıtlanmış bojilere dayanmaktadır. Boji, klasik 'H' şasili tasarıma sahiptir.

Bojiler, maksimum çalışma hızı 160 km/saat olacak şekilde tasarlanmışlardır ve her türlü çalışma koşulunda kaliteli bir sürüş sağlarlar. Motorlu boji ile römork(motorsuz) bojisi, motorlu bojideki aks dişlisi ve cer motoru montaj braketleri dışında benzer şasi konfigürasyonuna sahiptirler (Hyundai Rotem, 2015).

Bojiler, aracın güvenli, rahat ve etkili biçimde işletimi için gerekli parçalar ile donatılmakta ve boji parçalarına kolaylıkla erişim sağlanacak şekilde de tasarlanmaktadır.

Bojilerin ana özellikleri Çizelge 2.1'de verildięi gibidir.



Çizelge 2.1. Bojilerin temel özellikleri (Hyundai Rotem, 2015)

Hat Açıklığı	1,435 mm
Maksimum aks yükü	16 Ton
Maksimum Hız	140 km/s
Boji eksenleri arasındaki mesafe	2,400 mm
Tekerlek Çapı (yeni/tamamen aşınmış)	860/780 mm
Cankurtaran cihazı ile birlikte Toplam Boji Uzunluğu	3,687 mm
Boji Toplam Genişliği	2,806 mm
Boji / Vagon Gövdesi Arabiriminin Yüksekliği	913 mm/950 mm
Birincil süspansiyon merkezden merkeze uzaklık	2,100 mm
Birincil süspansiyon merkez - merkez mesafesi	2,100 mm
Ray Açıklığı alt sınırı	55 mm
Yaklaşık MC-ön Boji ağırlığı	8307 kg
Yaklaşık MC-arka Boji ağırlığı	8303 kg
Yaklaşık T ön boji ağırlığı	5827 kg
Yaklaşık T arka boji ağırlığı	5849kg

2.2.1. Boji planı

Mc-ön (Motorlu araç ön boji), Mc-arka (motorlu araç arka boji), T-ön (motorsuz araç ön boji) ve T-arka (motorsuz araç arka boji) olmak üzere 4 tip boji vardır. Temel fark olarak motorlu araç ön ve arka bojilerinde, motorsuz araç bojilerinde bulunmayan motor ve tahrik dişlisi bulunur. Öte yandan hamal aksı olarak isimlendirilen komponent motorsuz araç bojilerinde yer alırken, motorlu araç bojilerinde bu komponente yer verilmez.

Resim 3.2, Resim 3.3, Resim 3.4 ve Resim 3.5'te gösterildiği gibi motorlu araç bojileri ile motorsuz araç bojileri arasında farklılıklar olduğu gibi, bu bojilerin ön ve arka olarak konumlandırılanları arasında da bazı farklılıklar bulunmaktadır.

Genel olarak bojiler arasındaki tüm farklar Çizelge 2.2'deki gibidir.

Çizelge 2.2. Dört tip boji arasındaki farklar (Hyundai Rotem, 2015)

Kalemler	MC vagon		T vagonu	
	Ön boji	Arka boji	Ön boji	Arka boji
El freni bağlantı kaliperi	Bağlı değil	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı
Park freni tahliye kablosu	Bağlı değil	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı
Tekerlek flanş yağlayıcı	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil	Bağlı değil
Taş koruyucu	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil	Bağlı değil
Kum püskürtücü	Bağlı	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil
ATS jeneratörü	Bağlı değil	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil
Hız kayıt cihazı jeneratörü	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil	Bağlı değil
Motor ve tahrik dişlisi	Bağlı	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil
Motor Aksı	Bağlı	Bağlı	Bağlı değil	Bağlı değil
Hamal Aksı	Bağlı değil	Bağlı değil	Bağlı	Bağlı

2.2.2 Boji konfigürasyonları

Boji; boji şasisi, süspansiyon ve tekerlek sistemi olmak üzere 3 ana kısımdan oluşur. Boji şasisi boji gövde tertibatı, tahrik sistemi, merkez eksen sistemi, sürtünme freni sistemi, tekerlek flanş yağlama sistemi ve yalpa önleme çubuğu sistemi olmak üzere 6 ayrı alt sistemden müteşekkildir.

Süspansiyon sistemi birincil süspansiyon, ikincil süspansiyon ve seviyelendirme sisteminden oluşur. Tekerlek sistemi içerisinde ise tekerlekler ve aks bulunur. Ayrıca aks rulman kutusu ve sensörler de tekerlek sistemi üzerinde yer alır. Genel olarak boji konfigürasyonu Çizelge 2.3’de verilmiştir.

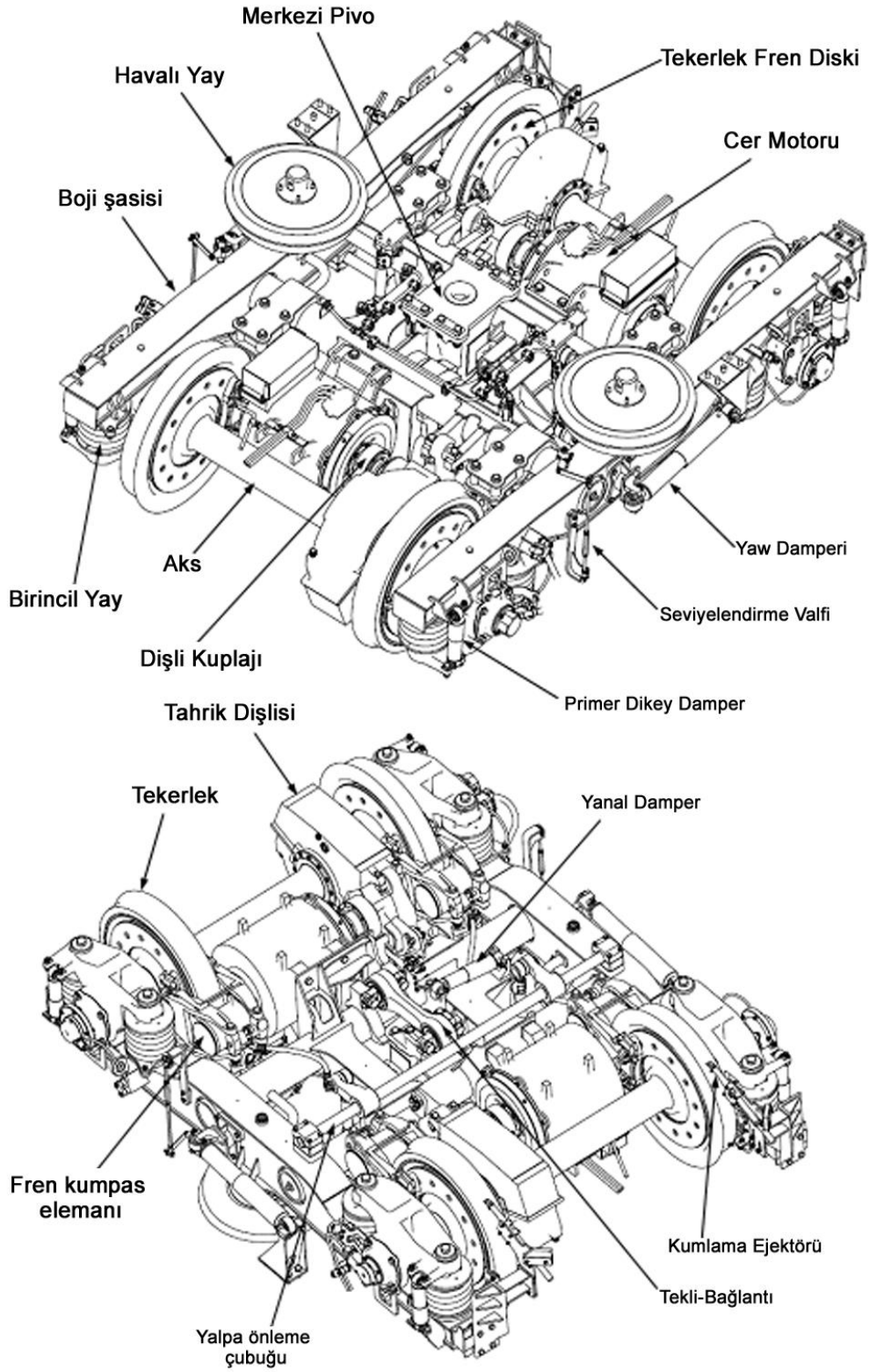
Motorlu araç bojileri (MC-ön, MC-arka) ve motorsuz araç bojileri (T-ön, T-arka) iki dingilden ve iki aşama süspansiyondan oluşmaktadır. Motorlu araç boji gövdesinin genel mimarisi (MC-ön ve MC-arka) aynıdır ve motorsuz araç bojisinin genel mimarisi (T-ön ve T-arka) aynıdır.

Resim 2.7’de MC-ön bojisi üzerinde (motorlu araç ön bojisi) tahrik dişlisi, kumlama ejektörü ve dişli kuplaj gösterilmektedir. Resim 2.8’de MC-arka bojisinde yer alan park etme freni ve kumlama ejektörü belirtilmiştir.

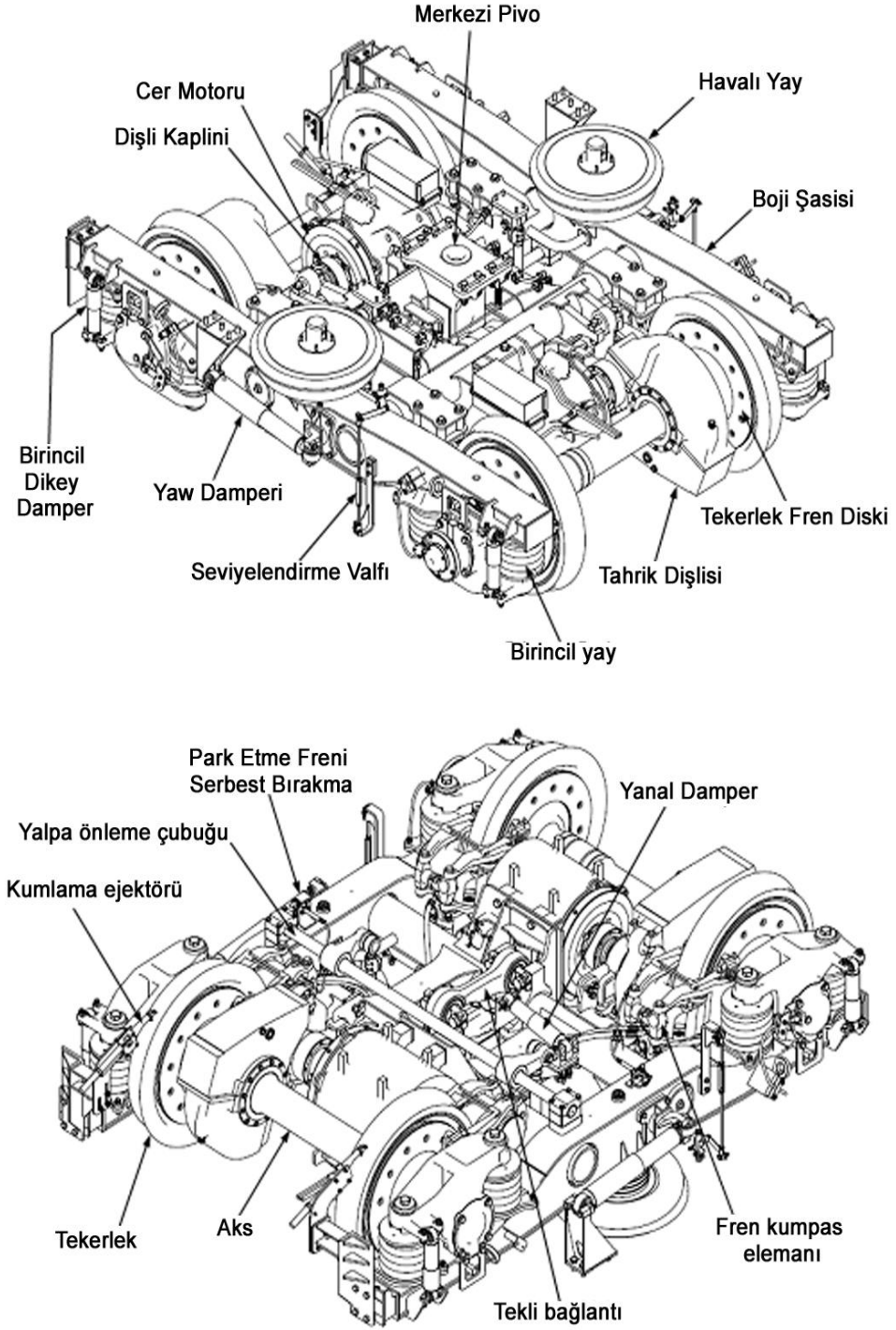
Resim 2.9 ve Resim 2.10’da motorsuz araç ön ve arka bojileri üzerinde yer alan tekerlek, aks, boji şasisi, yaw damperi, merkezi pivot, havalı yay, birincil dikey damper ve seviyelendirme valfi gibi ortak komponentler gösterilmiştir. Öte yandan motorsuz araç ön bojisinde yer almayıp motorsuz araç arka bojisinde yer alan park etme freni Resim 2.10’da yer almaktadır.

Çizelge 2.3. Boji konfigrasyonu (TCDD, 2015)

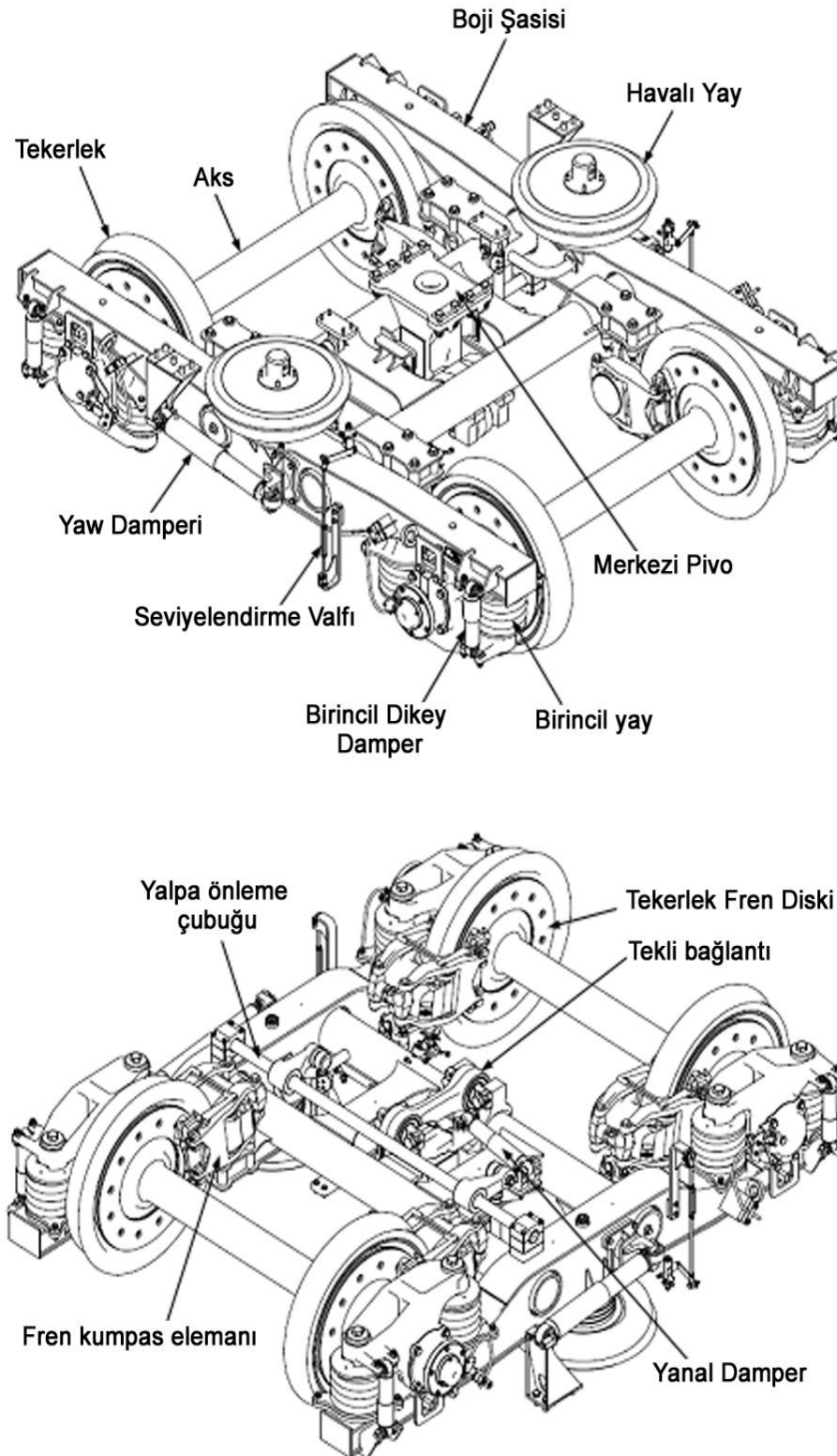
Boji Şasisi	Boji Gövde Tertibatı	Yan Şasi + Boru şeklinde vasistas
	Tahrik Sistemi	Tek kademeli dişli kutusu + esnek dişli kuplajı Cer Motoru
	Merkez Eksen Sistemi	Dökme merkez eksen gövdesi Kauçuk bilezikli cer zinciri
	Fren Bağlantı Sistemi	Fren silindiri ve fren balataları Tekerleğe takılı fren balataları
	Tekelek Flanş Yağlama Sistemi	Yağlayıcı sprej (büküm ve mesafe algılama özellikli)
	Yalpa Önleme Çubuğu Sistemi	Bir burulma çubuğu + iki destek çubuğu
Süspansiyon	Birincil Süspansiyon	Silindirik bağlı kauçuk yay ile halka yayın dikey damper ile birleşimi
	İkincil Süspansiyon	Havalı yay Dikey yönde açıklık azaltma Yanal damper ve yanal çarpma engeli Yalpa damper
	Seviyelendirme Sistemi	Dört (4) noktalı düzleştirme subap sistemi
Tekerlek Setleri	Dingil Tek gövdeli tekerlek Aks Rulman Kutusu Toprak, Hız Sensörü vb.	



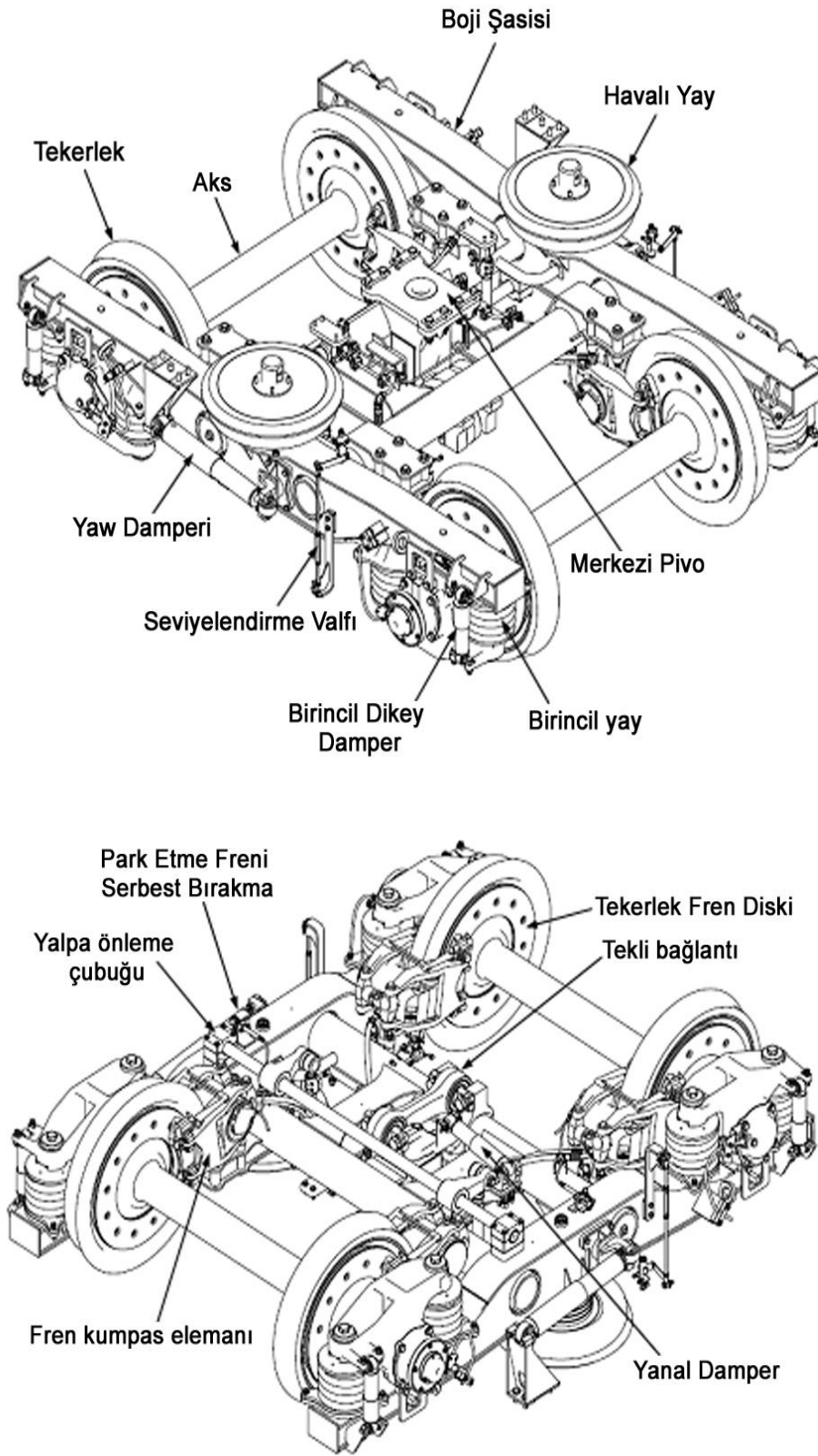
Resim 2.7. MC (Motorlu Araç) ön bojsinin konfigurasyonu (TCDD, 2015)



Resim 2.8. MC (Motorlu Araç) arka bojisinin konfigürasyonu (TCDD, 2015)



Resim 2.9. T (Motorsuz araç) ön bojisinin konfigürasyonu (TCDD, 2015)



Resim 2.10. T (Motorsuz araç) arka bojisinin konfigürasyonu (TCDD, 2015)

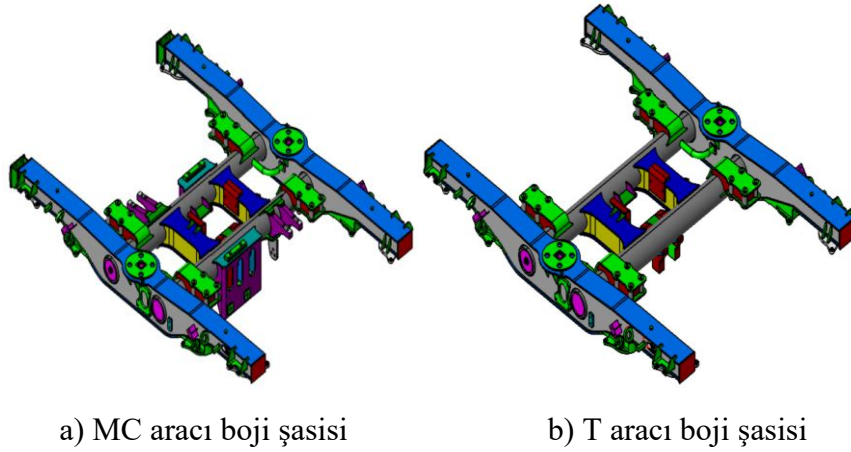
2.2.3. Boji şasisi

Boji şasisi 'H' şeklindedir; iki yan çerçeve ve iki boru şeklindeki travers ile birlikte çelik levhadan imal edilmektedir. Kaynak bölgesinin yapısı pürüzsüzdür; dolayısıyla kaynaklı birleşme yeri şeklinin keskin olmasından kaynaklanan yerel gerilmelerin önüne geçilebilir. İmalattan sonra boji şasisi, artık gerilmenin giderilmesi için ısıtılma işlemi tabii tutulur ve üzerine parça yerleştirilecek şekilde işlenir.

Genel şasi konfigürasyonu boji şasisi boyunca iyi yük aktarımına izin verilecek şekilde tasarlanır. Yan çerçevenin orta kısmı, havalı yay grupları için montaj desteği sağlar. Gövdenin orta kısmını oluşturan boru şeklindeki vasistas üzerinde, cer motoru, aks dişlisi ünitesi, balatalı fren sistemi için montaj destekleri ve merkez eksen donanımı için tekli cer bağlantısı bulunmaktadır.

Araç kaldırıldığı zaman, bojinin yan çerçevesinde bulunan dört adet durdurucu, tekerlek takımının güvenli bir şekilde kaldırılmasına imkân verir.

Tüm kaynaklama işlemi, ISO (uluslararası standardizasyon organizasyonu) kurallarına uygun yapılır ve daha sonra boji gövdesinin kritik kaynak noktalarında hasarsız deney gerçekleştirilir (Hyundai Rotem, 2015).

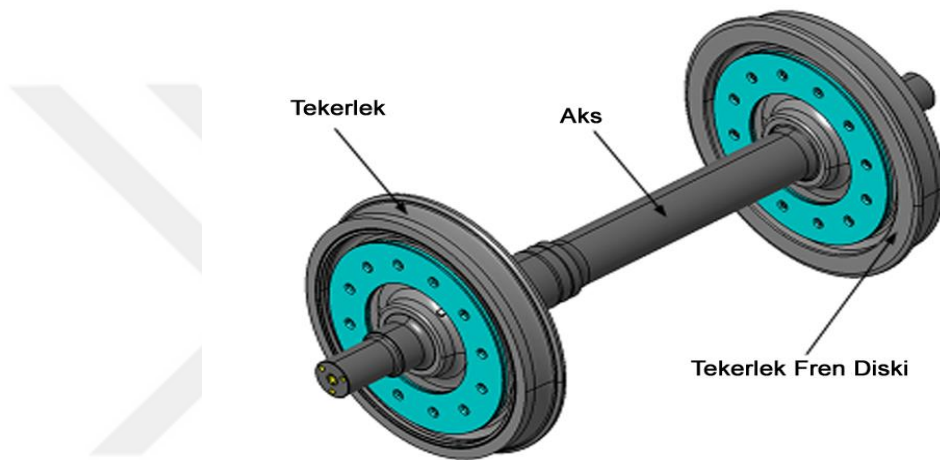


Resim 2.11. MC (Motorlu araç) boji şasisi ve T (Motorsuz araç) boji şasisi (TCDD, 2015)

2.2.4. Tekerlek seti tertibatı

Tekerlek takımı, monoblok tekerleklerden ve bir tane sabit aks milinden oluşmaktadır. Tekerlek takımları, maksimum 16 tonluk aks yükünü uygun biçimde taşıyacak şekilde tasarlanmaktadır. Motorlu boji tekerlek takımı üzerinde aks dişlisi için ilave bir montaj yuvası bulunmaktadır.

Tekerlek takımı EN 13260'e uygun olarak monte edilmektedir.



Resim 2.12. Tekerlek seti (TCDD, 2015)

2.2.4.1. Akslar

Akslar, EA4T çelikten (EN 13261 – 2. Kategori) üretilirler ve EN13103 ile EN13104'e uygun tasarlanırlar. Aks yatağı muylularının çapı 130 mm'dir. Muylunun merkezden-merkeze mesafesi 2100 mm'dir. Bu ölçüler raylı sistemler standartları içerisinde raylı aracın kullanılacağı yol, taşıyacağı yük kapasitesi ve seçilecek boji tasarımına göre değişkenlik gösterebilir.

2.2.4.2. Tekerlekler

Monoblok tekerlekler yeni durumdayken 860 mm, maksimum yıpranmış durumdayken 780 mm sırt çapına sahiptir (Hyundai Rotem,2015). Tüm tekerlekler tekerlek diski ile donatılmıştır. Tekerlekler, EN 13262 (2004)'e uygun şekilde UIC 510-2 kuralına uyan bir profilde, dövme çelikten yapılmıştır. Tüm tekerlekler statik ve dinamik olarak dengelenmiştir.

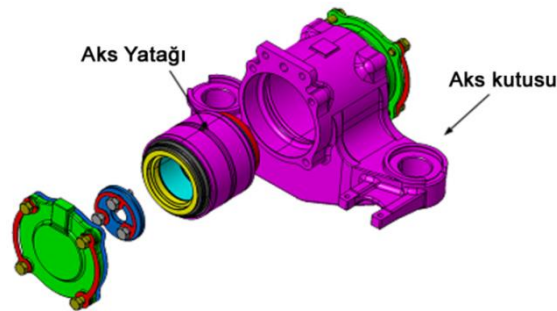
Çizelge 2.4. Tekerlek özellikleri (TCDD, 2015)

İmalat ve test için uygulanan standart	EN13262, UIC 510-2 ya da eşdeğeri
Tekerlek çapı	860/780 (yeni/ tamamen aşınmış)
Tekerleğin imalatı	EN13262
Tekerlek için tercih edilen malzeme ve ısıl işlem	ER9
Tekerlek basamak profili	UIC-S1002 profili

2.2.5. Aks kutusu / Aks yatağı

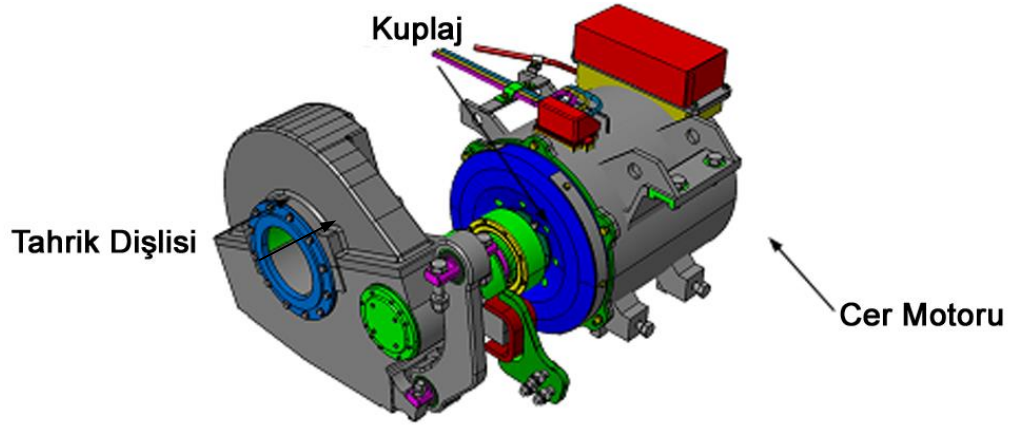
Aks yatağı kutuları, aks yatağı ile birincil süspansiyon yayları arasında yerleştirilmektedir. Topraklama sistemi muhafazaları, hız sensörü muhafazaları ve sinyalizasyon hız sensörü adaptör plakaları aks yatağı kutularının üzerine yerleştirilebilirler.

Aks yatakları, 130 mm standart iç çapında, NFL (Saha Dışı yağlama) tipi konik makaralı yatak şeklinde tasarlanmaktadır. Uygunluğu kanıtlanmış tipte sızdırmaz bir muhafaza ile donatılmalıdır. Bakım periyodu 600,000 km'dir ve maks. 3 yıl ile sınırlanmaktadır. İstenildiği zaman akstan çıkarılan aks yataklarının bakımı da yapılmaktadır. Dingil yataklarını belli bir ömrü vardır; ISO281'e göre 4,000,000 km'den fazladır (Hyundai Rotem, 2015).

**Resim 2.13.** Aks kutusu ve yatağı (TCDD, 2015)

2.2.6. Tahrik ünitesi

Motorlu araç bojisinde, Resim 2.14'de gösterildiği gibi bir adet cer motorundan, esnek bir kuplajdan ve bir dişli kutusundan oluşan bir tahrik ünitesi vardır.



Resim 2.14. Tahrik ünitesi (TCDD, 2015)

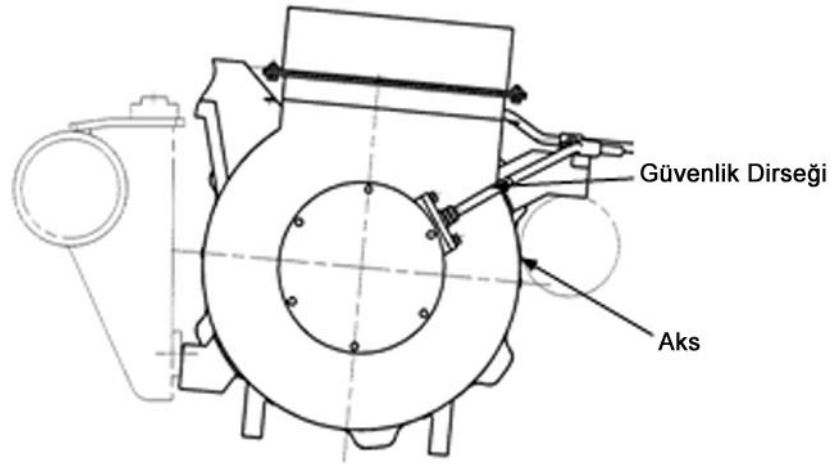
2.2.6.1. Hareket dişlisi ve kuplaj

Aks dişlisi ünitesi aks üzerine monte edilir ve her iki tarafında kauçuk burç bulunan reaksiyon çubuğu tarafından boru şeklindeki vasistas üzerinde esnek bir şekilde taşınır. Reaksiyon çubuğunun arıza yapması durumunda dişli kutusunun ray üzerine düşmesinin önlenmesi için bir emniyet dayanağı bulunmaktadır. Yağ seviyesini kolayca kontrol etmek için dişli kutusunda yağ gözlem penceresi mevcuttur.

2.2.6.2. Cer motoru

Cer motoru, boji şasisinin üzerine sağlam bir şekilde monte edilmektedir ve cer kuvveti ile elektrodinamik frenleme kuvvetini, esnek dişli kaplini vasıtasıyla, aks dişlisine aktarmaktadır. Esnek kaplin, birincil süspansiyon devrede iken, cer motorunun ve dişli kutusunun birbirlerinden bağımsız hareket edebilmesine imkân verir.

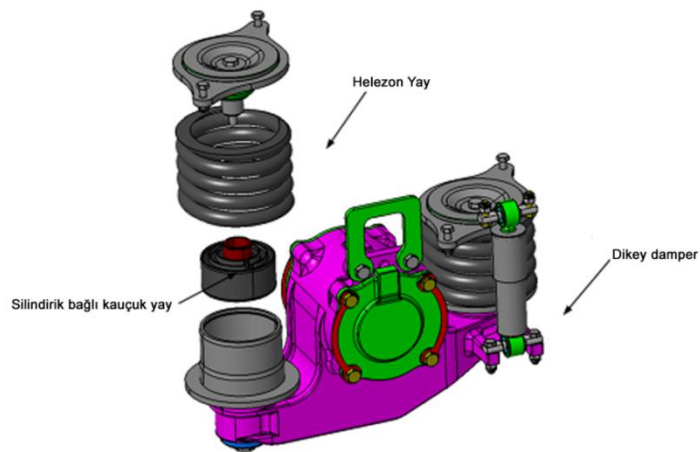
Cer motorunun raya düşmesini önlemek için cer motorunun üzerinde güvenlik burun dirsekleri mevcuttur. Resim 2.15’de gösterildiği gibi beklenmedik bir hata oluşursa, güvenlik dirseği ilk olarak aksa temas eder ve cer motorunun düşmesini önler.



Resim 2.15. Cer motorunun düşmesini önlemek için güvenlik sağlanması

2.2.7. Birincil süspansiyon

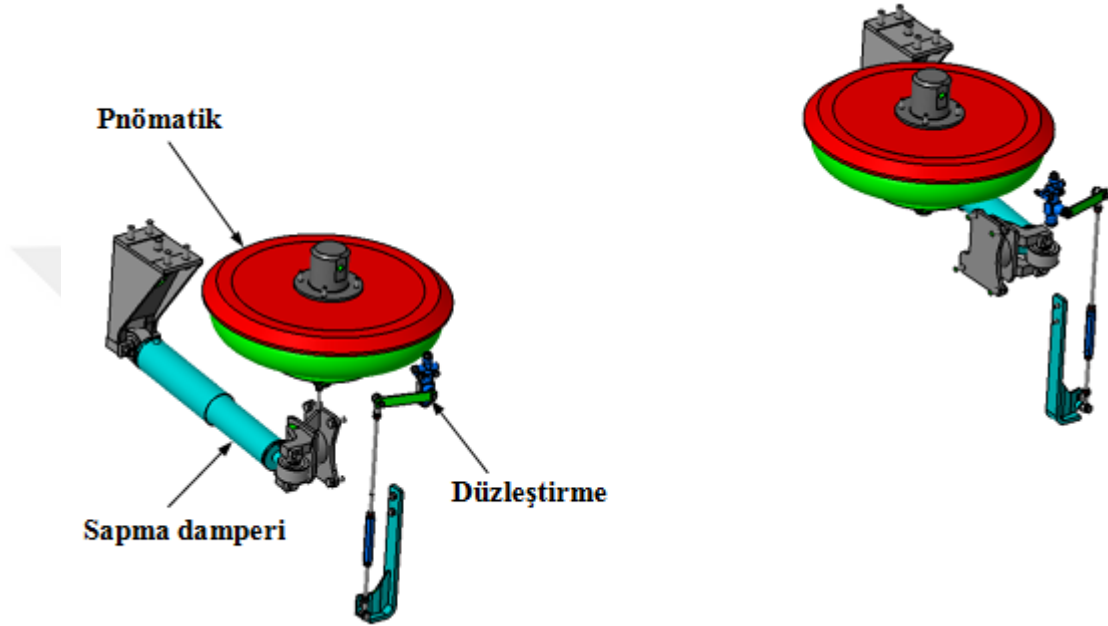
Birincil süspansiyon, Resim 2.16’da gösterildiği gibi bir çift silindirik yapışkanlı kauçuk yay ve dikey damperli helezon yay bileşiminden oluşmaktadır. Birleşik yayın avantajları; yay sertliğinin daha yumuşak olması ve aynı zamanda aşırı dikey sehimin önlenmesi, yay akmasının olmaması ve şaft kovanı ile boji şasisi arasında hiçbir sürtünme elemanının olmamasıdır. Dikey damper, raydan gelen gürültü ve titreşimin ilerleme miktarını sınırlandırır. Aşırı tekerlek takımı esnemesinin önlenmesi için birincil süspansiyon içinde kalkma dayanağı da bulunmaktadır (TCDD, 2015).



Resim 2.16. Bir çift silindirik bağlı kauçuk yay ile dikey damperli halka yay kombinasyonu (Hyundai Rotem, 2015)

2.2.8. İkincil süspansiyon ve düzleştirme sistemi

İkincil süspansiyon, Resim 2.17’de gösterildiği gibi hava körükleri ile fazladan depo arasındaki iki tane ağız tıkaçlı pnömatrik yaydan, iki tane düzleştirme valf tertibatından ve iki tane sapma damperinden oluşmaktadır.



Resim 2.17. İki tane havalı yay, iki tane düzleştirme valf tertibatı ve iki tane yaw (sapma) damperi (TCDD, 2015)

2.2.8.1. Pnömatik yay ve düzleştirme sistemi

Her bir havalı yayda, yolcu yükü değişiminden bağımsız olarak zemin yüksekliğini sabit tutan bir yükseklik ayar valfi bulunmaktadır. Bir havalı yayın kırılması durumunda, aynı bojidaki diğer havalı yay, iki havalı yay arasındaki boru bağlantısına sabitlenmiş bir diferansiyel valf tarafından hızlı bir şekilde boşaltılır. Havalı yayda, tam yük aralığı boyunca dikey sertliği doğru miktarda tutan ve sönük durumda gerekli performansın elde edilmesine yardımcı olan kademeli bir yardımcı kauçuk yay bulunmaktadır. Süspansiyon sistemi, aracın güvenli şekilde engelleri aşmasını sağlar. Havalı yayın sönük olduğu durumlarda araç seyir hızının azaltılması ve en kısa zamanda bakım için aracın bakım deposuna geri götürülmesi tavsiye edilmektedir (TCDD, 2015).

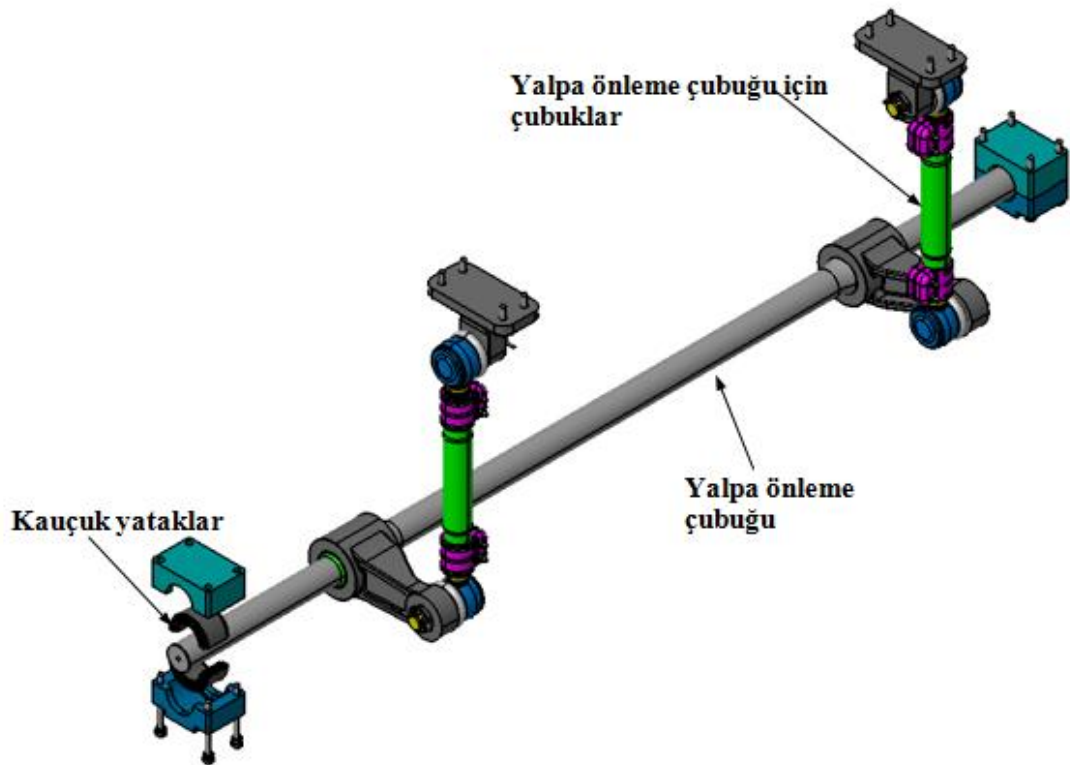
Boru şeklindeki vasistasın iç hacmi havalı yayın ilave deposu olarak kullanılacaktır ki bunun hacmi de her bir depo için yaklaşık 50 litredir. Hava süspansiyon ünitelerine yardımcı depolardan verilmektedir. Havalı yay ile yardımcı depolar arasına bir delik yerleştirilmektedir ve bu sürüş kalitesinin iyileştirilmesi için araç gövdesi dikey salınımlarının kontrolünü sağlamaktadır (TCDD, 2015).

2.2.8.2. Sapma Damperleri

Her bir boji için boji şasisi ile vagon gövdesi arasına yerleştirilmiş iki tane hidrolik, sapma (yaw) damperi herhangi bir salınım hareketinin önlenmesi için boji ile vagon şasisinin birbirlerine göre hareketlerini kontrol eder.

2.2.9. Yalpa önleme çubuğu tertibatı

Beşik ile vagon gövdesi arasına, özellikle virajlarda vagon gövdesinin aşırı burulma hareketinin kontrol altına alınması için bir denge çubuğu yerleştirilmektedir. Denge çubuğu Resim 2.18’de gösterildiği gibi bir çubuk, dört kusinetli yarım yatak ve iki koldan oluşmaktadır.



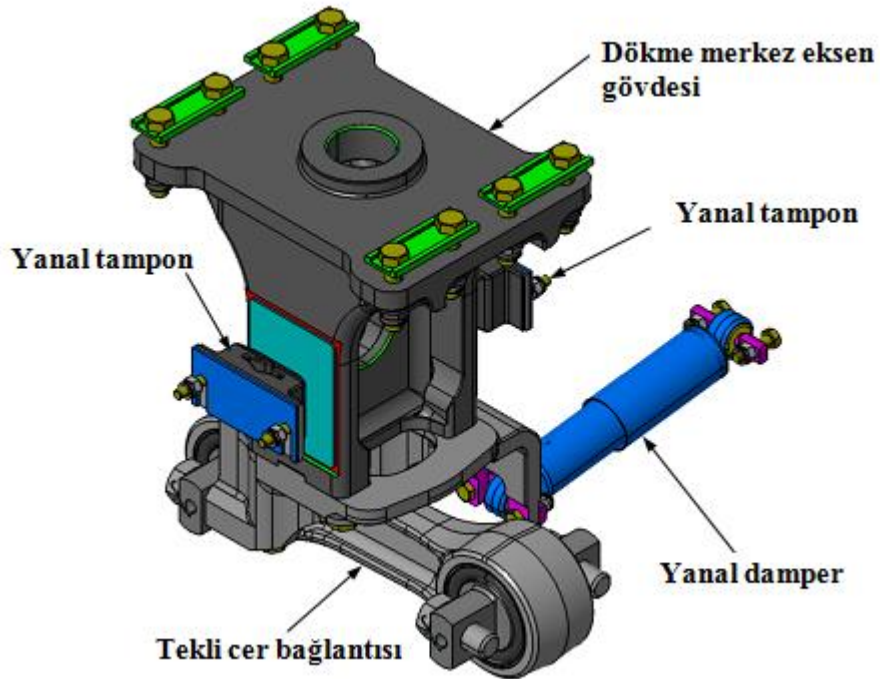
Resim 2.18. Yalpa önleme çubuğu sistemi (TCDD, 2015)

2.2.10. Merkezi pivot tertibatı

Tek bağlantılı tip merkez pivottu, boji ile gövde/boji arayüz grubu arasındaki ana bağlantıyı oluşturmaktadır ve Resim 2.19’da gösterildiği gibi bir dökme merkez pivot gövdesinden, tekli cer bağlantısından, yanıl damperden ve iki yanıl tampondan oluşmaktadır.

Tekli cer bağlantısı dövme çelikten yapılmaktadır ve her ucunda elastik kauçuk burç bulunmaktadır. Bu bojinin vagon gövdesi ile ilgili tam hareketlerine (yanıl, dikey, sapma ve yunuslama) imkân vermekte ama boji ile vagon gövdesi arasındaki boylamasına yer değıştirme hareketini kısıtlamaktadır (TCDD, 2015).

Cer ve frenleme kuvvetleri, merkez eksen sistemi vasıtasıyla bojiden araç gövdesine aktarılır. Merkez eksen sisteminin ayrıca araç kaldırıldığı zaman bojinin araçla birlikte kalmasını sağlayan bir işlevi vardır.



Resim 2.19. Bir adet dökme merkez pivot gövdesi, tekli cer bağlantısı, damper ve iki adet tampon (TCDD, 2015)

2.2.10.1. Yanal damper

Her boji için merkez ekseni ile boji gövdesi arasına geçirilmiş bir yanal hidrolik damper, yanal gövde salınımlarını kontrol etmektedir.

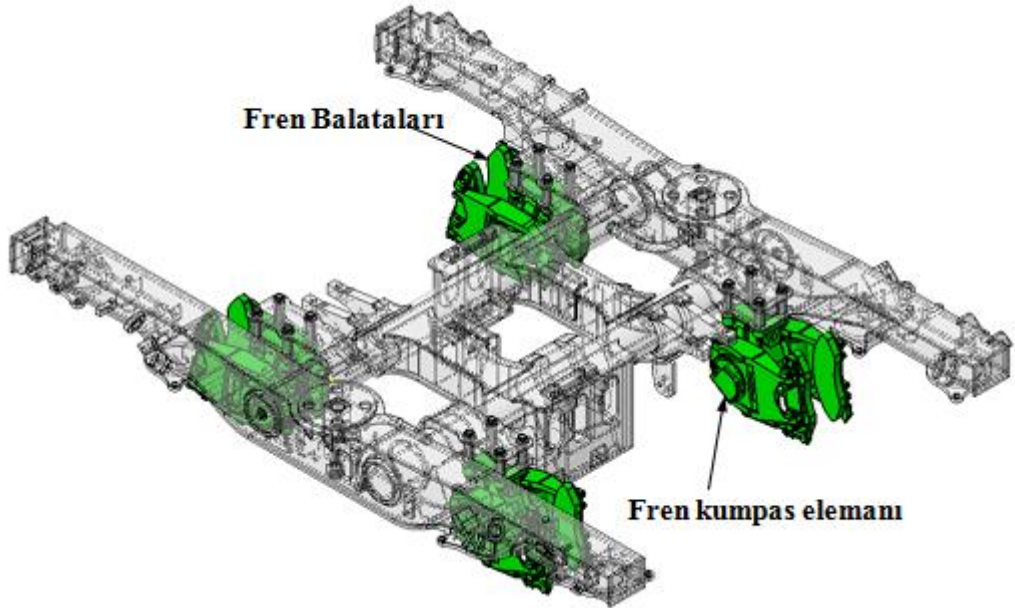
2.2.10.2. Yanal tamponlar

Yanal sertlik, aşırı yanal hareketi sınırlamak için iyi kontrol sağlayan, elastiki kademeli yanal çarpma durdurucular ile takviye edilmiştir.

Boji gövdesine kurulmuş olan yanal tamponlar ± 15 mm'lik serbest yanal harekete sahiptirler.

2.2.11. Fren donanımı

Her balatalı fren sistemi, tekerlek fren disklerinden, fren kaliper ünitesinden ve fren balatalarından oluşmaktadır. Pnömatik freni ve el freni olarak iki şekilde sınıflandırılır. Havalı fren, elektro-pnömatik kumandalı ve hava basıncı ile uygulamalı/hava tahliyesi ile ayırmalı tiptedir. El freni, yay ile uygulamalı/hava basıncı ile ayırmalı tiptedir. Resim 2.20'de fren donanımı ve boji şasisi üzerindeki yerleşimi gösterilmiştir.



Resim 2.20. Fren kumpas elemanı ve fren balataları (TCDD, 2015)

2.2.12. Boru tesisatı

Bojideki fren boruları paslanmaz çelikten yapılmıştır.

2.2.13. Sensörler ve kablolar

Tren setini oluşturan tüm bojiler, kablolu mekanik ve elektrik ekipmanla donatılmıştır.

2.2.13.1. Hız kayıt cihazı jeneratörü

Mc-ön bojinin, hız kaydedici için dingil kutusuna monte edilmiş halde bir darbe jeneratörü vardır. Dingilin sonundaki dingil uç tapasına bağlanmış bir tahrik pimi tarafından çalıştırılır (TCDD, 2015).

2.2.13.2. Ats jeneratörü

Mc-arka bojinin, ATS mıknatısı için dingil kutusunda bir darbe jeneratörü vardır. Hız kayıt jeneratöründe olduğu gibi dingilin sonundaki dingil uç tapasına bağlanmış bir tahrik pimi tarafından çalıştırılır.

2.2.13.3. Wsp sensörü

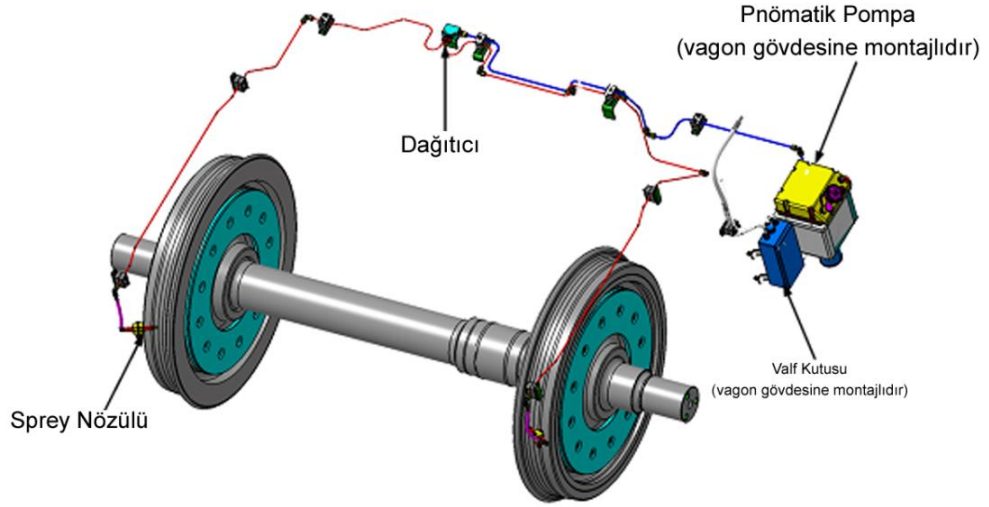
Tüm boji dingillerinin dingil kutusunda bir hız sensörü vardır. Sinyal, milli tekerleğin dönmesi ile tespit edilmektedir.

2.2.13.4. Toprak fırçası

Tüm araç dingillerinin dingil kutusunda topraklama işlemini gerçekleştirmek için toprak teması vardır. Kablo vagon gövdesine bağlıdır.

2.2.14. Tekerlek boden yağlama sistemi

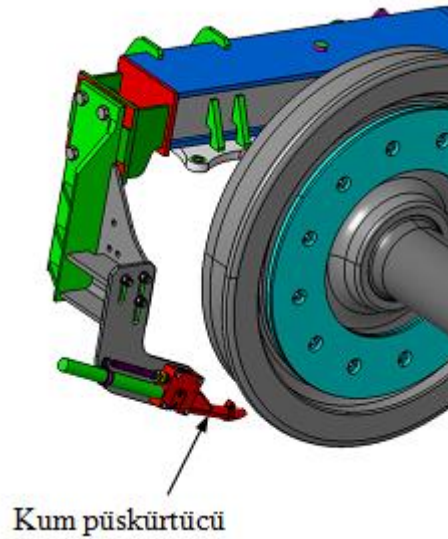
Kurp sensörlü ve mesafeye bağlı kontrol üniteli tekerlek boden yağlama sistemi, tekerlek bodeni ile ray arasındaki aşınmanın azaltılması için bütün vagonlarda ön tekerlek setine uygulanırlar. Tekerlek bodenlerine basınçlı hava ile birlikte küçük miktarlarda yağlayıcı püskürtülür. Resim 2.21’de boden yağlama sistemi gösterilmiştir.



Resim 2.21. Tekerlek boden yağlama sistemi (TCDD, 2015)

2.2.15. Kum püskürtücü

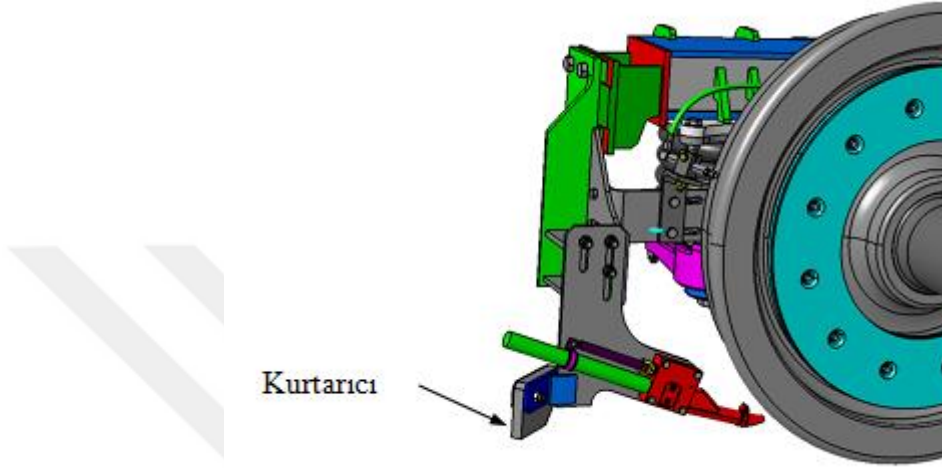
Motorlu bojinin tekerleklerine tekerlek ile ray arasındaki adezyonun iyileştirilmesi için Resim 2.22’de gösterildiği gibi kum püskürtücüler yerleştirilmektedir. Kum vagon gövdesinde bulunan kum kutuları tarafından kum püskürtücülere gönderilir. (TCDD, 2015).



Resim 2.22. Kum püskürtücü (TCDD, 2015)

2.2.16. Kurtaran sistemi

Ray üzerindeki cisimlerin tekerlekle ray arasına girmesini önleyen sistemdir. Kurtaran sistemi vagonun ön kısmında yer alan bojiye Resim 2.23’de gösterildiği gibi monte edilir.



Resim 2.23. Kurtaran sistemi (TCDD, 2015)

3. BOJİ ŞASİSİNİN STATİK ANALİZ YÖNTEMİ

3.1. Statik Analiz Tanımlamaları

Yapılan çalışmada henüz tasarım aşamasındaki bir EMU boji şasisinin 3 boyutlu tasarımı ele alınarak, Ansys Workbench 14.5 programında sonlu elemanlar analizi yöntemiyle mikro elemanlara ayrıştırılmıştır. Boji Yapısal Özellikleri Standartları kapsamında sınır şartlarına maruz bırakılarak ortaya çıkan sonuçlar malzeme özellikleri gözönünde bulundurulmak kaydıyla incelenmiştir. Bu bağlamda kullanılan kavramlar açıklanmıştır.

3.1.1. Statik analiz kavramı

Sonlu elemanlarda statik analizi basitçe tanımlamak gerekirse, analizi yapılan parça üzerindeki yüklerin ve kısıtlamaların , lineer olarak tanımlanmış malzeme özellikleri ile oluşturduğu anlık çözümlerdir. Statik analiz sonuçlarında parça üzerinde oluşan gerilmelerin bir anlık sonuçlar olduğu bilinmelidir. Yani dinamik analizde olduğu gibi zaman bağlı analizler olmayıp anlık analizlerdir (Meseli, 2010).

3.1.2. Sonlu elemanlar analizi kavramı

Sonlu elemanlar metodu, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Ele alınan mühendislik probleminin çözüm bölgesi alt bölgelere ayrıştırılır ve her alt bölgede aranan fonksiyonun ifadesi polinom olacak şekilde seçilir. Belirli işlemler dahilinde her alt bölgede polinom olarak kabul edilen çözümün katsayıları belirlenmeye çalışılır (Kibar, 2012).

- Sonlu elemanlar metodu (SEM) geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Gerekliğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir,
- SEM değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örneğin, anizotropi, nonlineer, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir,

- SEM matematiksel olarak geliştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir,

3.1.3. ANSYS Workbench 14.5 ile bilgisayar destekli analiz kavramı

ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimlerini simule etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır (Figs, 2012).

ANSYS yazılımı hem dışarıdan 3 boyutlu çizim verilerini alabilmekte hem de içindeki "preprocessing" imkanları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Yine aynı preprocess işlemi içerisinde içinde hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli yani mesh de oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve şekilsel olarak elde edilebilir.

ANSYS yazılımı ile özellikle bağlantı algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı yükleme özellikleri ve nonlineer malzeme modelleri sayesinde yüksek mühendislik seviyedeki analizleri hızlı, güvenilir ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Figs, 2012).

3.2. EMU Bojisine Ait Şasinin Statik Analizinin Gerçekleştirilmesi

3.2.1. Malzeme seçimi

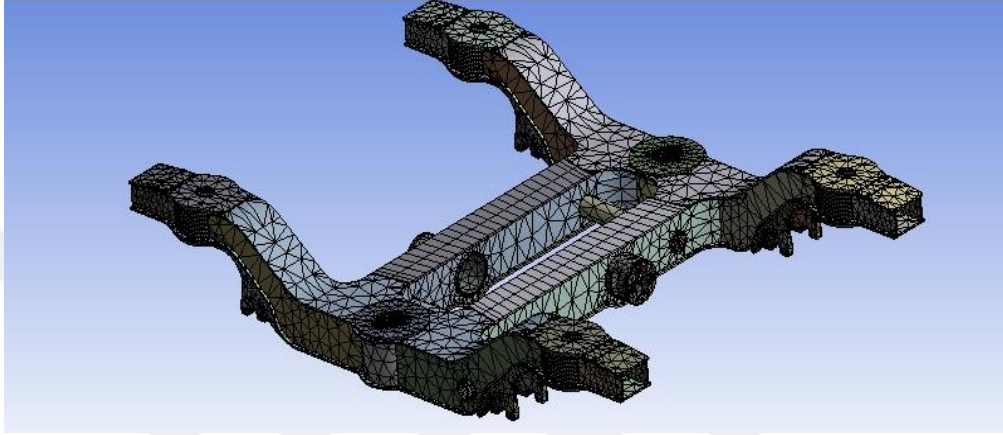
Boji şasi malzemesi olarak S355J2 (yapı çeliği) olarak EN 10025'e uygun olarak (çelik normu) belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. S355J2 kodlu çelik malzeme için mekanik özellikler

Kopma Gerilimi	R_m	510 MPa
Akma Gerilimi (kaynaklı)	$\sigma_{AK-kaynaklı}$	350 MPa
Akma Gerilimi (kaynaklı)	$\sigma_{AK-kaynaklı}$	325 MPa

3.2.2. SE (Sonlu Elemanlar) modeli

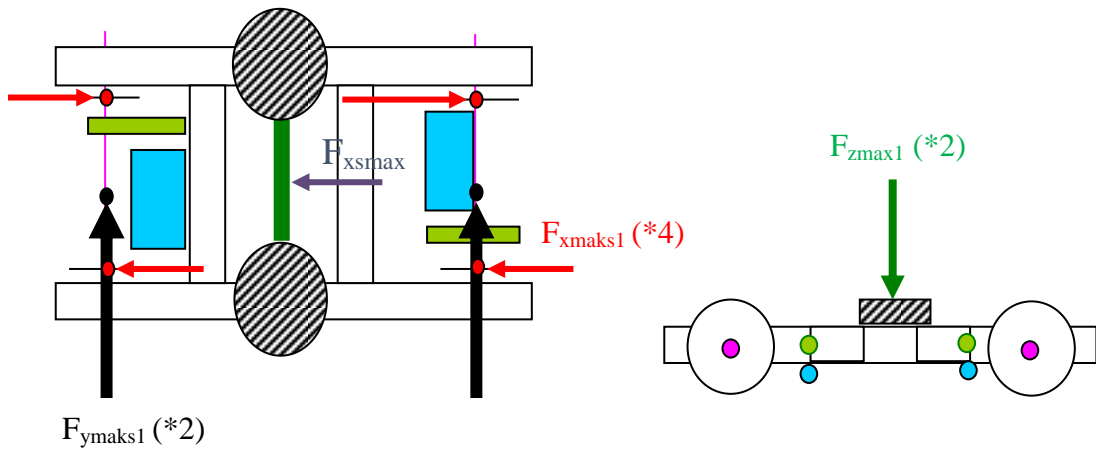
EMU bojisi şasisi 3 boyutlu çizim verisi Ansys Workbench 14.5 programına aktarıldıktan sonra, statik analiz çözümünün gerçekleştirilebilmesi için meshlenerek binlerce alt bölgeye ayrılır. Bu durumda oluşan şasi görünümü Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.1. SEM (sonlu elemanlar metodu) boji matematik modeli

3.2.3. Yükleme şartları ve EN 13749 (boji şasisi standartları)

Boji şasinde ortaya çıkabilecek olan maksimum gerilme değerlerine ulaşabilmek için EN13749:2011 Uluslararası Boji Şasisi Yapısal Özellikleri Standardında bulunan değerler dikkate alınır. Boji şasisi üzerinde meydana gelecek olan istisnai yükler her bir aksa gelecek olan yük maksimum 18 ton olacak şekilde tasarlanır. Boji şasisine gelen yükler Resim 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Resim 3.2. Boji şasisine gelen yükler (TS EN 13749, 2011)

Türkiye’deki karşılığı TS EN 13749 olan standartların tam adı literatürde “Demiryolu Uygulamaları- Tekerlek takımları ve bojiler – boji şasilerinin yapısal şartlarını belirleme metotları” olarak yer alır.

Bu standart, boji şasilerinin tatmin edici bir tasarımını elde edebilmek için takip edilecek yöntemi tanımlar ve tasarım süreçlerini, değerlendirme yöntemlerini, doğrulama ve imalat kalite şartlarını kapsar.

Bu standarda göre, boji şasisi; genelde birincil ve ikincil süspansiyonlar arasına konumlandırılan yük taşıyıcı yapı olarak tanımlanmıştır. Standart kapsamında, statik kuvvet; zaman ile sabit kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Yük durumu kavramı, yapının veya bileşenin maruz kaldığı bir yükleme koşulunu temsil eden yüklerin kümesi veya yüklerin birleşimleri olarak açıklanmıştır. İstisnai yük durumu ise tam işletilebilirlik korunduğundaki azami yükü temsil eden ve statik malzeme özelliklerini değerlendirme için kullanılan aşırı yük durumu olarak tanımlanmıştır.

Analiz çalışması yapılan boji, 160 km/h hıza sahip olacağından dolayı, TS EN 13749 standardında B-1 ve B-2 sınıfına girmektedir. Bu sebeple sözkonusu standardın “C.2 Demiryolu yolcu araç bojileri için yük örnekleri - B-I ve B-II” sınıf olarak adlandırılan bölümü dikkate alınır. Bu bölümün “C.2.1” kısmında boji şasisinin analizi yapılırken dikkate alınacak olan kuvvetlerin hesaplama formülleri ayrı ayrı gösterilmektedir. Bu bağlamda ;

Düşey kuvvetlerin hesaplama formülü (her bir yan şasiye uygulanan, kütlesi iki boji arasında eşit dağıtılmış araçlar varsayımına dayanan kuvvetler) Eş.2.1’de gösterilmektedir.

$$F_{z1maks} = F_{z2maks} = F_{zmaks} / 2 = 1.4g (M_v + P_1 - 2m^+) \quad (2.1)$$

Enine kuvvetlerin formülü (her bir aksa uygulanan kuvvetler) Eş.2.2’de gösterilmektedir.

$$F_{y1maks} = F_{y2maks} = F_y / 2 = 10^4 + ((M_v + P_1)g) / 12 \quad (2.2)$$

Boyuna kuvvetlerin formülü (her bir tekere ve boji şasisinin karşı tarafı üzerine ters doğrultuda uygulanan kuvvetler) Eş.2.3’te gösterildiği gibidir.

$$F_{x1maks} = F_{x2maks} = F_{x3maks} = F_{x4maks} = F_{xmaks} / 4 = 0,1 \times (F_{zmaks} + m^+ g) \quad (2.3)$$

Akışkanlı amortisörden kaynaklı ivmelenme kuvveti ise Eş.2.4'te gösterilen formül ile hesaplanır.

$$F_{xs1maks} = F_{xs2maks} = F_{xs3maks} = F_{xs4maks} = F_{xsmaks} / 4 = 3g (F_a) \quad (2.4)$$

Burulma yüklemesi (boji şasisinin dayanabilmesi gereken %1'lik hat burulmasından kaynaklı yükler) Eş.2.5'teki formül ile hesaplanır.

$$S_z = \% 1 \times h \quad (2.5)$$

Formüllerde “ M_v ” çalışır durumdaki aracın kütlesi, “ P_1 ” istisnai tasarım yükü, “ m^+ ” boji kütlesi, “ F_{zmaks} ” bojideki toplam düşey kuvvet, “ F_{ymaks} ” bojideki toplam yanıl kuvvet, “ F_{xmaks} ” bojideki toplam boyuna kuvvet, “ F_{xsmaks} ” bojideki toplam amortisör ivmelenme kuvveti, “ S_z ” bojideki toplam burulma yüklemesi ve “ F_a ” amortisör ivmelenme kuvveti olarak tanımlanır (TS EN 13749, 2011).

Çizelge 3.2. Boji Üzerine Etki Eden İstisnai Kuvvetler (TS EN 13749, 2011)

Bojiye Etki Eden İstisnai Kuvvetler		
İkincil Süspansiyonlardan Herbirine Gelen Dikey Kuvvet	$F_{z1maks}=F_{z2maks}=F_{zmaks}/2$	181.0 kN
Her bir Aksa Etki Eden Yanıl Kuvvet	$F_{y1maks}=F_{y2maks}=F_{ymaks}/2$	68.9 kN
Her Bir Tekere Gelen Boyuna Kuvvet	$F_{x1maks}=F_{xmax}/4$	45.7 kN
Her Bir Tekere Gelen Akışkanlı Amörtisorlerden Kaynaklı İvmelenme Kuvveti	$F_{xs1maks}=F_{xsmaks}/4$	70,6 kN
Raydan Kaynaklı Burulma Etkisi (%1)	S_z	25 mm

En13749:2011’de tanımlandığı üzere boji şasisi yapısı Çizelge 3.2’de gösterilen yüklerin, Çizelge 3.3’teki gibi kombine edilerek uygulanması neticesinde boji şasisinin kullanım ömrü süresince karşılaşacağı maksimum gerilmeler hesaplanır.

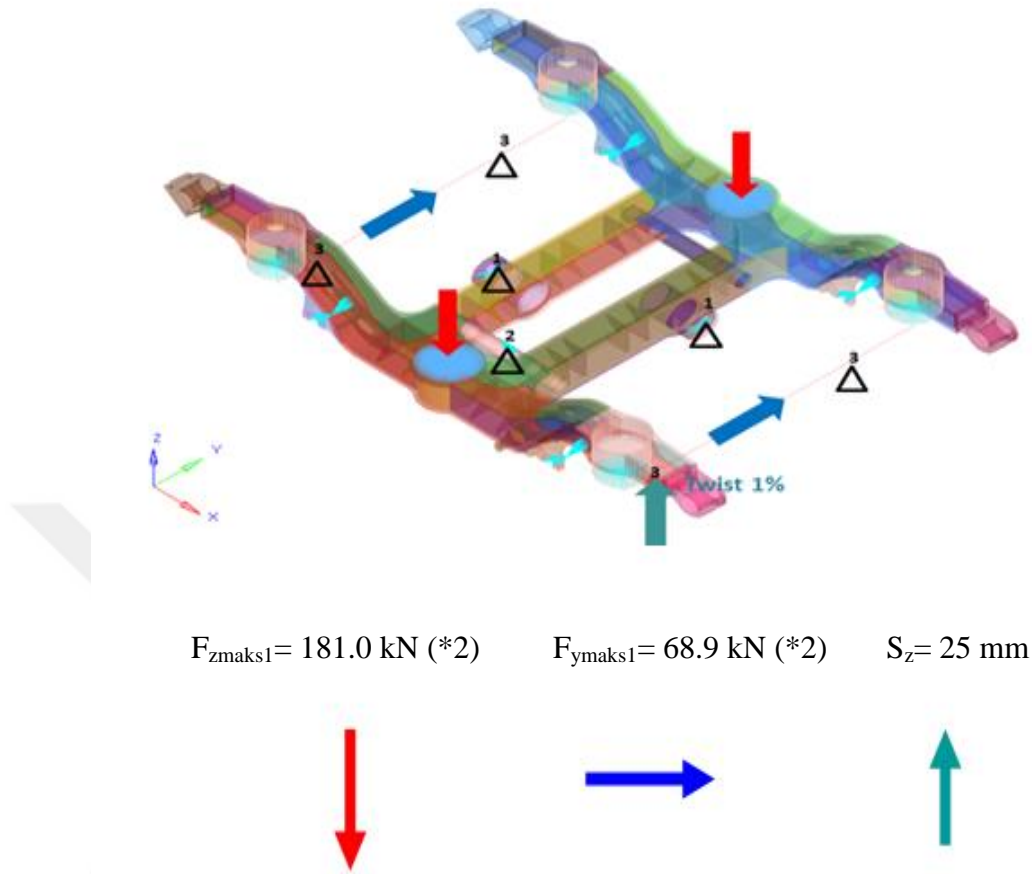
Ansys Workbench 14.5 programıyla sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılacak statik analizde boji şasisi için aşağıdaki 4 farklı durum incelenecektir.

Çizelge 3.3. Yükleme Şartları (EN 13749:2011)

Test Durumu Adlandırması	Test Kodu	Test Durumunda Uygulanan Yükler
İstisnai Yükler 1	İ1	Maksimum Dikey Kuvvet + Maksimum Yanal Kuvvet + Burulma
İstisnai Yükler 2	İ2	Maksimum Dikey Kuvvet + Maksimum Boyuna Kuvvet + Burulma
İstisnai Yükler 3	İ3	Maksimum Dikey Kuvvet + Amörtisör İvmelenme Etkisi
İstisnai Yükler 4	İ4	Dikey Boş vagon kütlesi + Düşük Hızdan Kaynaklı Derayman Etkisi

3.2.3.1. Yükler ve sınır şartları – istisnai yükler 1

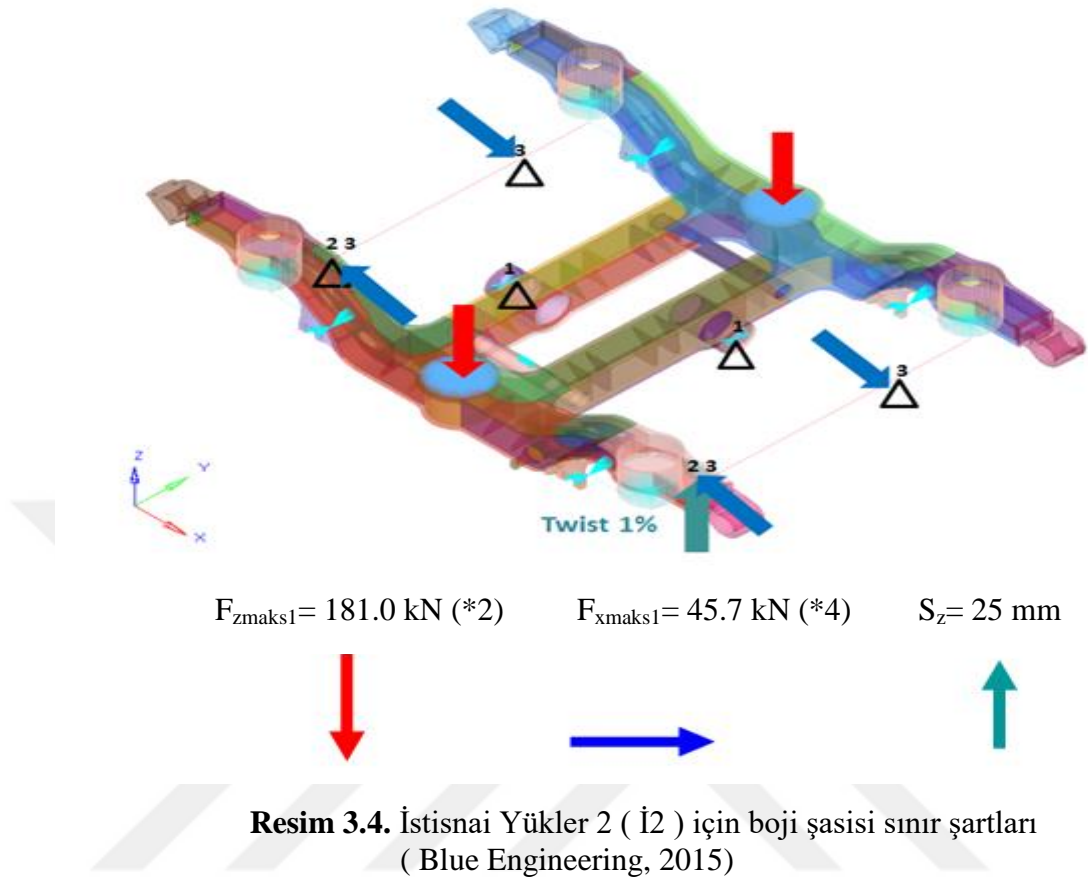
İstisnai Yükler İ1 için boji şasisine uygulanacak yükler ve doğrultuları Resim 3.3’te gösterilmektedir. EN 13749 standardına göre, boji şasisine maksimum dikey kuvvet (F_{zmax}), maksimum yanal kuvvet (F_{ymaks}), burulma (S_z) uygulanmıştır. Maksimum dikey kuvvet ikincil süspansiyon noktaları üzerine yerleştirilirken, maksimum yanal kuvvet boji tekerlek aksına dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Yine EN 13749 standardına göre boji hareketi esnasında raydan kaynaklandığı varsayılan %1’lik burulma etkisi de boji şasisi kolu üzerine uygulanmıştır. Ansys Workbench 14.5 programında gerçekleştirilen bu senaryo içerisinde, Δ işareti ve (1), (2), (3) şeklinde gösterilen sabitleme işlemi uygulanmıştır. Bu sabitlemelerden (1) ile gösterilen boyuna sabitlemeler çekme sistemine, (2) ile gösterilen enine sabitlemeler destek barlarına, (3) ile gösterilen dikey sabitlemeler boji aksına uygulanmıştır.



Resim 3.3. İstisnai Yükler 1 (İ1) için boji şasisi sınır şartları
(Blue Engineering, 2015)

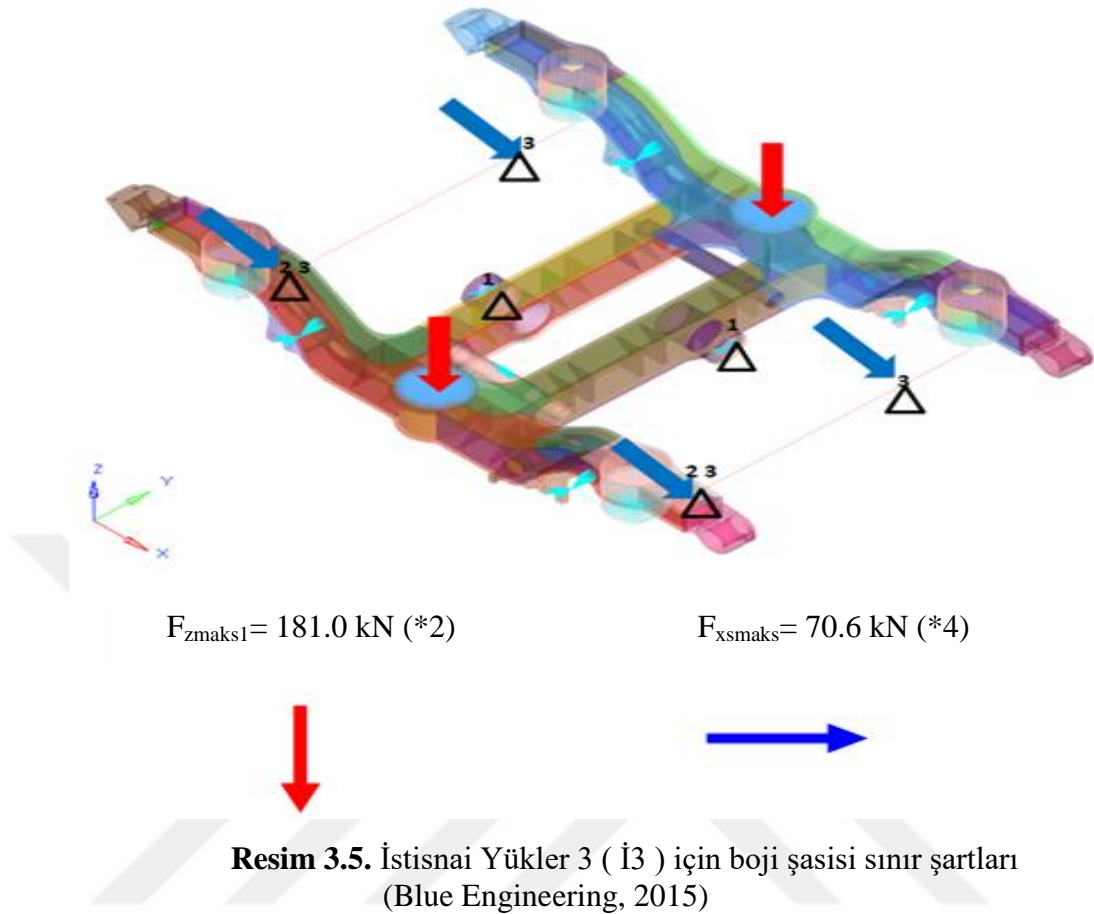
3.2.3.2. Yükler ve sınır şartları – istisnai yükler 2

İstisnai Yükler İ2 için boji şasisine uygulanacak yükler ve doğrultuları Resim 3.4'de gösterilmektedir. EN 13749 standardına göre, boji şasisine maksimum dikey kuvvet ($F_{z\text{maks}}$), maksimum boyuna kuvvet ($F_{x\text{lmaks}}$) ve burulma (S_z) uygulanmıştır. Maksimum dikey kuvvet ikincil süspansiyon noktaları üzerine yerleştirilirken, maksimum boyuna kuvvet boji gövdesine dik doğrultusunda yerleştirilmiştir. Yine EN 13749 standardına göre boji hareketi esnasında raydan kaynaklanan burulma etkisi de boji şasisi kolu üzerine uygulanmıştır. Ansys Workbench 14.5 programında gerçekleştirilen bu senaryo içerisinde, Δ işareti ve (1), (2), (3) şeklinde gösterilen sabitleme işlemi uygulanmıştır. Bu sabitlemelerden (1) ile gösterilen boyuna sabitlemeler çekme sistemine, (2) ile gösterilen enine sabitlemeler boji akslarına, (3) ile gösterilen dikey sabitlemeler boji aksına uygulanmıştır.



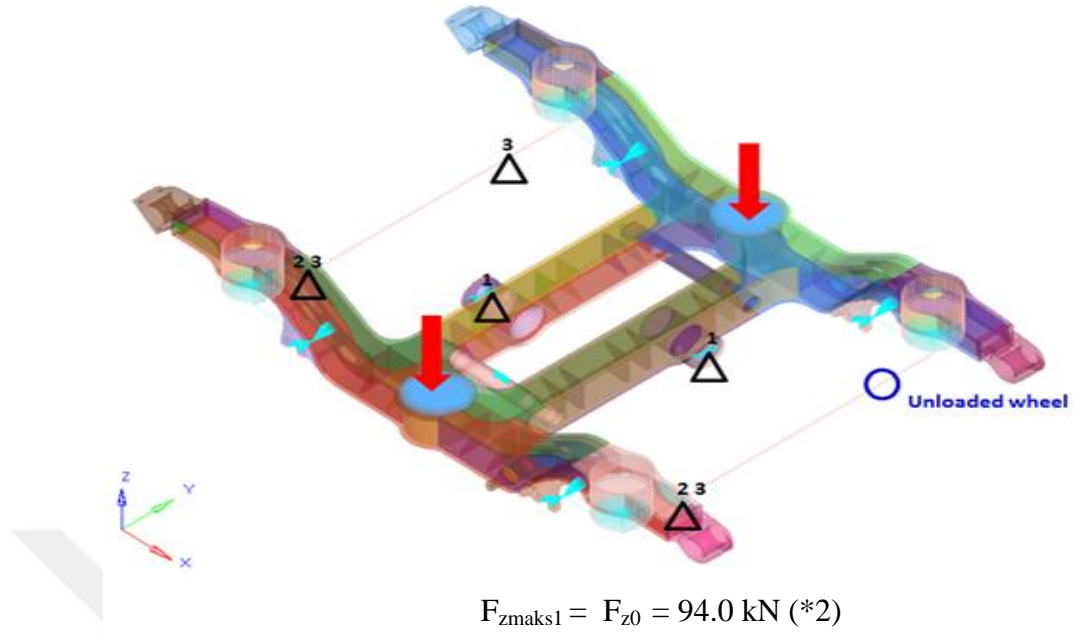
3.2.3.3. Yükler ve sınır şartları – istisnai yükler 3

İstisnai Yükler İ3 için boji şasisine uygulanacak yükler ve doğrultuları Resim 3.5'te gösterilmektedir. EN 13749 standardına göre, boji şasisine maksimum dikey kuvvet ($F_{z\text{maks}}$) ve her bir tekere gelen akışkanlı amortisörlerden kaynaklı ivmelenme kuvveti ($F_{x\text{smax}}$) uygulanmıştır. Maksimum dikey kuvvet ikincil süspansiyon noktaları üzerine yerleştirilirken, her bir tekere gelen akışkanlı amortisörlerden kaynaklı ivmelenme kuvveti boji gövdesine dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Ansys Workbench 14.5 programında gerçekleştirilen bu senaryo içerisinde, Δ işareti ve (1), (2), (3) şeklinde gösterilen sabitleme işlemi uygulanmıştır. Bu sabitlemelerden (1) ile gösterilen boyuna sabitlemeler çekme sistemine, (2) ile gösterilen enine sabitlemeler boji akslarına, (3) ile gösterilen dikey sabitlemeler boji akslarına uygulanmıştır.



3.2.3.4. Yükler ve sınır şartları – istisnai yükler 4

İstisnai Yükler İ4 için boji şasisine uygulanacak yükler ve doğrultuları Resim 3.6'da gösterilmektedir. EN 13749 standardına göre, boji şasisine yalnızca maksimum dikey kuvvet ($F_{z\text{maks}}$) uygulanmıştır. Maksimum dikey kuvvet ikincil süspansiyon noktaları üzerine yerleştirilmiştir. Bu yükleme senaryosunda vagon boş olarak kabul edildiği için dikey boş vagon kütlesi maksimum dikey kuvvet ($F_{z\text{maks}}$) olarak kabul edilmiştir. Ansys Workbench 14.5 programında gerçekleştirilen bu senaryo içerisinde, Δ işareti ve (1), (2), (3) şeklinde gösterilen sabitleme işlemi uygulanmıştır. Bu sabitlemelerden (1) ile gösterilen boyuna sabitlemeler çekme sistemine, (2) ile gösterilen enine sabitlemeler boji akslarına, (3) ile gösterilen dikey sabitlemeler boji akslarına uygulanmıştır.



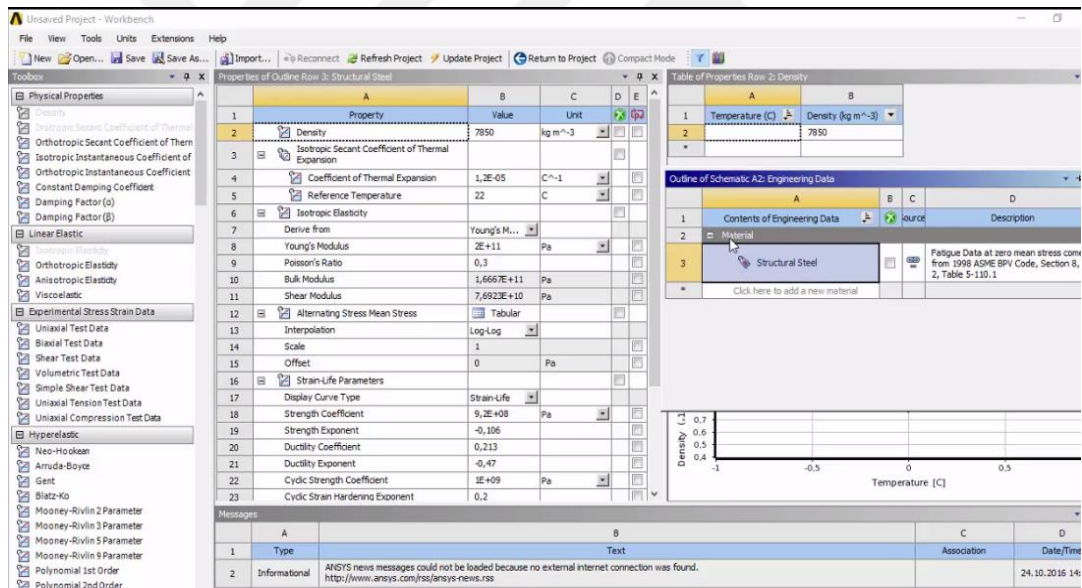
Resim 3.6. İstisnai Yükler 4 (İ4) için boji şasisi sınır şartları
(Blue Engineering, 2015)

4. BOJİ ŞAŞİSİNİN STATİK DAYANIMININ ANSYS WORKBENCH 14.5 KULLANILARAK İNCELENMESİ

4.1. Analiz Şartlarının Ansys Workbench 14.5 Programına Aktarılması

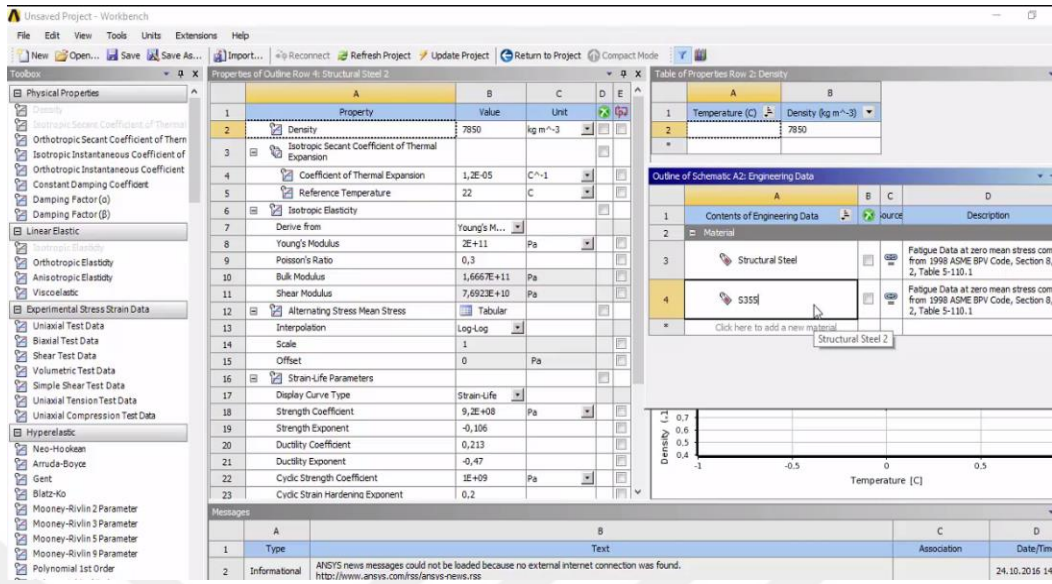
Boji şasisine gelen statik yükler incelemek amacıyla , bir önceki bölümde sayısal ve şematik olarak gösterilen olduğumuz boji şasisine gelen yükler ve sınır şartları Ansys Workbench 14.5 programına aktarılmıştır. 4 Farklı sınır şartı için program içerisinde aynı modüller ve sekmeler kullanılacağı için, İl durumunu örnek olarak anlatımda bulunulmuştur:

Programı açıldıktan sonra ilk olarak şasi malzemesi olan S355J2 kodlu malzemenin özellikleri Resim 4.1’de gösterilen “Engineering Data” (Mühendislik Verisi) kısmına girilmiştir.

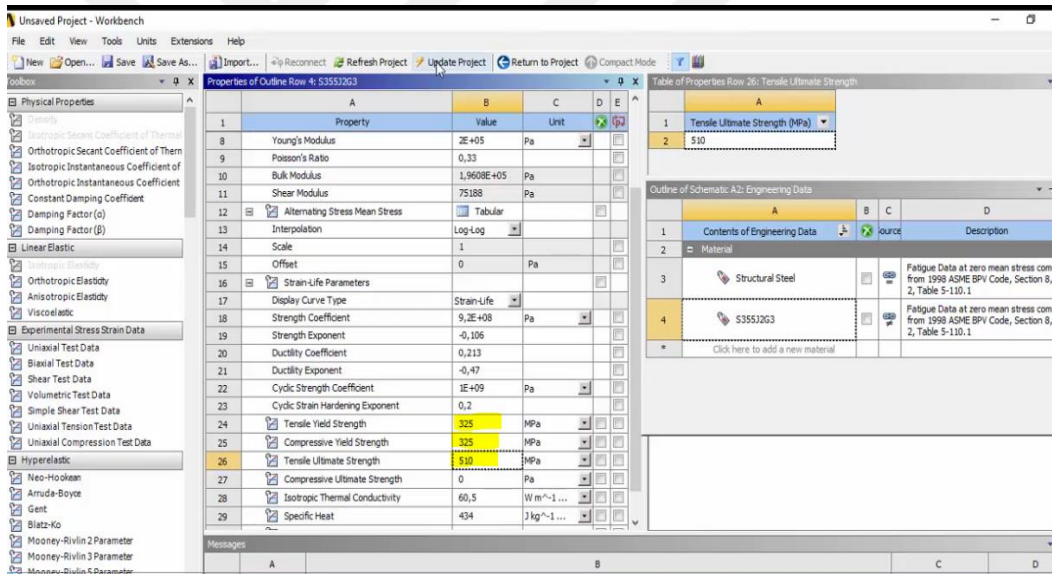


Resim 4.1. Engineering data (mühendislik verisi) sekmesi

Resim 4.2’de gösterildiği gibi yeni malzemenin isim olarak malzeme kısmına atanmıştır.

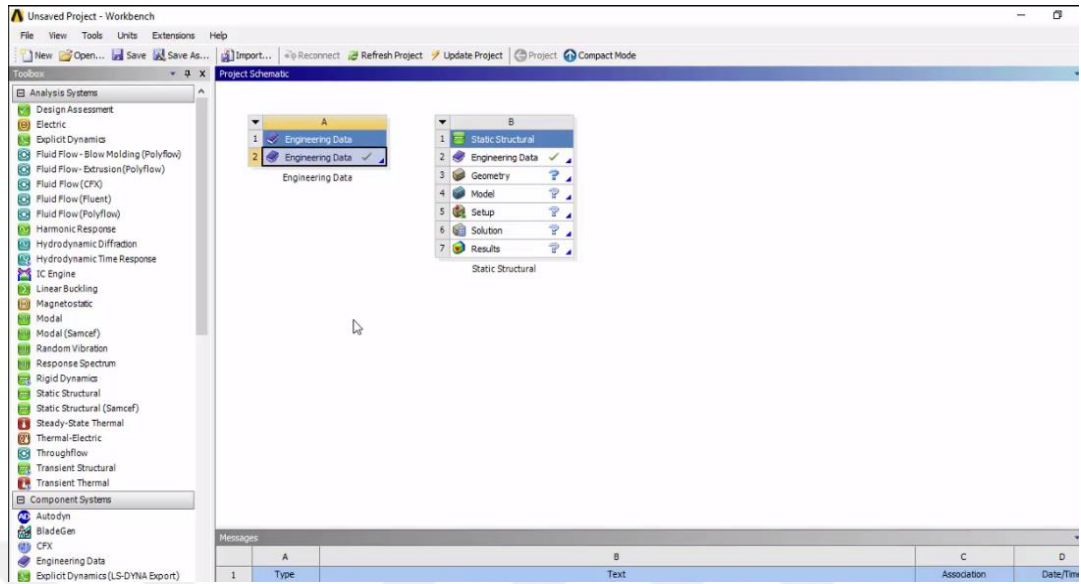


Resim 4.2. Yeni malzeme sekmesi atanması



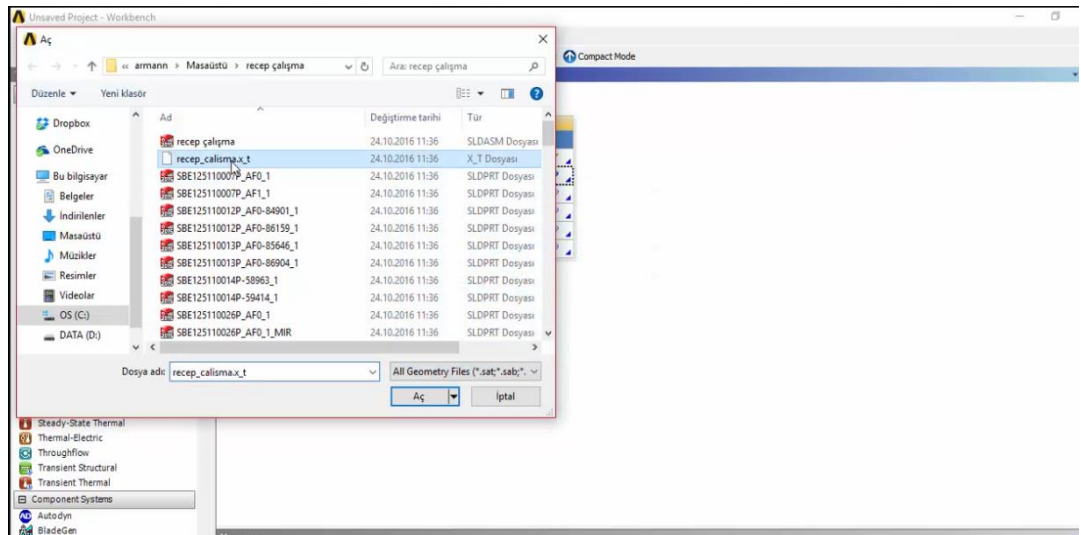
Resim 4.3. S355J2 kodlu malzeme özelliklerinin girilmesi

Malzeme özellikleri girildikten sonra “Static Structural” sekmesine seçilerek, Resim 4.4’te gösterilen statik analiz yapılacak modülün açılması sağlanmıştır.



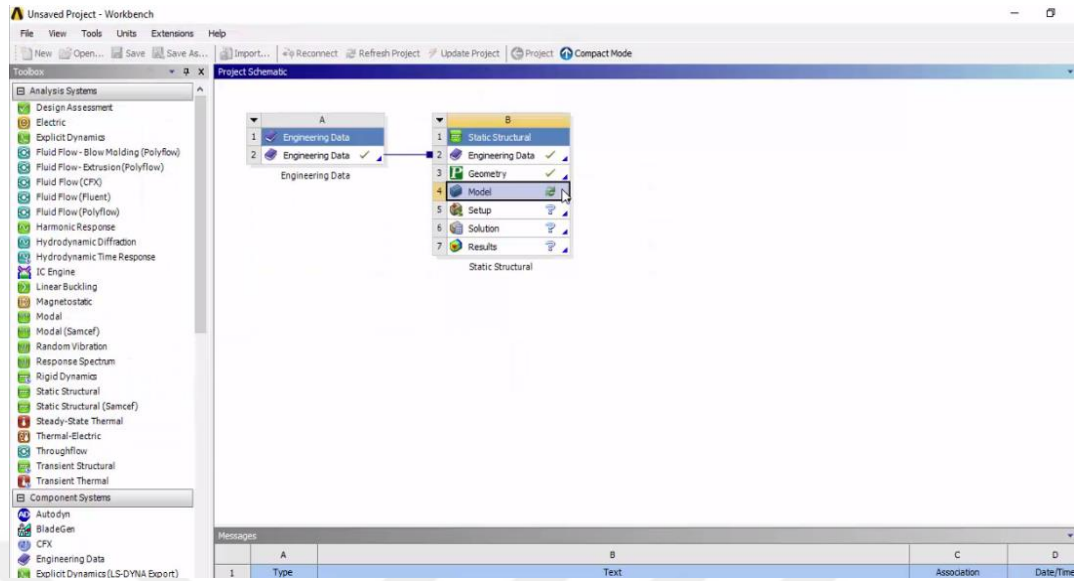
Resim 4.4. Uygun modülün seçilmesi

Ardından Catia® programında çizimi yapılmış olup , Ansys programına entegrasyon için Inventor® ve Solidworks® programlarında düzeltmelerinin gerçekleştirildiği boji şasisi çizim dosyası Resim 4.5'te gösterildiği gibi “x_t” uzantılı olarak programa aktarılmıştır.



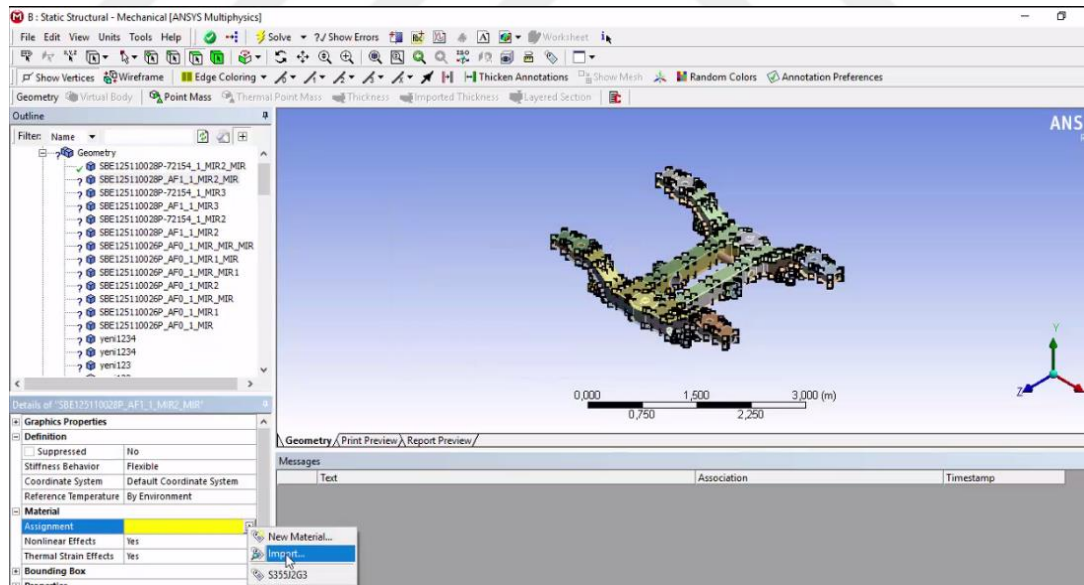
Resim 4.5. Cad datasının programa aktarılması

Cad datası Ansys programına aktarıldıktan sonra, yükleme ve sınır şartlarını uygulamak için Resim 4.6'da gösterilen “model” sekmesine geçilmiştir.



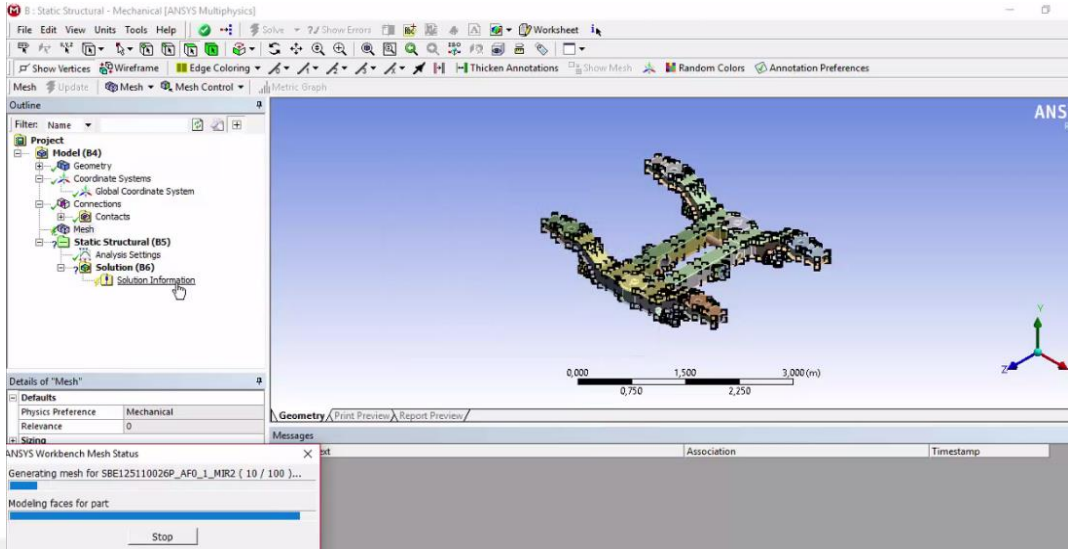
Resim 4.6. Yükleme ve sınır şartlarının kurgulandığı model sekmesine giriş

Başka bir programdan Cad datası (3 boyutlu çizim verisi) aktarımı yapıldığı için, şasi parçalarının malzemesi, daha önce özellikleri girilmiş olan S355J2 kodlu malzeme ile Resim 4.7’de gösterildiği gibi değiştirilmiştir.



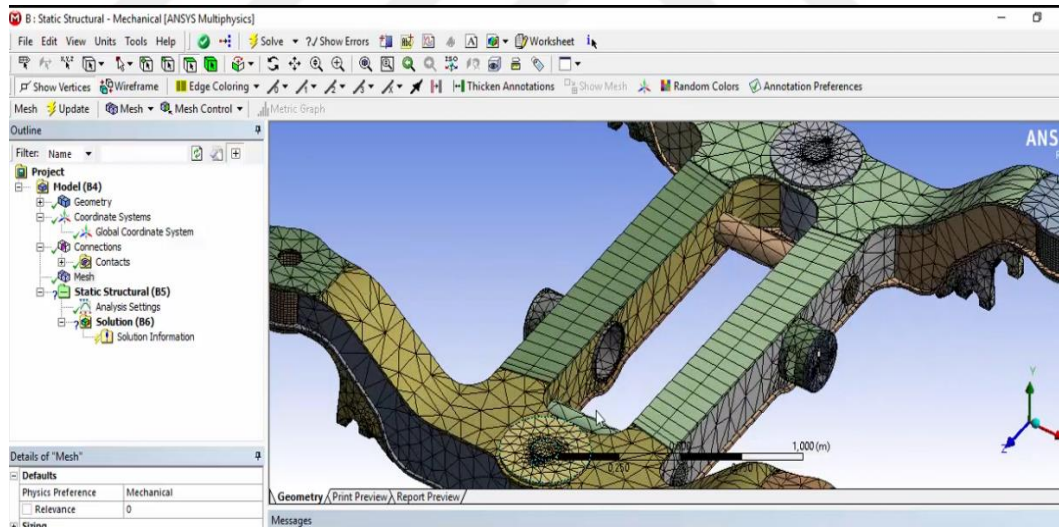
Resim 4.7. Cad datasının parçaları için malzeme atamasının yapılması

Sonlu elemanlar metodunun yapısı gereği şasinin cad datasını “mesh” adı verilen ağlara bölünmüştür. Bu işlemi mesh sekmesi üzerinden “generate mesh” komutuyla otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Resim 4.8’de gösterildiği gibi Automatic Mesh metodu kullanılmıştır.



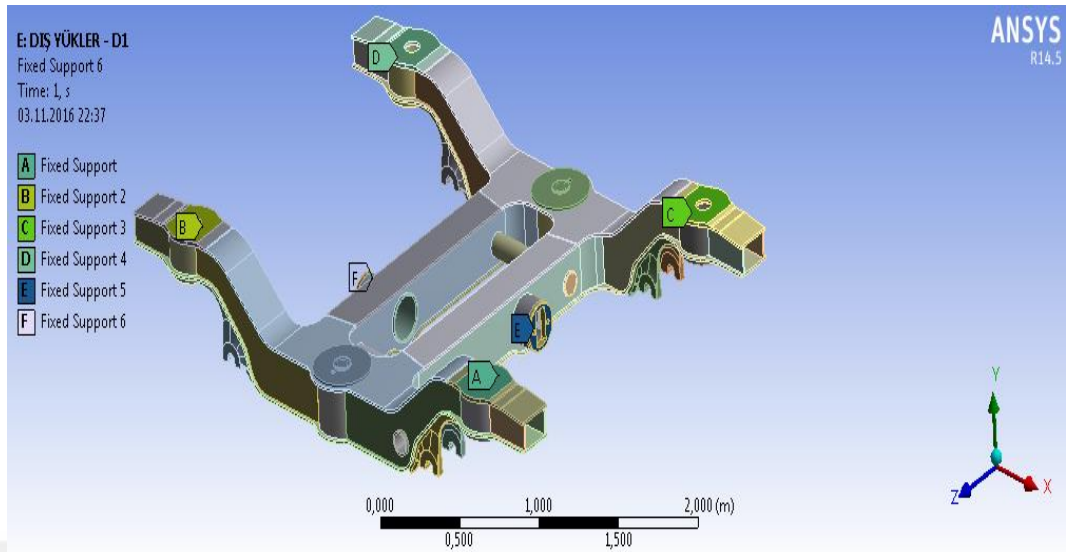
Resim 4.8. Automatic mesh işlemi

Mesh işlemi sonucunda boji şasisi 228678 düğüm (nodes) ve 93331 elemana (elements) bölünmüş olup mesh hassasiyeti coarse modundadır ve oluşan görüntü Resim 4.9’da gösterilmiştir.

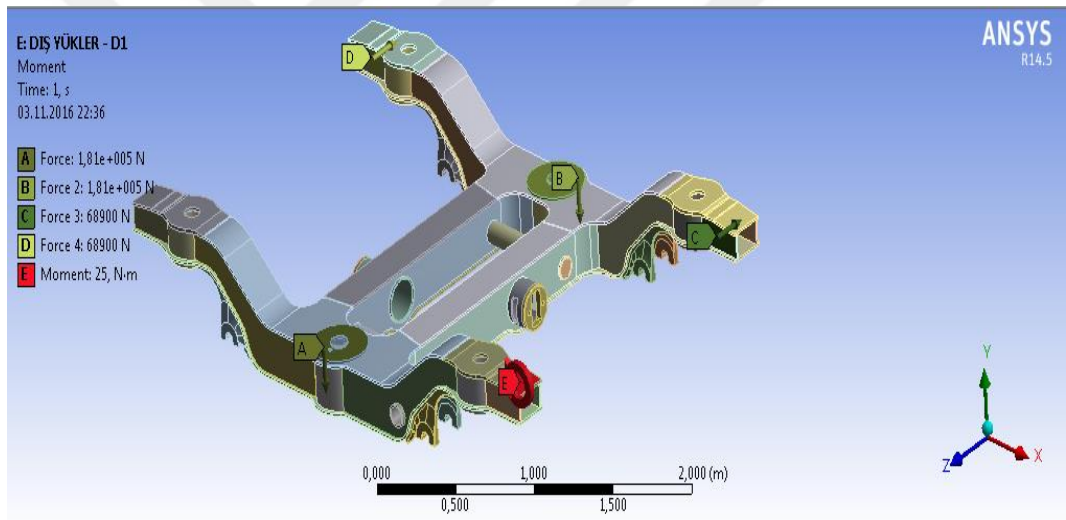


Resim 4.9. Mesh işleminin tamamlanması

3.3.2.1’de belirtildiği gibi İl için sabitlemeler ve yüklemeler Resim 4.10 ve Resim 4.11’de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Sabitlemeler için “fixed support” , yüklemeler için “force” ve “moment” sekmeleri kullanılmıştır.

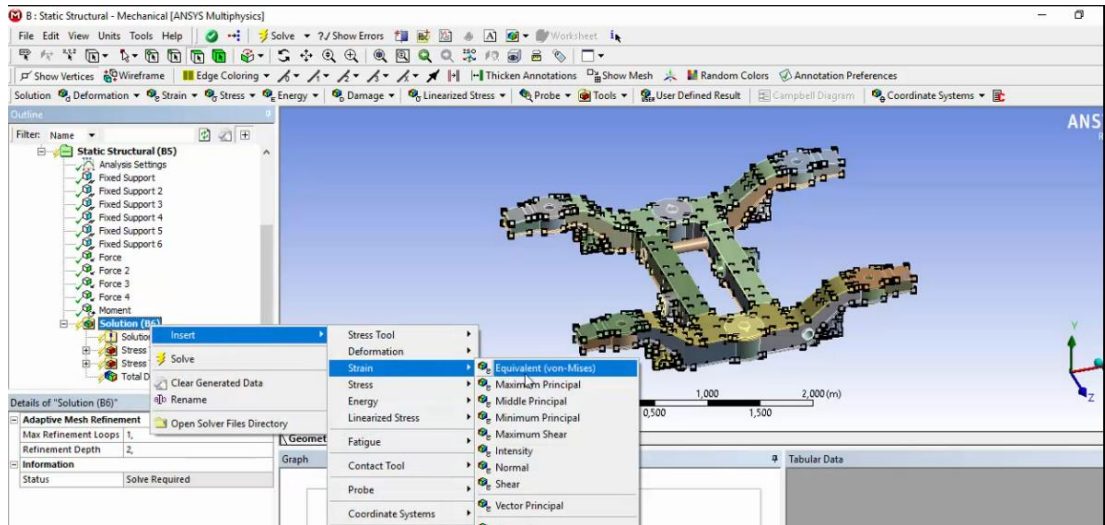


Resim 4.10. İ1'e göre sabitlemelerin uygulanması



Resim 4.11. İ1'e göre yüklerin uygulanması

Yüklemeler ve sabitlemeler uyguladıktan sonra, son aşama olan “solution” kısmına geçilmiştir. Görülmek istenen emniyet katsayısı, toplam yer değiştirme ve Von-Mises gerilmesi gibi değerler Resim 4.12’de gösterildiği gibi “insert” kısmından seçilmiştir.

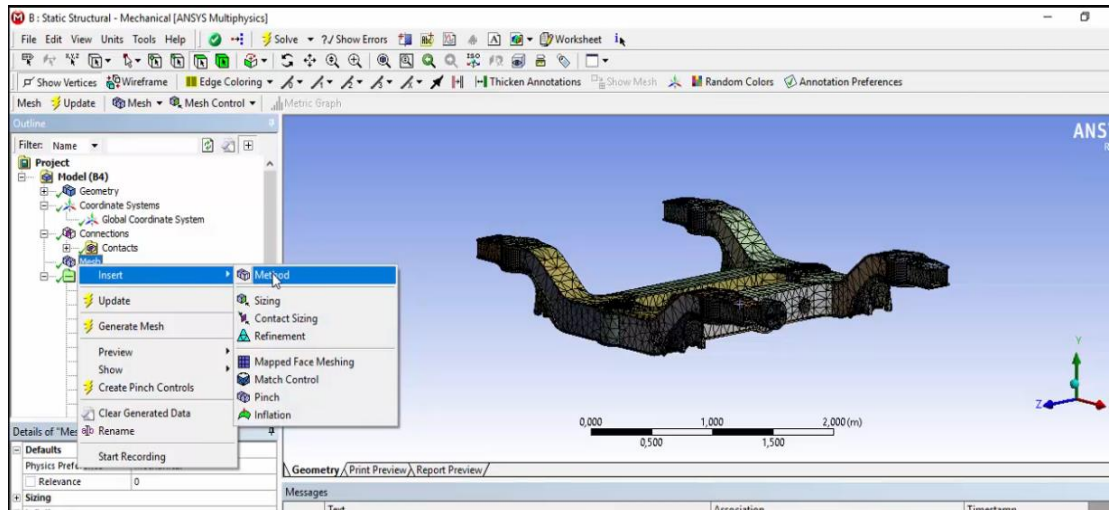


Resim 4.12. Von-Mises gerilimlerinin hesaplanması

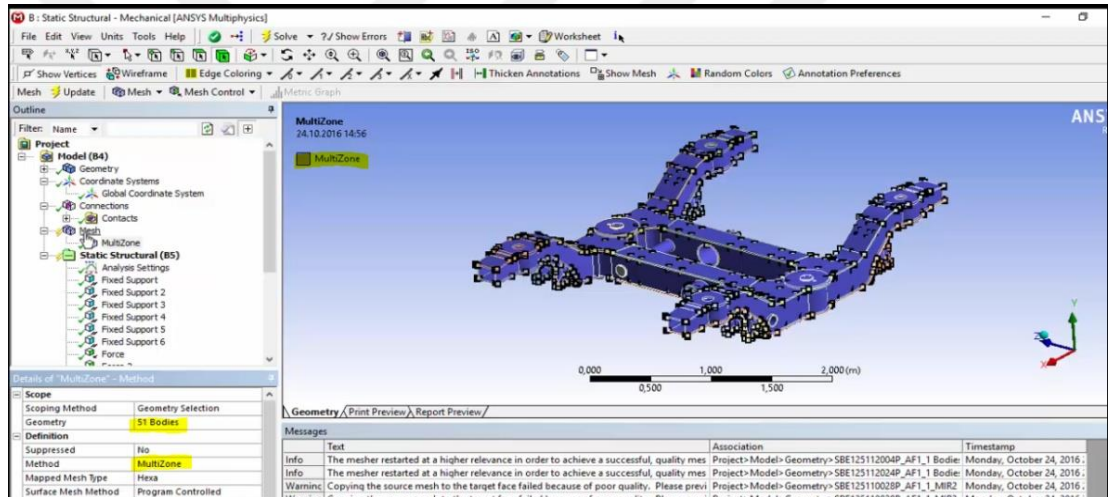
Daha sonra “solve” komutu seçilerek, sonuçların gösterilmesi için bilgisayarın işlemci ve ram kapasitesine göre belirli süre beklenerek sonuçlara ulaşılmıştır.

Ayrıca “mesh” kalitesi ve seçilen mesh tipi de sonuçların kalitesi kadar bekleme süresini de etkilemektedir. Kullanılan bilgisayarın kapasitesi düşük olduğu takdirde yüksek kalitede mesh seçimi yapmak sonuçlara ulaşma süresini oldukça arttırabilir hatta bazı durumlarda hata uyarısı alınabilmektedir.

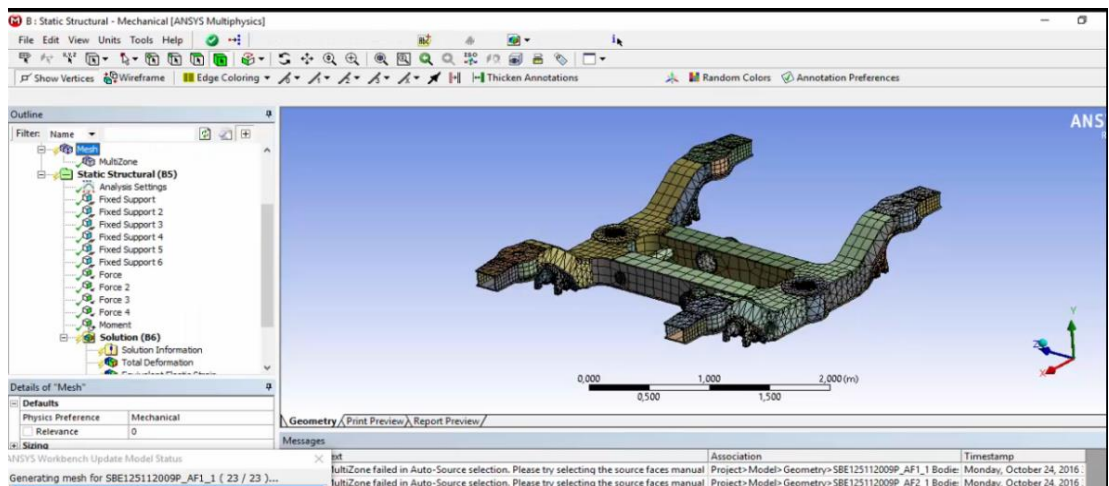
Öte yandan belirtilen işlem adımları uygulandıktan sonra, sonuçların kalitesini arttırmak için mesh sekmesini yeniden düzenleyerek, çözümleri güncellemek mümkün olmaktadır. Bu bağlamda Resim 4.13, Resim 4.14 ve Resim 4.15’de görüldüğü üzere Multizone metodu kullanılarak, tüm adımları tekrar etmeksizin benzer sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır.



Resim 4.13. Farklı mesh metoduyla mesh yapılması

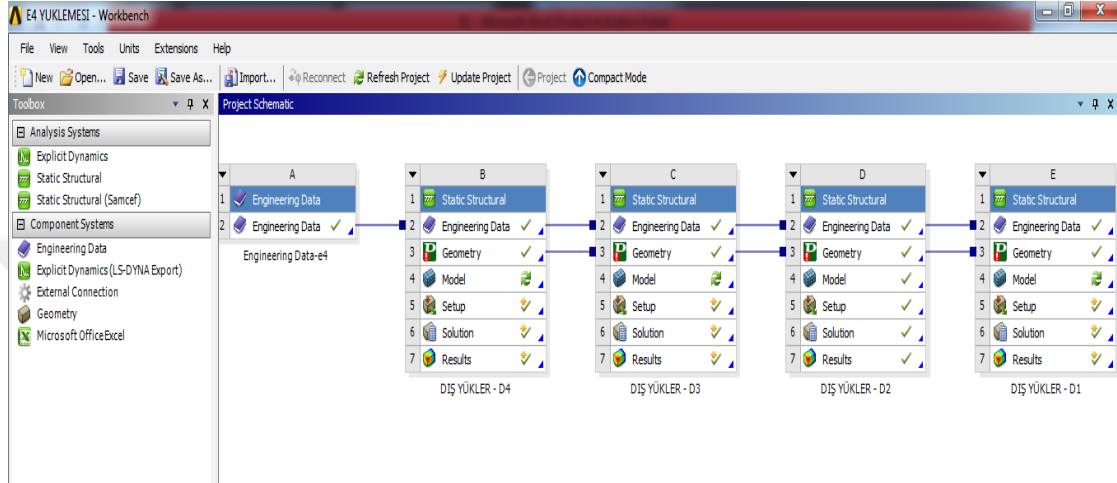


Resim 4.14. Farklı mesh metodu olarak multizone metodunun atanması



Resim 4.15. Multizone metodu sonrası şasinin mesh görünümü

Tüm işlemler bitirdikten sonra İ1 durumu için analiz tamamlanmış olacaktır. Ancak Ansys Workbench 14.5 'in sunduğu kolaylık gereği, yapılan işlem adımlarını farklı yük ve sabitleme durumları için ayrı ayrı yeniden uygulamak yerine, engineering data ve mesh kısımları birbirine bağlanarak 4 ayrı durum için analiz gerçekleştirilebilir.



Resim 4.16. Ansys Workbench 14.5 'te farklı durumların birbirine bağlanması

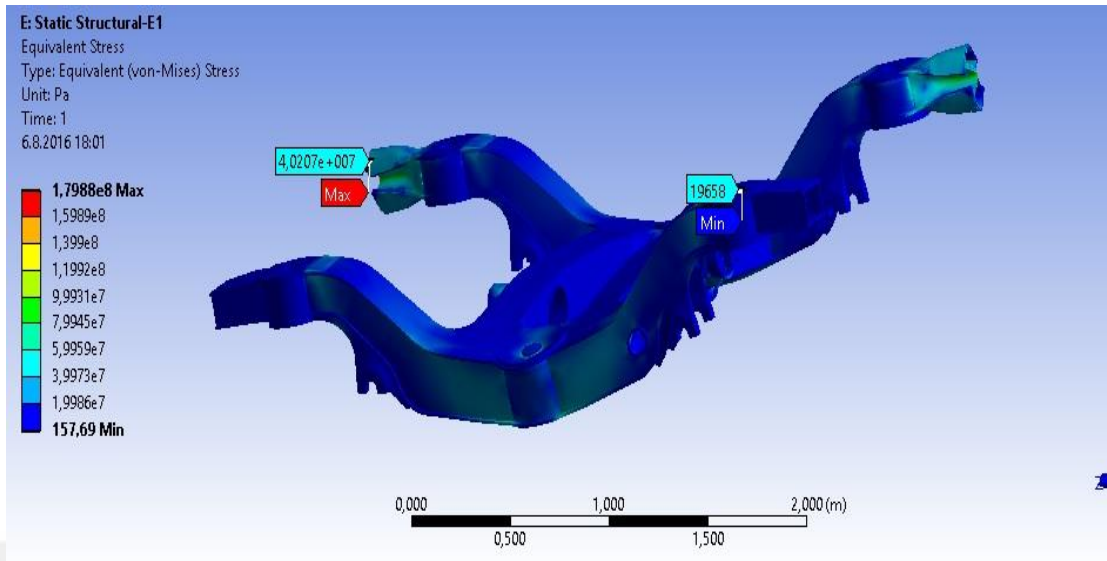
Resim 4.16'da görüldüğü gibi malzeme özelliği, cad datası ve mesh özellikleri aynı olan 4 ayrı durum için yalnızca 3.3.2.2, 3.3.2.3 ve 3.3.2.4'teki yükleme ve sınır şartları girilerek analiz sonuçlarına ulaşılabilir.

4.2. Ansys Workbench 14.5 Statik Analiz Sonuçları

Ansys Workbench 14.5 Programında 4 farklı durum için analiz şartları sağlandıktan sonra boji şasisi üzerinde meydana gelen Von-Mises gerilimleri aşağıda gösterilmiştir.

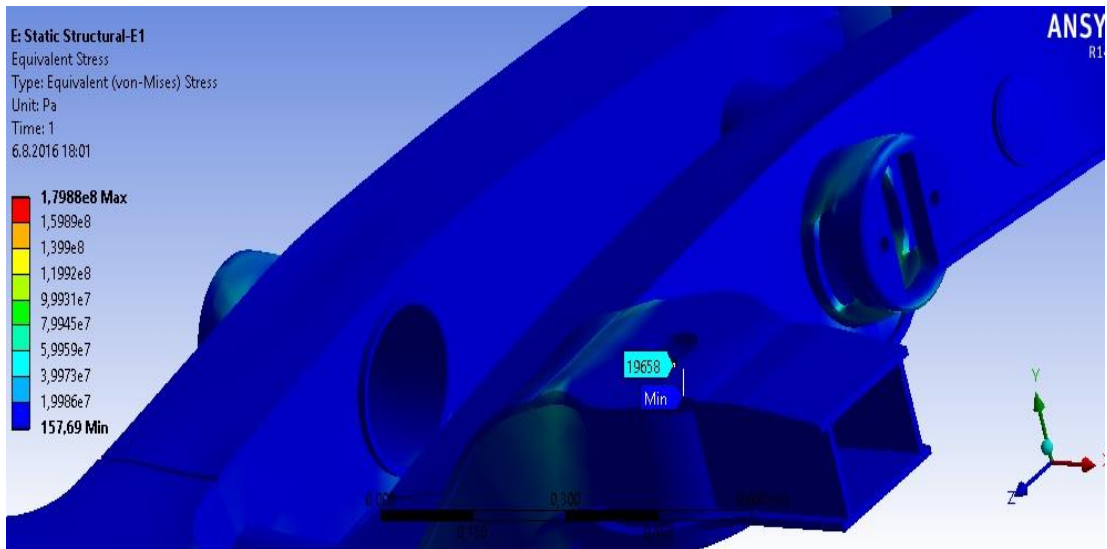
4.2.1. İstisnai yükler 1 (İ1) : maksimum dikey yük + maksimum yanal yük + burulma

İ1 için maksimum dikey yük , maksimum yanal yük ve burulma kuvvetleri boji şasisi üzerine uygulandığında boji şasisinin genel görünümü Resim 4.17'de gösterilmiştir.



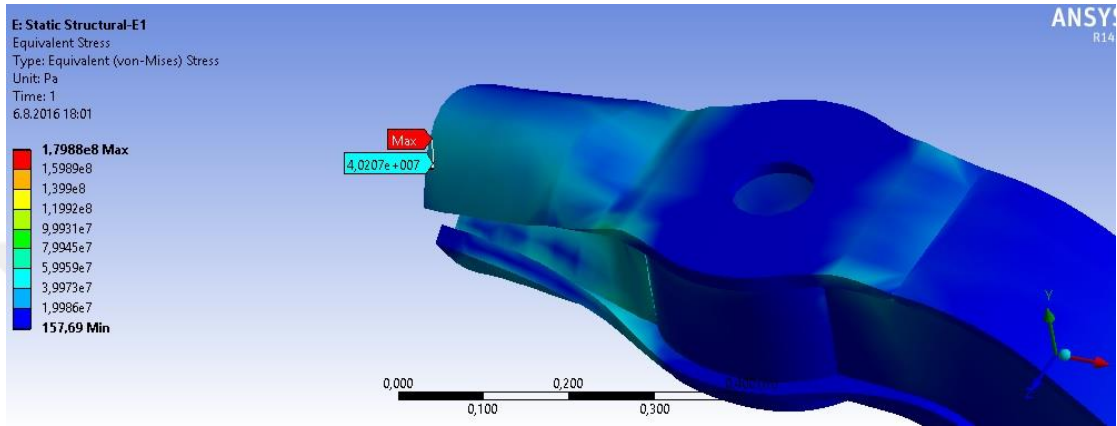
Resim 4.17. İ1 – Von-Mises gerilmesi[Pa] – boji şasisi genel görünümü

Resim 4.18’de gösterildiği gibi İ1 için ilgili yükler uygulandığında minimum gerilme birincil süspansiyonların bağlandığı noktada 19.66 kPa olarak ölçülmüştür. Boji şasisinin tamamında kullanılan malzemenin akma gerilmesi 325 MPa olduğu için, birincil süspansiyon bağlantı noktasında gerçekleştirilen tasarımın yüklemesi yapılan kuvvetlere dayanımı uygun sınırlar içerisinde dir.



Resim 4.18. İ1 – minimum Von-Mises gerilmesi[Pa] – birincil süspansiyon bağlantı noktası

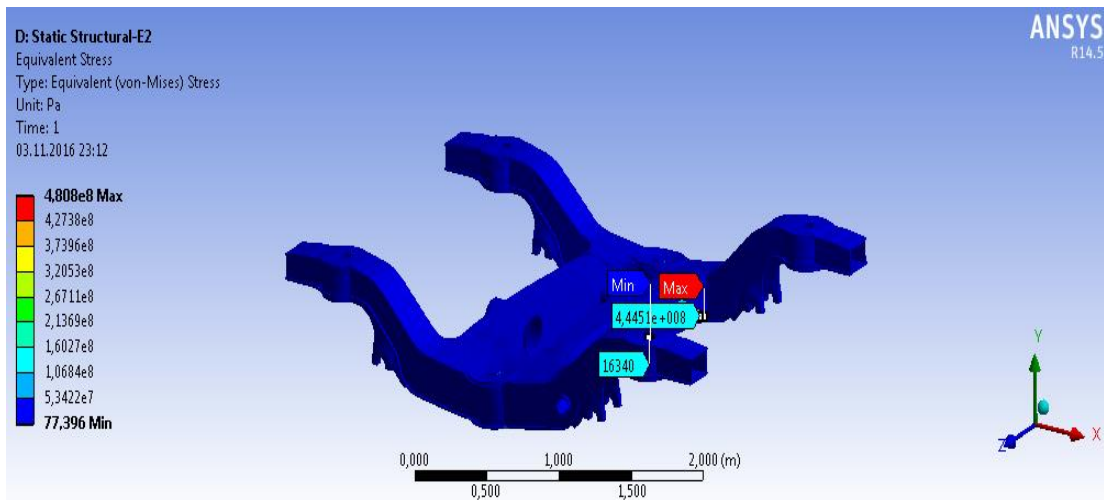
İ1 için maksimum gerilme ise Resim 4.19’da görüldüğü gibi 40.2 MPa olarak ölçülmüştür. 40.2 MPa değeri, boji şasisi kolunun uç kısmında, maksimum gerilmenin meydana geldiği noktada dahi, akma değeri olan 325 MPa aşılmadığı için malzemede meydana gelen gerilmenin güvenli sınırlar içinde olduğunu ispat etmektedir.



Resim 4.19. İ1 - maksimum Von-Mises gerilmesi[Pa] - boji şasisi kol ucu

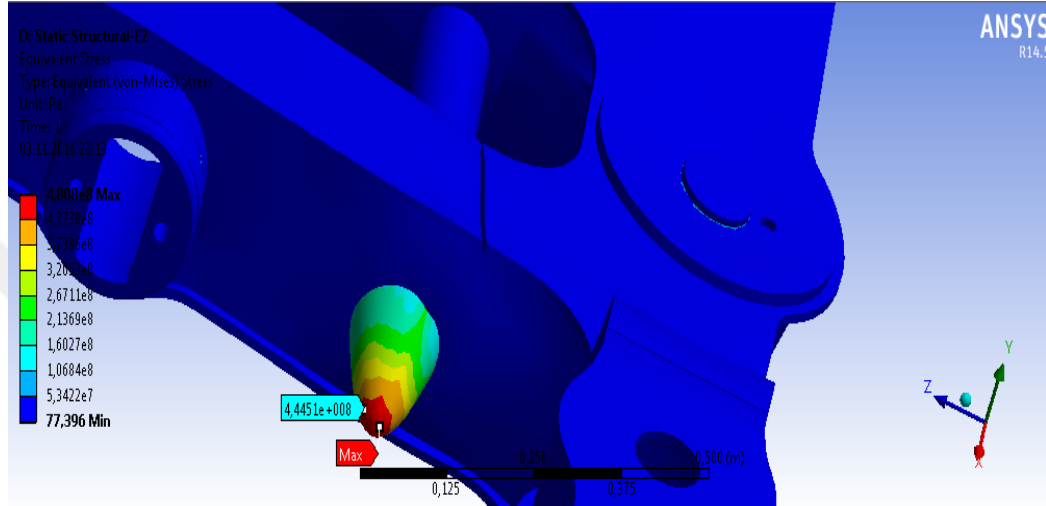
4.2.2. İstisnai yükler 2 (İ2) : maksimum dikey yük + maksimum boyuna yük + burulma

İ2 için boji şasisine maksimum yanal yük, maksimum boyuna yük ve burulma yükleri uygulanması sonucunda boji şasininin genel görünümü Resim 4.20’de gösterilmiştir.



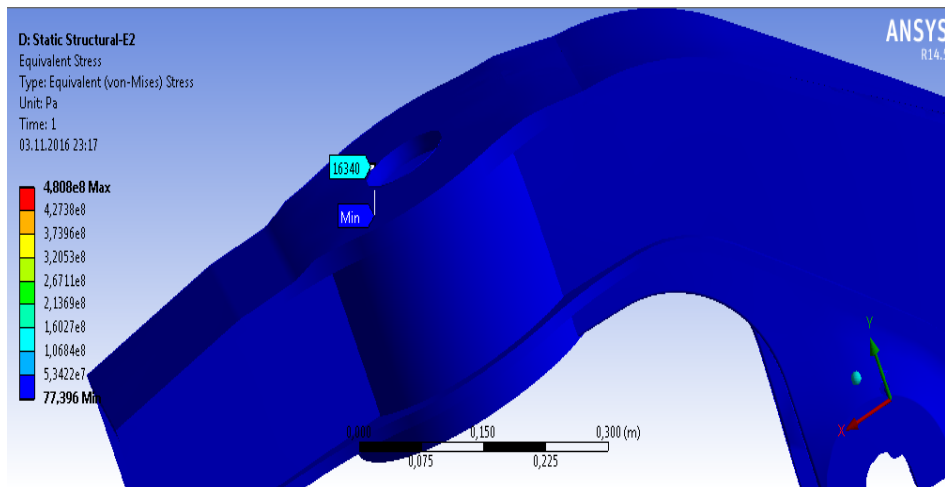
Resim 4.20. İ2 - Von-Mises gerilmesi[Pa]- üstten genel görünüm

İ2 için maksimum Von-Mises gerilmesi Resim 4.21’de gösterildiği gibi boji şasisi destek barında ortaya çıkmış ve 444 MPa olarak ölçülmüştür. Malzeme akma değeri 325 MPa olduğu için, şasinin destek barında oluşan gerilmenin güvenli sınırları aştığı, dolayısıyla destek barı tasarımında iyileştirme yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Resim 4.21. İ2 – maksimum Von-Mises gerilmesi[Pa] – şasi destek barı

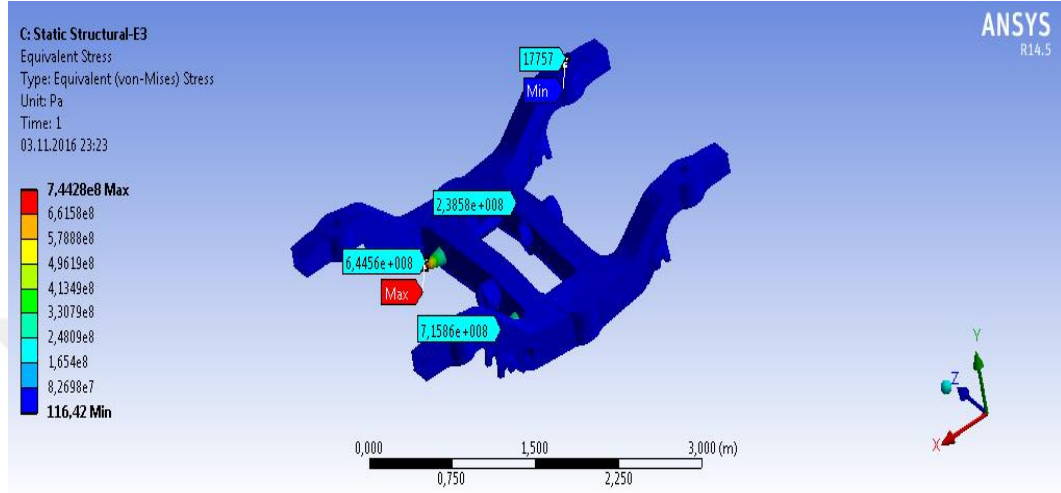
İ2 için minimum gerilme ise İ1’deki gibi birincil süspansiyon bağlantı noktasında ortaya çıkmış ve Resim 4.22’de gösterildiği gibi 16.34 kPa olarak ölçülmüştür. 16.34 kPa değeri, malzemenin dayanabileceği maksimum değer olan 325 MPa’nın oldukça altındadır ve dolayısıyla tasarım bu şartlar altında güvenli sınırlar içerisindedir.



Resim 4.22. İ2 – minimum Von-Mises gerilmesi[Pa] – birincil süspansiyon bağlantı noktası

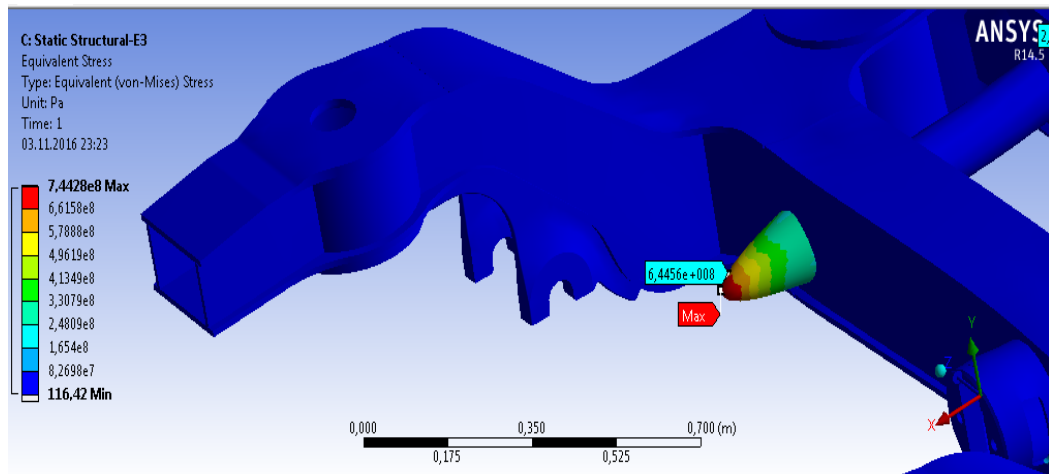
4.2.3. İstisnai yükler 3 (İ3) : maksimum dikey yük + ivmelenme etkisi

İ3 için boji şasisine maksimum yanal yük ve ivmelenme etkisi uygulanmış, bojide ortaya çıkan gerilmeler Resim 4.23’de genel olarak gösterilmiştir.



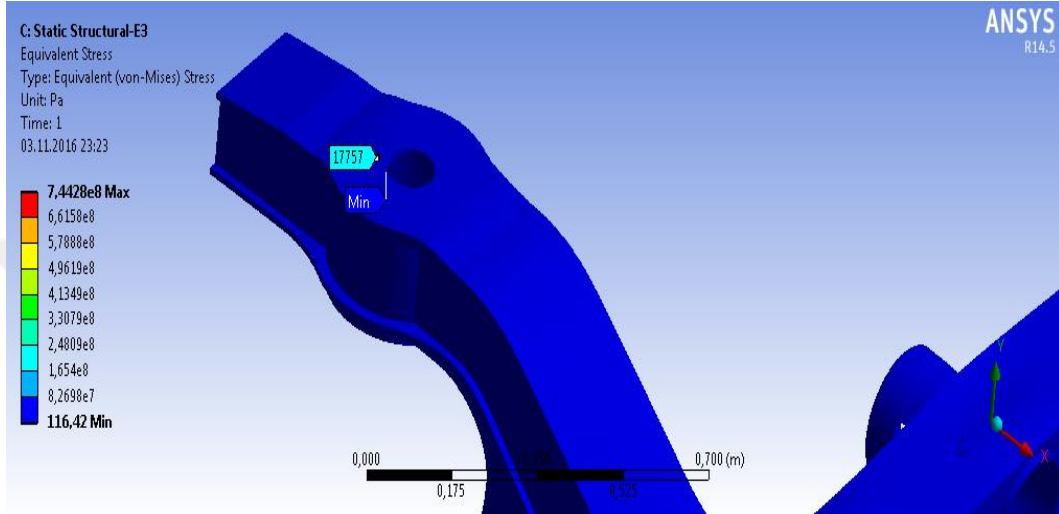
Resim 4.23. İ3 -Von-Mises gerilmesi [Pa]- boji şasisi genel görünüm

İ3 için boji şasisinde meydana gelen maksimum Von-Mises gerilmesi İ2’deki gibi boji destek barında oluşmuş ve Resim 4.24’de gösterildiği gibi 744 MPa olarak ölçülmüştür. İ2 durumundaki gibi İ3 durumunda da destek barında oluşan maksimum gerilme değeri malzemenin akma sınırı olan 325 MPa’nın üzerindedir. İ3 durumu da İ2 durumu gibi, destek barının tasarımının iyileştirilmesini gerektiğini ispatlamaktadır.



Resim 4.24. İ3 - maksimum Von-Mises gerilmesi [Pa]- destek barı

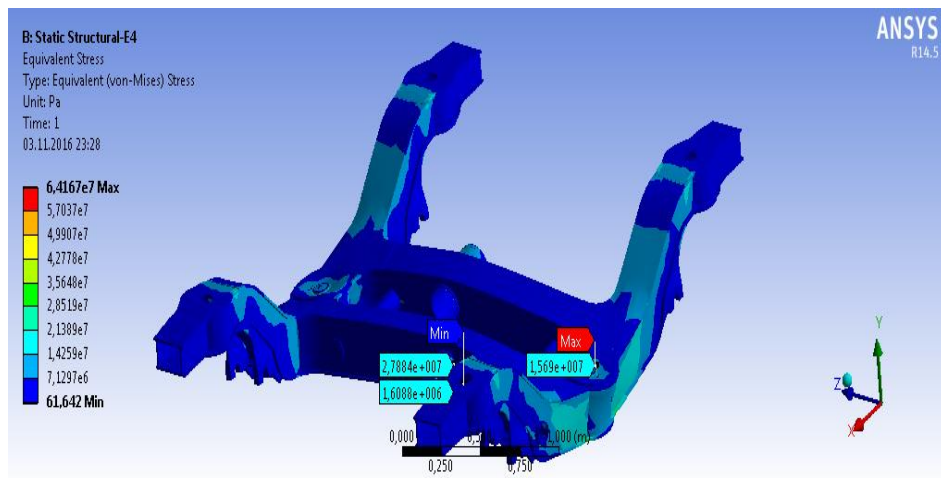
İ3 için minimum gerilme İ1 ve İ2'de olduğu gibi birincil süspansiyon bağlantı noktasında meydana gelmiş ve Resim 4.25'de gösterildiği gibi 17.75 kPa olarak ölçülmüştür. Birincil süspansiyon bağlantı noktasında oluşan gerilme değeri güvenli sınırlar içerisinde. Dolayısıyla birincil süspansiyonun bağlantı noktasında tasarım iyileştirilmesi gereksinimi yoktur.



Resim 4.25. İ3 - Von-Mises gerilim [Pa] - birincil süspansiyon bağlantı noktası

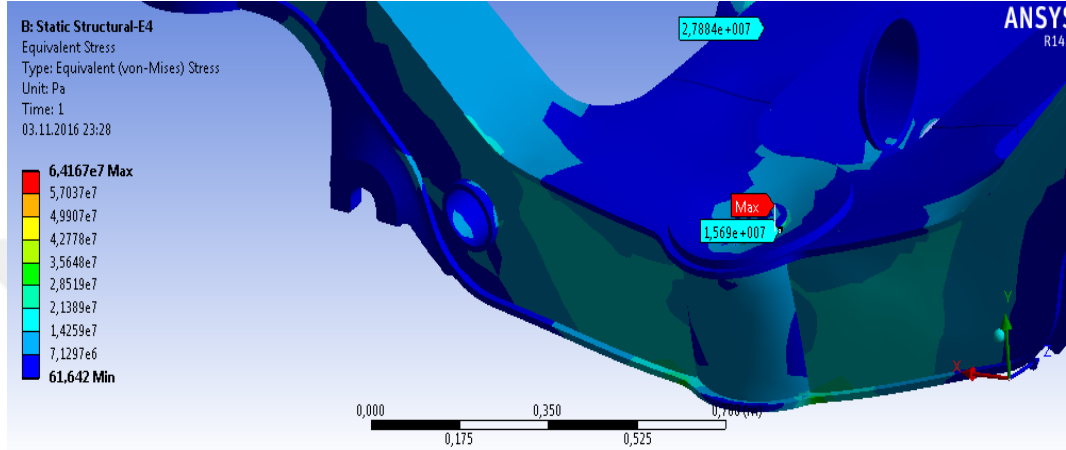
4.2.4. İstisnai yükler 4 (İ4) : boş vagon kütlesi + düşük hız derayman etkisi

İ4 için maksimum dikey yük olarak boş vagon kütlesi ve düşük hız deraymanından kaynaklı etki boji şasisi üzerine uygulanmış ve Resim 4.26'daki sonuçlar elde edilmiştir.



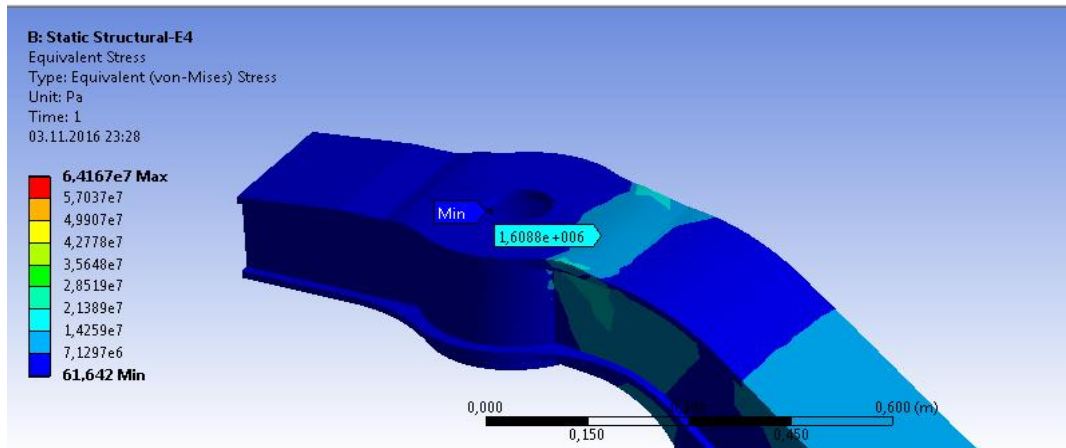
Resim 4.26. İ4 -Von-Mises gerilmesi[Pa] - üstten genel görünüş

İ4 için boji şasisinde meydana gelen maksimum Von-Mises gerilmesi ikincil süspansiyon bağlantı noktasında gözlemlenmiş ve Resim 4.27’de gösterildiği gibi 15 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durumda, ikincil süspansiyon bağlantı noktasında meydana gelen gerilme değeri, şasi malzemesinin akma değerinin altındadır ve güvenlidir.



Resim 4.27. İ4 -Von-Mises gerilmesi[Pa] – ikincil süspansiyon bağlantı noktası

İ4 için boji şasisinde meydana gelen minimum gerilme noktası değişmemiş, diğer yük uygulamalarında olduğu gibi birincil süspansiyon bağlantı noktasında meydana gelmiştir. Resim 4.28’de gösterildiği gibi 1,6 MPa ölçülmüştür.



Resim 4.28. İ4 - minimum Von-Mises gerilmesi[Pa] - birincil süspansiyon bağlantı noktası

4.3. Sonuçların İncelenmesi

Çalışmada EN13749:2011 Uluslararası Raylı Sistemler Standardında bulunan değerler dikkate alınarak gerçekleştirilen 4 farklı durum için malzemeye uygulanan kuvvetler Çizelge 4.1’de ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Boji şasisi üzerinde gerçekleştirilen yüklemeler

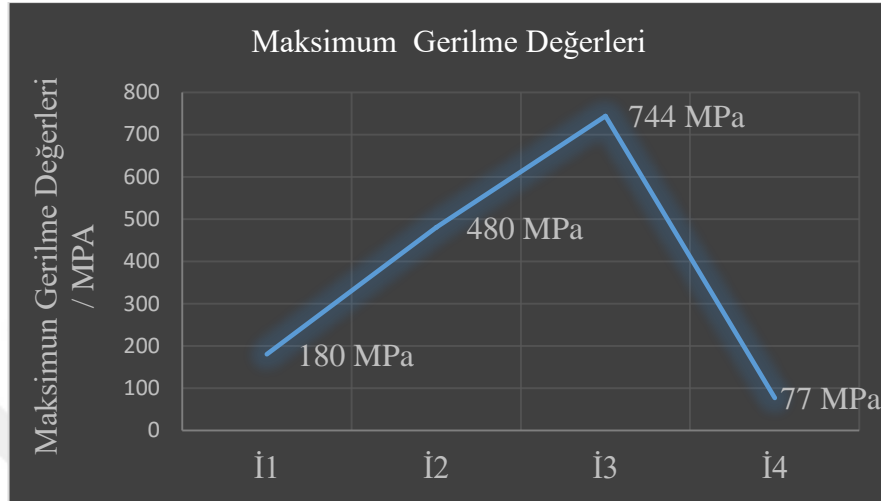
	Maks. Dikey Kuvvet	Maks. Yanal Kuvvet	Maks. Boyuna Kuvvet	Maks. İvme Etkisi	Burulma
	F_{zmaks}	F_{ymaks}	F_{xmaks}	F_{xsmaks}	S_z
İ1	181 kN x2	68.9 kN x2	-	-	25 mm
İ2	181 kN x2	-	45.7 kN x4	-	25 mm
İ3	181 kN x2	-	-	70,6 kN x4	-
İ4	94 kN x2	-	-	-	-

Şekil 4.1 ’de görüldüğü gibi X koordinatında 1, 2, 3 ve 4 ile gösterilen İ1, İ2, İ3 ve İ4 yüklemeler ve sınır şartları için oluşan maksimum gerilme değerleri İ1 için 180 Mpa, İ2 için 480 MPa, İ3 için 744 MPa ve İ4 için 77 MPa olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.2. Boji şasisi üzerinde gerçekleştirilen istisnai yüklemeler

Açıklama	Simge	Yükler
İstisnai Yükler 1	İ1	$F_{zmaks} + F_{ymaks} + S_z$
İstisnai Yükler 2	İ2	$F_{zmaks} + F_{xmaks} + S_z$
İstisnai Yükler 3	İ3	$F_{zmaks} + F_{xsmaks}$
İstisnai Yükler 4	İ4	$F_{zmaks} + \text{Derayman Etkisi (bir tekere yük binmediği kabul edilir.)}$

Kullanılan boji şasisi malzemesinin akma sınırı 325 MPa olarak belirlendiği için İ2 ve İ3 durumlarında malzemenin akma sınırı aşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.1. 4 farklı yükleme durumu için oluşan maksimum gerilme değerleri

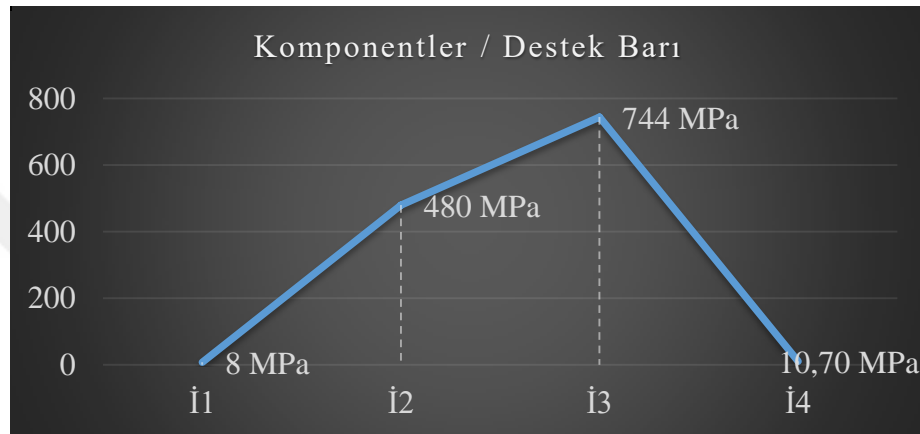
Boji şasisinde meydana gelen bu gerilmelerin, konstrüksiyondaki kritik komponentlere göre dağılımı Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Boji şasisinin kritik komponentlerinde meydana gelen maksimum gerilmeler

Sınır Şartları	Komponentler			
	Destek Barı (MPa)	Destek Plakası (MPa)	Bağlantı Sportu (MPa)	Merkezi Dikey Plaka (MPa)
İ1	8	10	72	26
İ2	480	10	92	61
İ3	744	5	34	98
İ4	10,7	10	49	13

Kritik komponentlerden destek barı ismi verilen kısımda meydana gelen maksimum gerilmeler Şekil 4.2'de gösterilmiştir. İ1 durumuna göre, boji şasisinde meydana gelen gerilmeler; maksimum dikey kuvvet, maksimum yanal kuvvet ve burulma etkisi altında destek barı, destek plakası, bağlantı sportu ve merkezi dikey plaka olarak adlandırılan kritik komponentlerde güvenli sınırlar içerisinde kalmıştır.

İ2 durumu olarak adlandırdığımız, maksimum dikey kuvvet, maksimum boyuna kuvvet ve burulma etkisi yüklemelerinin yapıldığı test durumunda ise boji şasisindeki destek barı ismi verilen kritik komponentteki gerilme değeri malzemenin akma değerinin üzerine çıkmıştır. Bu durum bilhassa maksimum boyuna kuvvetin destek barında fazladan bir gerilme meydana getirdiği, destek barı tasarımında bu maksimum boyuna kuvvetin dikkate alınarak iyileştirme yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

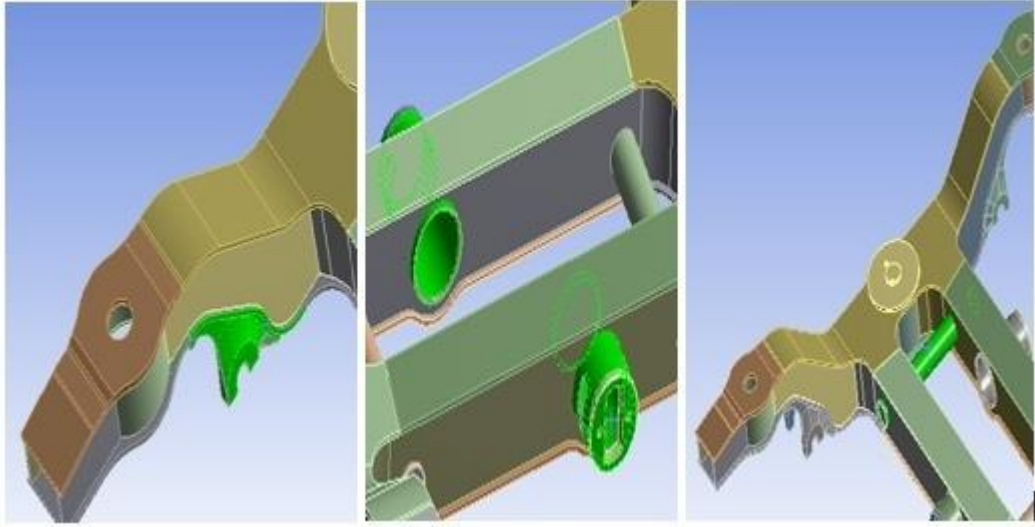


Şekil 4.2. Destek barında meydana gelen maksimum gerilmeler

Şekil 4.2 incelendiğinde İ1 ve İ4 durumları için gerilim değerlerinin malzemenin akma sınırının oldukça altında olduğu, ancak İ2 ve İ3 durumları için malzemenin akma değeri olan 325 MPa'nın aşıldığı görülmektedir.

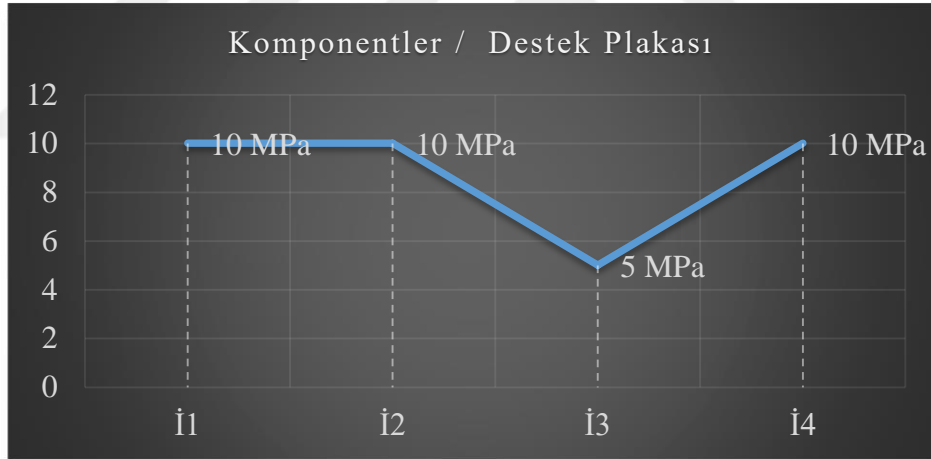
İ1 ile İ2 durumları karşılaştırıldığında İ2 adı verilen test şartlarının İ1 durumundan tek farkının maksimum boyuna kuvvet olduğu, böylece destek barında meydana gelen 480 MPa'lık gerilme değerinin maksimum boyuna kuvvetin etkisinden kaynaklandığı söylenebilir.

İ3 durumuyla İ1 durumu karşılaştırıldığında, İ1 durumunda yer almayan ivmelenme kuvvetinin İ3 durumunda hesaba katıldığı, böylece destek barında meydana gelen 744 MPa'lık gerilim değerinin ivmelenme kuvvetinden kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır.



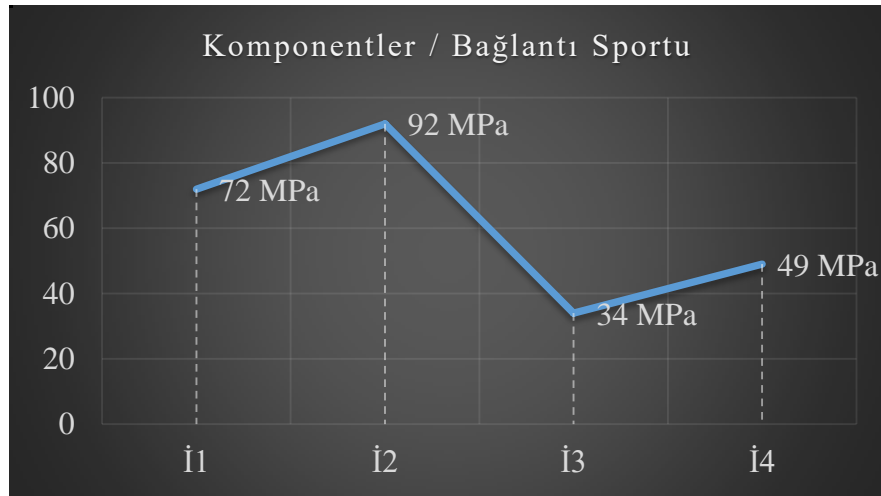
Resim 4.29. a) Destek plakası b) Bağlantı sportu c) Destek barı

Diğer bir kritik komponent olan destek plakasındaki gerilme değerleri Şekil 4.3'de gösterildiği gibi malzemenin özelliğine göre oldukça güvenli seviyededir.



Şekil 4.3. Destek plakasında meydana gelen maksimum gerilmeler

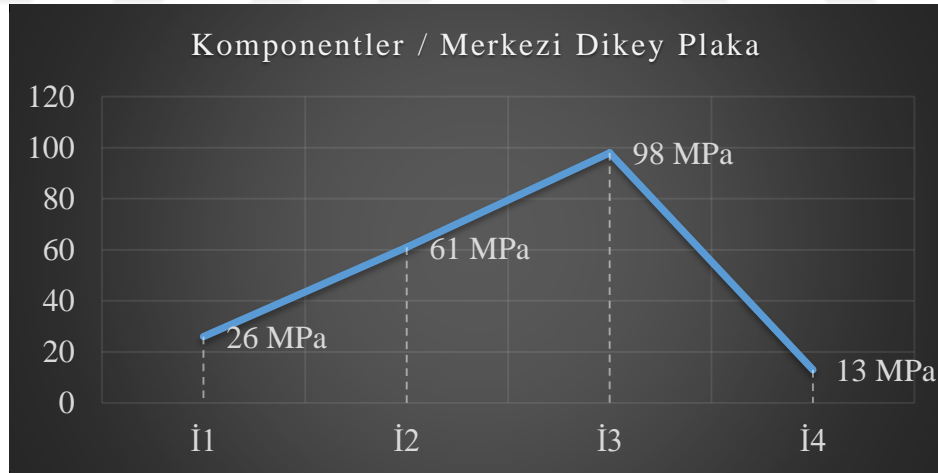
Fren sisteminin bağlandığı Bağlantı sportu adı verilen komponentte meydana gelen gerilmeler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bağlantı sportunda meydana gelen maksimum gerilmeler

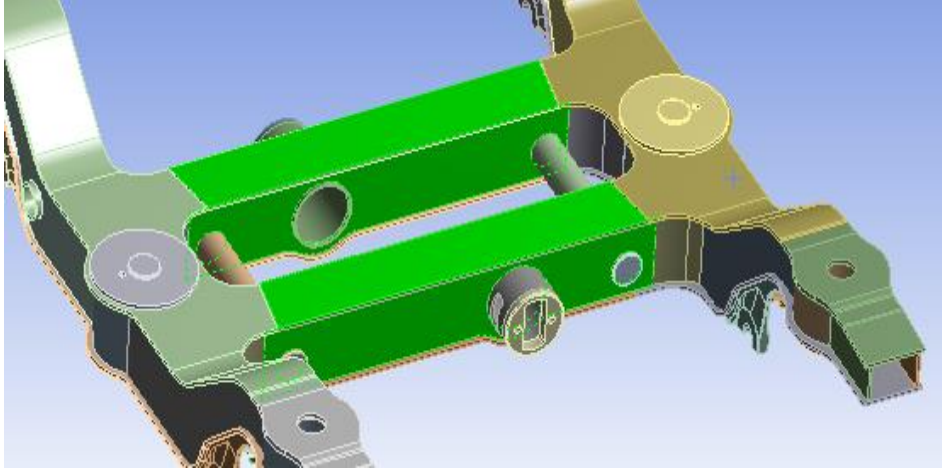
Değerler incelendiğinde, komponentte meydana gelen gerilmenin İ2 durumunda ortaya çıktığı, ancak tüm durumlarda malzemenin akma sınırını aşmadığı görülmektedir.

Bojinin diğer bir kritik komponenti olan merkezi dikey plakada meydana gelen gerilmeler Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Merkezi dikey plakada meydana gelen maksimum gerilmeler

Maksimum gerilme değerinin İ3 durumunda ortaya çıktığı, minimum gerilmenin İ4 durumunda gerçekleştiği, ancak tüm durumlar için gerilme değerlerinin güvenli sınırlar içinde kaldığı görülmektedir.



Resim 4.30. Merkezi Dikey Plaka

Sonuç olarak, EN13749:2011 Boji Şasisi Yapısal Özellikleri Standardında bulunan değerler dikkate alınarak gerçekleştirilen İ1, İ2, İ3 ve İ4 adı verilen yükleme ve sınır şartları içerisinde boji şasisinde meydana gelen gerilmeler malzemenin akma sınırı altındadır.

Yalnızca destek barı adı verilen komponentte İ2 ve İ3 durumları için maksimum gerilme değerleri noktasal olarak malzemenin akma sınırının üstünde yer almıştır. Özellikle maksimum boyuna kuvvet ve ivmelenme kuvvetlerinin şiddetleri ve doğrultuları hesaba katılarak boji şasisi tasarımında destek barı komponentinde gerçekleştirilecek dizayn iyileştirmesinin ardından boji şasisinin standartlara uygun olarak imal edilmesi mümkündür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Milli Tren Projesinde kullanılmak üzere tasarım aşaması devam eden örnek bir EMU boji şasisine belirli şartlar altında bilgisayar ortamında statik testler uygulanmıştır. Testler EN13749:2011 Boji Şasisi Standardına göre yapılmıştır. Bu standartlarda kabul edilebilir şartlar altındaki yüklemelerin tanımları, testlerin uygulanma şartları, uygulanan testlerden elde edilen sonuçlar ve bu test sonuçlarıyla ilgili değerlendirmeler ve alınması gereken önlemler yer almaktadır.

Bir bojinin tasarımı yapılırken hareket organlarından gelebilecek en ağır statik şartlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bojinin kendisinden beklenen görevi tam olarak yerine getirebilmesi; konfor şartlarını sağlaması, yüksek hızlara karşı denge şartlarını sağlaması ve bakım gereksinimlerinin az olması ile mümkün olmaktadır.

Yapılan çalışmada, ilk olarak TCDD bünyesinde Türkiye şartlarında bölgesel ulaşım amaçlı olarak kullanımında olan bir EMU bojisinin komponentleri anlatılmıştır. Daha sonra Milli Tren Projesinde kullanılmak üzere bilgisayar destekli tasarım aşamasında olup henüz imalatına başlanmamış olan bir boji şasisi tespit edilmiştir. Catia® programında tasarlanan boji şasisi Ansys Workbench 14.5 programında mesh işlemine tabi tutulmaya çalışılmış, meydana gelen mesh problemleri nedeniyle sırasıyla Solidworks® ve Inventor® programları kullanılarak bojinin tasarımında bilhassa boji şasi kollarında değişimler gerçekleştirilmiştir.

Proje yürütücülerinin almış olduğu karar gereği S355J2 adı verilen 325 MPa akma gerilmesine sahip olan yapı çeliği kullanarak üretilmesi planlanmaktadır. Bu sebeple mesh işlemine uygun hale getirilen boji şasisinin 3 boyutlu tasarımı Ansys Workbench 14.5 programına aktarıldıktan sonra malzeme ataması olarak S355J2 seçimi gerçekleştirilmiştir.

Tasarım aşamasında olan bojinin üretime uygun olup olmadığının tespiti için dünyadaki tüm raylı sistem üreticilerinin kullanmakta olduğu EN 13749:2011 standardı değerlendirilmeye alınmıştır. Bu standart kapsamında boji şasisinde, normal durumlar haricinde meydana gelebilecek ve boji şasisini maksimum gerilmeye maruz bırakacak olan “istisnai” durumlar gözönüne alınır. Çalışmada İ1,

İ2, İ3 ve İ4 olarak adlandırılan bu durumların amacı boji şasisinin normal şartlar dışındaki durumlarda akma dayanımını aşacağı durumları tespit etmektir. Nitekim çalışma amacına ulaşmış, İ1 ve İ4 durumlarında boji şasisinde meydana gelen tüm gerilmeler güvenli sınırlar içerisinde oluşurken; İ2 ve İ3 durumlarında boji şasisi destek barı olarak adlandırılan komponentte meydana gelen noktasal gerilmelerin güvenli sınırı aştığı tespit edilmiştir.

Daha net bir ifadeyle, boji tasarımının ulaştığı maksimum gerilme değeri maksimum dikey kuvvet, maksimum yanal kuvvet ve burulma durumlarının bir kombinasyonu olan İstisnai Durum 1' de (İ1) akma sınırının altındadır. Yalnızca boş vagon kütlelerinin maksimum dikey kuvvet olarak etki ettiği İstisnai Durum 4'te de (İ4) boji tasarımı standartlara uygun sonuçlar vermiştir. Ancak maksimum boyuna kuvvetin etki ettiği İstisnai Durum 4'te (İ2) ve amortisörlerin akışkanlarının ivmelenme etkisinden kaynaklanan yükün hesaba katıldığı (İ3) durumlarında boji tasarımı noktasal olarak, standartlarda yer alan maksimum gerilme sınırının üzerinde gerilim değerlerine ulaşmıştır.

Yapılan statik hesaplamalar sonucunda oluşan gerilmeler genel olarak akma sınırlarının altında güvenli olarak adlandırılan sınırlarda kalırken, boji şasisi destek barında tasarım iyileştirmesine ihtiyaç vardır. Destek barı dışında örnek olarak tasarlanan EMU boji şasisinin EN 13749:2011 standardına göre uygun olduğu görülmektedir. Yapılan bu testlerin ileride kurulacak bir test standında deneysel olarak uygulanması da yapılan çalışmayı destekleyebilir.

KAYNAKLAR

- Atalay, A.E., " E43000 Lokomotifinin Dinamik Modelinin Oluşturulması Ve Titreşim Kontrolü", YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lİsans Tezi, 2007.
- Bayraktar, M., 2010. Raylı Taşıtların Dingillerinin Dinamik Analizi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Bilgin, E., 2015. Y32 Bojisinin Farklı Vagon Ağırlıklarına Adaptasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Blue Engineering, 2015. Bogie frame and Bolster Analysis, Türkiye, 42 s.
- Claus, H., Schiehlen, W., 1997. Modeling and simulation of railway bogie structural vibrations, Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 1-15.
- Çak, R., 2002. Yolcu Vagonu Transport Sistemlerinin Bilgisayar Teknolojisi ile Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çakır, K.Güney, B.Dağsöz, A.,1994. Raylı Taşımacılıkta Konfor, Mühendis ve Makine, Sayı 408, 23-34,
- Esen, İ., Mızrak, C., 2011. Y32 boji gövdesinin statik ve dinamik yükleme analizleri. Technology, 14(4), 123-128.
- Ferguson, N. S., 2000. Modelling the vibrational characteristics and radiated sound power for a y25-type bogie and wagon, Journal of Sound and Vibration, 231, 791-803.
- Figes, <http://www.figes.com.tr/ansys/ansys-nedir.php>
- Fraczeks, J., 2001. Modeling and dynamical analysis of flexible vehicle using fem and ms approach, 16th European ADAMS User Conference.
- Hyundai Rotem Company, 2015. EMU Project Operation Manuel, Kore, 21 s.
- Jong, D.D., 2002. Running dynamics of long passenger trains in push / pull Operation, The 1st MSC.ADAMS European User Conference London.

- Karayel, D., Erel, g., 1997. Raylı taşıtlarda süspansiyon sistemlerinin performans analizi, 2. Ulusal Demiryolu Kongresi, 399-411.
- Kırışik, R., 2002. Demiryolu Vagonunun Titreşim Modeli ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kibar, H., Öztürk, T., 2012. ANSYS Sonlu Eleman Yazılımının Tarımdaki Uygulamaları, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Der, 65-74.
- Kim, J., S., Yoon, H., J., 2011. Structural behaviours of a GFRP Composite Bogie Frame for urban subway trains under critical load conditions. Engineering Procedia, 10, 2375-2380.
- Kim, J.S., 2006. Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: analysis and static tests, Journal of Engineering Failure Analysis, 13, 1326-1337.
- Meseli, 2010. Lineer Statik Analiz, www.ilkeymeseli.com/2010/12/lineer-statik-analiz
- Metin, M., 2007. Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Molatefi, H., Hecht, M., Kadivar, M. H., 2007. Effect of suspension system in the lateral stability of railway freight trucks, Journal of Rail and Rapid Transit, 221, 399-407.
- Oyan, C., 1998. Structural strength analysis of the bogie frame in Taipei rapid transit systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Proquest Science Journals, 222, 253-262.
- Özsoy, M., İ., 2008. Y32 Bojisinin Bilgisayar Destekli Statik ve Dinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Park, B.H., Lee, K.Y., 2006. Bogie frame design in consideration of fatigue strength and weight reduction, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 220- 201,

- Roman, J. L., Caldas, C. A., Quesada, A., , 2005. Structural validation of railway bogies and wagons using finite elements tools, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Rail and Rapid Transit, 219, 139-150.
- Sabırlı, S., 2012. Bir Raylı Taşıt Bogisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yorulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sebesan, I., Zakaria, Y., 2014. Analyzing the static behavior of a bogie frame by comparing two methods of simulations. Applied Mechanics and Materials.
- Şenalp, A., Z., Bezer, Y., İ., 2006. Treyler şasisinin bilgisayar destekli tasarımı ve sonlu elemanlar metodu ile yapısal analizi. TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, 26-28 Nisan
- TCDD, 2015. EMU Projesi Eğitim Kitabı, Türkiye, 87 s.
- TSE, 2015. TS EN 13749 Boji Şasilerinin Yapısal Şartlarını Belirleme Metotları, Ankara, 46 s.
- Wu, H., Yue, C.S., 2016. The strength analysis of non-power bogie frame for the passenger high-speed train. Advances in Engineering Materials and Applied Mechanics, 7.
- Zehsaz, M., Tahami, F.,V., Asl, A., Z., Ahmadian, F., 2010. Effect of increasing speed on stress of biaxial bogie frames. Scientific Research, 3, 276-284.
- Zhao, Y., Wang, Y., Song, Y., 2014. Study on static strength test and simulation for high-speed EMU motor bogie. Southwest Jiotong University.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : UYGUN,Recep
 Uyuđu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.04.1987 - Kartal
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (506) 263 71 93
 e-mail : ruygun@tuvasas.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lise	Pendik Y.D.A Lisesi	2005
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2010
Önlisans	Anadolu Üniversitesi / Dış Ticaret	2012
Lisans	Anadolu Üniversitesi / Uluslararası İlişkiler Bölümü	2017

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2011	AKPLAS (4 ay)	Makine Mühendisi
2012-2014	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014-Halen	TÜVASAŞ	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce