

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM SÜSPANSİYON BRAKETİNİN SONLU ELEMANLAR
METODU İLE ANALİZİ VE ÖMÜR TAHMİNİ**

Volkan NALÇACIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR

Ocak, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM SÜSPANSİYON BRAKETİNİN SONLU ELEMANLAR
METODU İLE ANALİZİ VE ÖMÜR TAHMİNİ**

Volkan NALÇACIOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 27.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan DEMİR, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aykut KENTLİ, Üye

Marmara Üniversitesi

Aileme

ve

eşime,

TEŞEKKÜR

Bu tezin yazılma sürecinde destekleri ve yardımseverliği için danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR'a çok teşekkür ederim.

Bu süreçteki tüm fedakarlığı için sevgili eşim Tuğçe NALÇACIOĞLU'na, hayatımın her alanında desteklerini esirgemedikleri için sevgili Anneme ve Babama teşekkürlerimi sunuyorum.

Ford Otosan'daki çalışma arkadaşlarım Mustafa BAŞARAN ve Emre KOZ'a bana tezim kapsamında tüm yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca Yıldız Teknik Üniversitesi Lisans öğrenimim sırasında tanıştığım en iyi dostlarım Ahmet Berkay UYSAL ve Efe Levent OYMAN'a bana tüm destekleri için teşekkür ederim.

Volkan NALÇACIOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	ixi
ÖZET	xii
ABSTRACT	13
1 GİRİŞ	14
1.1 LİTERATÜR ÖZETİ.....	14
1.1.1 Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı	16
1.1.2 Alüminyum Alaşımların Isıl işlemle Ömrünün Artırılması.....	17
1.1.3 Alüminyum Alaşımları ile Yapılan Ağırlık Azaltma Çalışmaları	19
1.2 Tezin Amacı.....	21
1.3 Hipotez.....	21
2 ALÜMİNYUM DÖKÜMÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	22
2.1 Süspansiyon Braketinin Alüminyum Dökümle Üretimi	25
2.1.1 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi	25
2.1.2 Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi.....	27
2.1.3 Kokil Döküm Yöntemi.....	28
2.1.4 Süspansiyon Braketi Seçilen Üretim Yöntemi ve Tasarımı	29
2.2 Alüminyum Dökümün Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	32
2.2.1 Alüminyum Döküm Malzemenin Çekme Testi	32
2.2.2 Malzeme Yorulma Eğrilerinin Çıkarılması.....	35
3 BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZLER	43
3.1 Sonlu Elemanlar Yorulma Modelinin Oluşturulması.....	43
3.1.1 Yük ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi	46

3.1.2 Doğrulama Parkuru Verilerinin Modele Uygulanması	47
3.2 Yorulma Tahmini.....	48
3.2.1 Uygulanan Yorulma Teorisi ve Metodu.....	49
3.2.2 Süspansiyon Braketinin Yorulma Ömrü Tahmini	54
3.2.3 Yorulma Analizinde Kullanılan Çevrimsel Gerilme Gerinim Eğrileri.	58
3.3 Sonlu Elemanlar Titreşim ve Rijitlik Modelinin Oluşturulması	59
3.3.1 Şasi Titreşim Analizi.....	59
3.3.2 Şasi Rijitlik Analizi	62
4 TASARIM DOĞRULAMA TESTLERİ	66
4.1 Süspansiyon Braketi Tasarımının Rig Testi ile Doğrulanması	66
4.1.1 Rig Testi Kurulumu.....	67
4.1.2 Rig Testi Sonuçları ve Yapılan Çıkarım	68
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKÇA	71
EK – A SONLU ELEMANLAR MODELİ	74
EK – B NCODE DESIGNLIFE KONFİGÜRASYONLARI	77
EK – C MESH YAPISI DETAY GÖSTERİMİ	79
ÖZGEÇMİŞ	80
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	81

SİMGE LİSTESİ

σ_f'	<i>Yorulma Mukavemet Katsayısı</i>
ε_f	<i>Sünek Yorulma Katsayısı</i>
b	<i>Yorulma Dayanımı Üssü</i>
K	<i>Döngüsel Mukavemet Katsayısı</i>
n	<i>Döngüsel Gerinim Katsayısı</i>
c	<i>Yorulma Süneklik Üssü</i>
E	<i>Elastik modülü</i>
σ_a	<i>Gerçek Gerilme Genliği</i>
K'	<i>Yorulma döngüsü katsayısı</i>
n'	<i>Yorulma döngüsü sertleştirme tabanı</i>
F	<i>Kuvvet</i>
M	<i>Ağırlık</i>
k	<i>Yay sabiti</i>
x	<i>Uzaklık</i>
$\ddot{x}$	<i>İvme</i>
$\dot{\varepsilon}$	$4 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{s}\right)$
f	<i>frekans (Hz)</i>
ε	<i>Gerinim</i>
$\Delta\varepsilon_e$	<i>Elastik gerinim</i>
N_f	<i>Kırılma çevrim sayısı</i>
$\Delta\varepsilon_p$	<i>Plastik Gerinim</i>

KISALTMA LİSTESİ

GPa	Giga pascal
MPa	Mega pascal
kPa	Kilo pascal
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
km	Kilometre
N	Newton
kN	Kilo newton
g	Yer çekimi
Cu	Bakır
Mg	Magnezyum
Si	Silisyum
C	Karbon
Al	Alüminyum
Zn	Çinko
Cu	Bakır
Mn	Mangan
NVH	Gürültü titreşim sertlik
AB	Avrupa Birliği
BMW	Bayerische motoren werke

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Alüminyum hafifletme çalışmalarının otomobil sistemlerine kırılımı [11].....	17
Şekil 1.2	Solvüs eğrili faz diyagramı [12].....	18
Şekil 1.3	Yaşlandırma süresinin sertliğe etkisi.....	19
Şekil 2.1	Alüminyum döküm prosesi.....	23
Şekil 2.2	Alüminyum dövme ve çelik kirişlerin S-N eğrileri	24
Şekil 2.3	Alçak Basınçlı Döküm [6].....	25
Şekil 2.4	Alçak Basınçlı Döküm Örneği – Salıncak Kolu [28]	26
Şekil 2.5	Alçak Basınçlı Döküm Örneği – Akson [7]	27
Şekil 2.6	Yüksek Basınçlı Döküm	28
Şekil 2.7	Kokil Döküm [29]	29
Şekil 2.8	Parçanın Çelik Kalıpta Yerleşim şeması.....	31
Şekil 2.9	Çekme Testi Numune Ölçüleri.....	33
Şekil 2.10	Test Numune Bölgeleri	33
Şekil 2.11	Test Numeneleri.....	34
Şekil 2.12	Gerilme – Birim Şekil değiştirme Eğrisi.....	34
Şekil 2.13	ϵ -N Eğrisi Örneği [32].....	36
Şekil 2.14	Yorulma Numune Geometrisi	36
Şekil 2.15	Yorulma Test Makinesi	37
Şekil 2.16	Yorulma Testi Sonucu Kırılan Numuneler.....	38
Şekil 2.17	Gerinim – Çevrim Sayısı Eğrileri	39
Şekil 2.18	Gerilme Genliği – Çevrim	41
Şekil 2.19	Gerilme Genliği – Gerinim Değişimi Genliği.....	41
Şekil 2.20	ϵ -N Eğrisinin Katsayılarla Gösterimi.....	42
Şekil 3.1	Süspansiyon Braketi Sonlu Elemanlar Modeli.....	43
Şekil 3.2	Süspansiyon Braketinin Makas Bağlantı Bölgesi.....	44
Şekil 3.3	Sonlu Elemanlar Model Detayları	44
Şekil 3.4	Çelik ve Alüminyum Karşılaştırılması için Gerilme - Ömür Eğrisi [3].....	48
Şekil 3.5	Asal Gerilmeler ve Asal Açılar	50
Şekil 3.6	Yorulma Hesabı Metodu	51
Şekil 3.7	Dökme Demir Tasarımdan Alüminyum Tasarıma Geçiş	54

Şekil 3.8 Dökme Demir ve Alüminyum Dizayn Karşılaştırmalı Analiz Sonuçları	55
Şekil 3.9 Yorulma Analizi Sonucunda İyileştirme Alanları Soldan Görünüş	55
Şekil 3.10 Yorulma Analizi Sonucunda İyileştirme Alanları Sağdan Görünüş	56
Şekil 3.11 İyileştirme Sonrası Karşılaştırmalı Analizler.....	56
Şekil 3.12 Nihai Dökme Demir ve Alüminyum Tasarımlar	57
Şekil 3.13 Dökme Demir Malzeme Eğrisi	58
Şekil 3.14 Alüminyum Malzeme Eğrisi	59
Şekil 3.15 Modal ve Rijitlik Analizlerinde Kullanılan Geometri.....	60
Şekil 3.16 Burulma Modu.....	61
Şekil 3.17 Yatay Eğilme Modu.....	61
Şekil 3.18 Dikey Eğilme Modu	61
Şekil 3.19 Dikey Eğilme Rijitliği Analizi.....	63
Şekil 3.20 Burulma Rijitliği Analizi.....	63
Şekil 4.1 Rig Testi CAE Modeli.....	65
Şekil 4.2 Rig Testinde kullanılacak Geometri ve Eksen Takımı.....	66
Şekil 4.3 Rig Testi Görselleri.....	67

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 EN AC 43300	32
Tablo 2.2 Malzemenin Mukavemet Değerleri	35
Tablo 2.3 Gerinim- Çevrim sayısı test sonuçları.....	39
Tablo 3.1 Mesh Kriterleri.....	44
Tablo 3.2 Doğrulama Parkuru Parkurları ve Tekrar Sayıları	47
Tablo 3.3 Modal Analiz Sonuçları.....	62
Tablo 3.4 Rijitlik Analizi Sonuçları	64

ALÜMİNYUM SÜSPANSİYON BRAKETİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ VE ÖMÜR TAHMİNİ

Volkan NALÇACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR

Çalışmada, dökme demir ve çelik gibi otomotiv süspansiyon parçalarının geleneksel malzeme seçimi yerine, ağırlık hedeflerine ulaşmak ve yeni model araçların yakıt tüketimini azaltmak için alüminyum gibi hafif malzeme kullanılmıştır. Karbon emisyonunun azaltılması homologasyon gereklilikleri için yasal bir gereklilik haline geldiğinden, otomotiv endüstrisi daha hafif araçlar üretmek için geleneksel malzeme seçenekleri yerine yeni malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Fonksiyonu nedeniyle, süspansiyon parçaları ağır yük koşullarında çalışır. Tasarlanan alüminyum süspansiyon braketinin mukavemet ve yorgunluk analizleri Abaqus ve nCode yazılımları kullanılarak bilgisayar destekli mühendislik yöntemi ile yapılmıştır. Kullanıcının karşılaşılabileceği yük koşulları doğrulama parkuru ile temsil edilmiştir. Doğrulama parkurundan toplanan kuvvet girdileri sonlu elemanlar modelinde uygulanmıştır. Alüminyum süspansiyon parçasının ömür tahmini için Kümülatif Hasar Teorisi kullanılmıştır. Ömür hesaplamalarında, alüminyum parçanın ömrünün en azından geleneksel dökme demirin ömrü kadar olması gerektiği amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda ağırlık ve yakıt tasarrufu hedeflerinin azaltılabileceği ve ayrıca karbon emisyon homologasyon şartının karşılanmasında faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Birikimli hasar teorisi, alüminyum, süspansiyon, otomotiv, sonlu elemanlar metodu.

ANALYSIS AND FATIGUE LIFE PREDICTION OF ALUMINUM SUSPENSION BRACKET WITH USING FINITE ELEMENT METHOD

Volkan NALÇACIOĞLU

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Meral BAYRAKTAR

In the study, instead of the conventional material selection of automotive suspension parts such as cast iron and steel, lightweight materials such as aluminum are used in order to achieve the weight targets and reduce the fuel consumption of new model vehicles. Since the reduction of carbon emission has become a legal necessity for homologation requirements, the automotive industry needed new materials instead of conventional material choices to produce lighter vehicles. Due to its function, the suspension parts operate under heavy load conditions. The strength and fatigue analyses of the designed aluminum suspension bracket were performed by computer aided engineering method with using Abaqus and nCode. The load conditions that the user may encounter are represented by the proving ground. The force inputs collected from the proving ground were implemented in the finite element model. Cumulative Damage Theory was used for estimation life of aluminum suspension part. In the life calculations, it is aimed that the life of the aluminum part should be at least as much as the life of the conventional cast iron. In the result of study, it is concluded that reducing weight and fuel saving targets can be achieved and also the study was beneficial in meeting the carbon emission homologation requirement.

Keywords: Cumulative damage theory, aluminum, suspension, automotive, finite element method.

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda, ağırlık optimizasyonu, otomotiv endüstrisinin yakıt tüketimini ve araç emisyonlarının azaltılabilmesi için en önemli hedeflerden biri haline gelmiştir. Alüminyum alaşımları, düşük çekirdek, yüksek mukavemet, ağırlık oranı ve korozyon direnci nedeniyle otomotiv endüstrisindeki tasarımcılar tarafından giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Yorulma teorisi, tekrarlı olarak yüklere maruz kalan parçaların ömür tahminini yapabilmek adına kullanılır. Bu tez çalışmasına konu olan alüminyum döküm süspansiyon braketinin yorulma performansının, malzemenin yorulma dayanımı, geometrisi ve üretim metodu gibi faktörlerden etkilendiği bilinmektedir. Yüksek yüklere maruz kalan süspansiyon gibi sistemlerde çoğu zaman hata modu yorulma performansından kaynaklanır.

Alüminyum döküm yöntemi kullanılarak üretilen süspansiyon braketi yüksek yüklere maruz kaldığı bilindiği için yorulma performansı üzerine detaylı sonlu elemanlar ve yorulma analizleri yapılması gerekmektedir. Süspansiyon braketinin maruz kaldığı çalışma koşullarına bağlı olarak bu parçanın yorulma ömrünü tahmin edebilmek için, gerinim - ömür döngüsünü içeren malzeme kartının oluşturulması gerekir [1].

Günümüzde, numune parçasını tekrarlanan sabit yüklere maruz bırakarak test sırasında yük miktarı ve devir sayısı ölçülerek yorulma eğrileri elde edilmektedir. Test, numune parçası üzerinde çatlakların varlığı veya parça kırılmasıyla sona ermekte ve çevrim sayısı belirlenir. Bu işlemde, yük ve çevrim sayısı ile ϵ -N eğrisi belirlenmektedir.

Bazı malzemelerde belirlenen sabit yükleme değerinde, test sırasında parçanın kırılmadığı gözlenmektedir. Bu malzemelerin belirtilen yük değerindeki döngü sayısındaki artışa rağmen, herhangi bir hasar gözlenmemektedir. Bu durumda, bazı metaller için yorgunluk sınır bölgesi diye tanımlanan bir bölge olduğu ve

düşük yük koşullarında bu metallerin sonsuz ömür gibi bir davranış gösterdiği söylenebilmektedir. Yüksek çevrim bölgelerinde ϵ -N eğrisi özellikle çelik gibi malzemeler için çok düşük hasar değerlerine sahiptir ve bu düşük yük bölgelerinde malzemenin çok yüksek ömürler gösterdiği bilinmektedir [2]. Alüminyum malzemelerde, örneğin çelik malzemelerde olduğu gibi bir yorgunluk sınır bölgesi olduğu söylenemez [3]. Bununla birlikte alüminyum malzemelerin yorulma performansının arttırılabileceği çalışmalarla gösterilmiştir. Isıl işlemle lazerle eritilmiş alüminyum alaşımının yorulma performansının iyileştirilebildiği gösterilmiştir [4]. Al-Zn alaşımları, alüminyum alaşımların içerisinde en yüksek dayanıma sahip olan alaşım serisidir. Genellikle uçak parçalarında ve uydu parçaları için kullanılmaktadır [5].

Literatür araştırması ve sanayide kullanılan örnekler incelendikten sonra kullanılacak alüminyum malzemenin yorulma karakteristiği malzeme testi yapılarak ϵ -N eğrisi çıkarılmıştır. Bu eğri yorulma analizlerinde kullanılmış rig testi öncesinde simülasyon ortamında parçanın doğrulanması sağlanmıştır.

Mevcut dökme demir tasarımın yorulma performansı, titreşim ve rijitlik karakteristikleri alüminyum döküm braket için referans olarak kabul edilmiştir. Alçak basınçlı alüminyum döküm ile üretilen yeni süspansiyon braket, yapılan yorulma analizleriyle dökme demir tasarıma göre düşük ömür gösteren bölgelerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

Alüminyum malzemenin yukarıda sayılan özelliklerinden faydalanılarak bu çalışmada, ağırlık ve yakıt tüketimini azaltmak amacıyla klasik dökme demir yerine alçak basınçlı alüminyum döküm braket tasarlanmış ve sonlu elemanlar metodu ile gerekli şartları sağladığı ortaya koyulmuştur. Son olarak alüminyum döküm tasarım fiziksel rig testlerini de başarıyla tamamlamış, seri üretimden önce fiziksel olarak da doğrulanmıştır.

1.1.1 Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

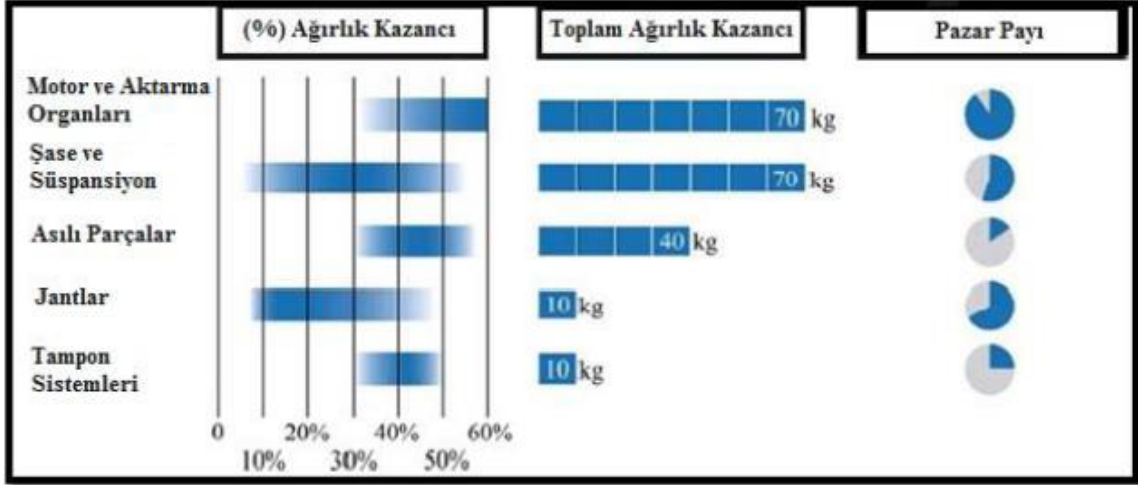
Alüminyum döküm ve ekstrüzyon yöntemi, otomotiv sektöründe dökme demir ve sac çelikten gibi uygulamalardan sonra en çok kullanılan yöntemlerdendir. Günümüzde, Kuzey Amerika'da üretilen bir araçta ortalama 118 kg alüminyum kullanılmaktadır ve bunun % 75'inden fazlası dökümdür. Otomobillerdeki hafifletme trendine bağlı olarak alüminyum kullanımı yaygınlaşmıştır. Bir binek araçta (otomobil, minivan, hafif ticari araç, arazi aracı) kullanılan alüminyum döküm içeriği 1978 yılında ortalama 42 kg'dan 2002 yılında 109 kg'a yükselmiştir [8].

Çevreci emisyon değerlerini sağlamak ve yakıt tüketimini azaltmak için, hafif metal malzemeler, geleneksel çelik ve demirin yerini alması otomotiv sektöründe özellikle son yıllarda Avrupa Birliği'nde bir zorunluluk haline gelmiştir. Makina mühendisleri uzunca bir süredir performans ve konfor özelliklerinden ödün vermeden, hafifletme amacıyla alternatif malzemeler üzerinde çalışmaktadırlar. Bu bağlamda alüminyum bir çok özelliği ile öne çıkmaktadır. Dökme demirle kıyaslandığında nispeten mukavemet ve yorulma performansı açısından dezavantajlı olsa da hafifliğiyle önemli bir özelliğe sahiptir. Günümüzde alüminyum, farklı üretim teknikleriyle otomobil parçalarında sıklıkla tercih edilmektedir [9].

Volvo, 1999 yılında piyasaya çıkardığı S80 modelinin tamamen alüminyum döküm ve ekstrüzyon parçalardan oluşan yeni bir arka aks tasarlamıştır. S80'nin NVH ve araç dinamiği yönünden çok daha iyi karakteristik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Test sonuçlarına göre, yeni alüminyum arka aksın rijitliği mevcut çelik arka aksın rijitliğinden çok daha yüksektir ve çok daha iyi bir yol tutuşu sağlamıştır. Bununla birlikte yeni tasarımın yolcu bölümüne alüminyum mekanik özellikleri sayesinde daha az yol ve tekerlek sesi ilettiği görülmüştür [10].

2012 yılındaki verilere göre AB’de otomobillerde ortalama 140 kg alüminyum malzeme kullanılmıştır. Bunun 37 kg’ı kontrol kolu, direksiyon parçası ve jant gibi şasi parçalarında, 26 kg’ı kapı, ön yapı ve tampon gibi gövde parçalarında, 69 kg’ı motor bloğu, silindir kafası, şanzıman kafası ve radyatör gibi motor aktarma organlarında, kullanılmaktadır (Şekil 1.1) [11].



Şekil 1.1 Alüminyum hafifletme çalışmalarının otomobil sistemlerine kırılımı [11].

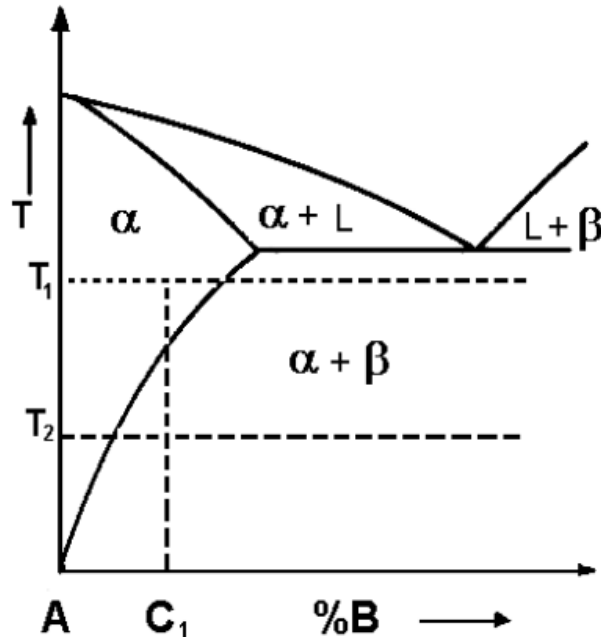
1.1.2 Alüminyum Alaşımların Isıl İşleme Ömrünün Artırılması

Malzemenin iç yapısı, tane boyutları, üretim yöntemi ve uygulanan ısı işlem gibi prosesler malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çökelme sertleştirilmesi ile malzeme yapısı değiştirilerek, dislokasyon hareketlerini engelleyerek mukavemeti ve yorulma özellikleri artırılabilir.

Çökelme sertleşmesi, metalin biçim değiştirme ana fazı içinde yoğun ve ince çökelmiş parçacık dağılımını elde etmek için yapılır.

Katı bir fazdan katılaşma eğrisinin geçilmesi sırasında başka bir katı fazın ayrılması engellendiğinde kristal kafesi gerilerek malzemenin dayanımını artırır. Sertleşme yönteminin uygulanabileceği sistemlerde katılaşma eğrisinin bulunması ve çözünürlüğün sıcaklık düştükçe azalması gerekir. Malzemenin tavlama süresi ve tavlama sıcaklığı artırılır ise taneler büyüyerek irileşir. [12].

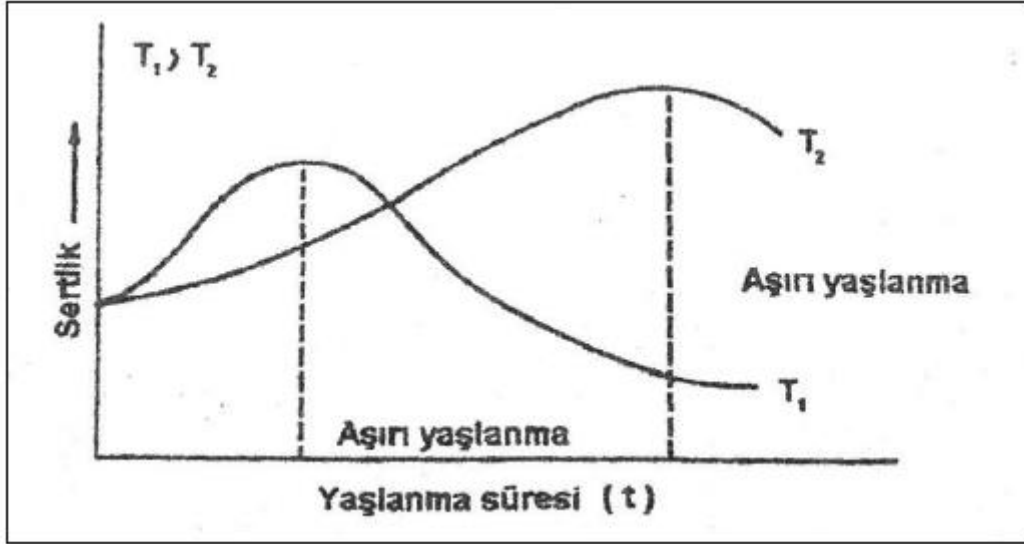
Çökelme, yaşlandırma sertleşmesi ile ilgili örnek diyagram 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Solvus eğrili faz diyagramı [12].

Düşük sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi daha fazla zaman alacağından yüksek sıcaklıklar kullanılarak proses hızlandırılmaktadır. Bu hızlandırma işlemini seri imalat için zaman kazandırırken malzemenin mekanik özelliklerinde negatif etkileri bulunabilir [13].

Yaşlandırma süresinin malzeme sertlik değerine etkisi Şekil 1.3’te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Yaşlandırma İşlem Süresinin Malzeme Sertliğine Etkisi [32]

Yaşlandırma işlemi sırasında malzemenin çizgisel kusurlarının engellenmesiyle parçaların mukavemet ve yorulma dayanımlarının arttığı ortaya koyulmuştur [14].

1.1.3 Alüminyum Alaşımları ile Yapılan Ağırlık Azaltma Çalışmaları

1990'lı yıllardan itibaren, binek otomobillerin güvenlik, donanım ve yüksek performans özelliklerinin eklenmesiyle ağırlıklıları artış göstermiştir. Bu sebeple otomotiv şirketleri karbon emisyonu ve yakıt tüketimini azaltmak amacıyla hafifletme çalışmalarına ağırlık vermiştir.

Ağırlık artışını azaltabilmenin yollarını otomotiv şirketleri alternatif malzemelerde aramışlardır. Bu sebeple alüminyum hatta karbon fiber gibi malzemeleri devreye almaya çalışmışlardır.

Dökme demir ya da sac çelik süspansiyon parçalarını, alüminyum alaşım döküme çevirmek ağır ticari araçların ağırlıklarını azaltmak için bir çözüm olabilir. Bununla birlikte ağır ticari araçlarda süspansiyon sisteminin maruz kaldığı yüksek yüklere karşı mukavemet ve yorulma ömründen ödün vermemek gerekir. Yüksek çekme dayanımı ve yüksek yorulma dayanımı gerektiren kritik şasi süspansiyon parçalarında dökme demir yerine alüminyum alaşımları kullanılarak ağırlık kazancı elde edilebilir [15].

Her % 10 ağırlık düşüşünün toplam yakıt tüketimini otomobillerde % 7 azalttığı tahmin edilmektedir. Her 100 kg'lık ağırlık düşüşü ile yakıt tüketimi binek araçlarda 0,3 L / 100 km, hafif ticari araçlarda 0,4 L / 100 km azaltılabilmektedir. Buna karşın çelik gibi malzemelerin yerine kullanılacak alüminyum tasarımlar maliyeti %30 ile %100 arasında maliyet artışı getirmektedir. [16].

BMW'ye göre alüminyum tasarımlarla yapılan ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında %10 oranında ağırlık azaltmayla yakıt tüketimi de % 5 ile % 10 arasında düşürmektedir. [8].

Hafifletme çalışmalarının yakıt tüketimi üzerinde olduğu gibi aracın diğer parçaları üzerinde de etkisi vardır. Örneğin, ağırlık azaltma çalışması yapılan bir araç, aynı performansı daha küçük bir motorla sağlayabilir ve daha küçük bir frenleme sistemiyle aynı frenleme performansı sağlanabilir. Daha küçük motor kullanılan bir araçta daha küçük bir şanzıman ve daha küçük yakıt tankı kullanılabilir [17].

Çalışmalara göre otomobil sanayisinde çelik yerine kullanılan her bir ton alüminyum, bir binek aracın ortalama hayatı boyunca toplam 18 ton daha az karbon emisyonu üretmesini sağlamaktadır [18].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, alüminyum malzemenin süspansiyon sistemleri gibi yüksek yüklere maruz kalan parçalarda kullanılabileceğini göstererek, araçta ağırlık azaltmanın sağlanmasıdır. Mevcut dökme demir malzemenin yerine tasarlanan alüminyum süspansiyon braketinin en az dökme demir kadar mukavemet ve yorulma performansı göstermesi hedeflenmiştir. Dökme demir tasarımıyla her açıdan aynı performansı göstermesi beklenen alüminyum tasarıma gidilirken, alüminyum malzemenin mekanik özelliklerinin dökme demire göre daha düşük olduğu göz önünde bulundurularak dökme demir geometrisinin kritik bölgelerinde tasarım aksiyonları alınarak iyileştirmeler yapılmıştır.

Yapılan düşük çevrimli malzeme yorulma testinden gerinim - ömür eğrisi(ϵ -N eğrisi) elde edilmiştir. Bilgisayar destekli yorulma analizinde elde edilen gerinim - ömür(ϵ -N eğrisi) eğrisi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeline uygulanan yükler ise araç testlerinden elde edilmiştir. Bu sayede yeni tasarlanan alüminyum süspansiyon braketinin ömür tahmini fiziksel rig testinden önce yapılabilmektedir. Yapılan iyileştirmeler sayesinde alüminyum tasarımın ömür değerleri dökme demirle aynı seviyeye getirilerek, hedef ömür değerlerine ulaşılmıştır. Çalışmanın çıktısı olarak alüminyum tasarım ağırlık avantajı sağlarken, parçanın birim fiyatını arttırdığı görülmüştür.

1.3 Hipotez

Çalışma kapsamında ticari bir aracın ön süspansiyon braketi alüminyum döküm yöntemi kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Ağır ticari araçlar için süspansiyon braketleri genellikle dökme demirden yapılır. Parça geometrisi ve yıllık üretim sayısına göre en uygun yöntem alüminyum döküm yöntemi olarak belirlenmiştir. Malzemeyi dökme demirden alüminyum döküme dönüştürürken, süspansiyon braketinin mukavemet ve yorulma performansını koruyabilmek için parça geometrisinde bazı tasarım aksiyonları alınmıştır. Bununla birlikte kalıp geometrisinde alüminyum döküm yöntemine uygun tasarım değişiklikleri yapılmıştır. Bu yüzden çalışmada seçilen alüminyum döküm yöntemine ve gerçekleştirilen yorulma analizlerine detaylı yer verilmiştir.

ALÜMİNYUM DÖKÜMÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Alüminyumun yoğunluğu (2,700 kg/m³) ve elastisite modülü (70 GPa), çeliğin yoğunluğunun ve elastisite modülünün üçte biridir. Yani, bir alüminyum tasarımın, çelik tasarım ile aynı eğilme rijitliğine sahip olabilmesi için, alüminyumun kesit atalet momentinin çeliğinkinin üç katı olmalıdır. Kalınlık ve kesit boyutlarının arttırılması ile bu yapılabilir. Teorik olarak, çelik yerine alüminyum olarak tasarlanan bir sac metal parçanın kalınlığı 1,5 kat artırılarak aynı dayanım ve rijitlik değerleri elde edilebilir ve % 50 ağırlık kazancı sağlanabilir [22].

Alüminyum malzeme, son yıllarda otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilen ve hafifliğiyle öne çıkan bir metaldir. Buna sebep olarak korozyon direnci ve otomobiller için kullanılabilecek kadar mukavemet ve yorulma özelliklerine sahip olması gösterilebilir. Hali hazırda otomotiv endüstrisinde alüminyum dövme, döküm, sac metal ve ekstrüzyon gibi pek çok farklı üretim yöntemi kullanılarak tasarımlar yapılmakta ve kullanılmaktadır [20].

Alüminyum malzemeler, kompozit gibi diğer alternatif olabilecek hafif malzemelere göre geri dönüştürülebilirliği, temin edilebilmesi ve seri üretime uygunluğu bakımından daha avantajlıdır [21].

Şekil 2.1'de bir alüminyum döküm prosesi örneği gösterilmiştir. Alüminyum döküm prosesi çelik gibi hali hazırda yaygın olarak kullanılan malzemelerin üretim prosesine göre daha pahalıdır. Bu alüminyum için en önemli dezavantaj sayılabilir.

Ağırlık avantajıyla öne çıkan alüminyum alaşımlar, üretim maliyetlerini arttırdığı için kimi zaman seri üretimde otomotiv endüstrisi tarafından tercih edilmemektedir.



Şekil 2.1 Alüminyum döküm prosesi [19]

Otomobilleri hafifletmek için yapılan çalışmalarda en büyük önem, otomobilin ağırlığının ortalama %60'ını oluşturan şasi ve gövde sistemlerinde olacaktır. Son yıllarda ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında bir çok hafif malzeme alternatifi otomobillerde denenmiştir. Alüminyum tasarımın, çelik tasarım ile eşit eğilme rijitliğini yakalayabilmesi için, kalınlığının % 43,5 arttırılması gerekir. Yani, alüminyum kullanımı ile sağlanan ağırlık azaltmasının iki malzemenin yoğunluk oranlarıyla doğru orantılı olamaz [23].

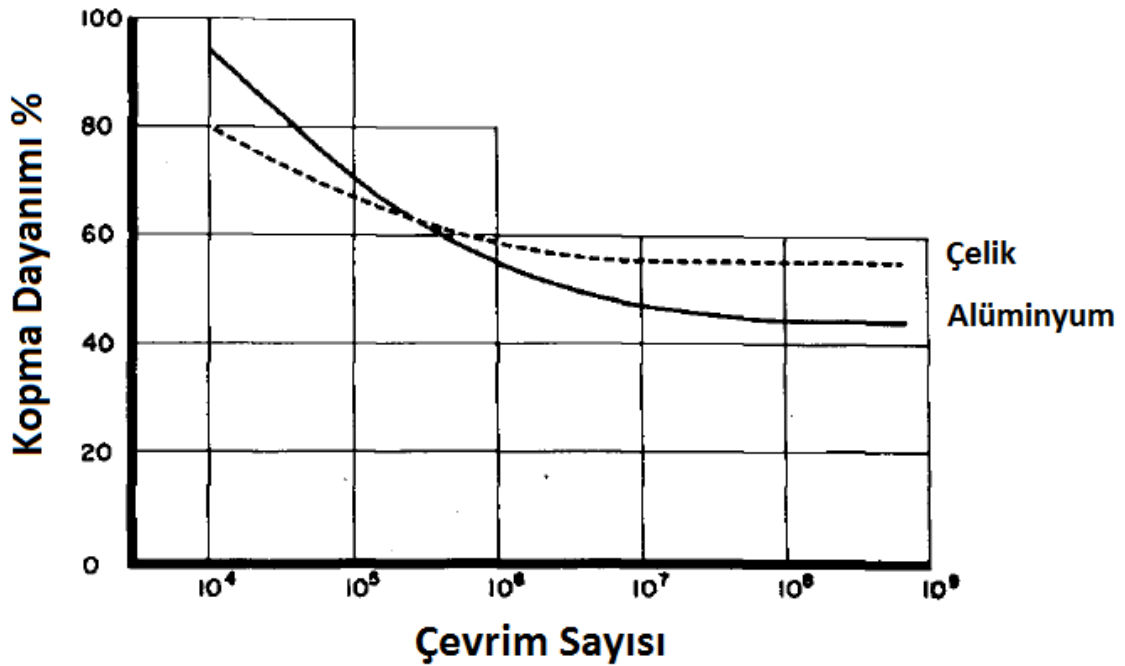
Şasi sistemlerinde alüminyum malzemeye ağırlık azaltma çalışması yapmak çok daha önemlidir. Yaysız ağırlık olarak adlandırılan bu parçalar, aracın konfor ve gürültüsü gibi parametrelere doğrudan etkileri vardır. [11].

Otomobillerde alüminyum kullanılması sürüş kalitesini ve yol tutuşunu arttırdığı bazı yayınlarda ortaya koyulmuştur [10].

Alüminyum malzemelerin yorulma davranışını inceleyen bir yayında, alüminyum parçaların üretilmesi sırasında oluşan parça üzerindeki gözenekliliğin, yorulma ömründe çok ciddi farklılıklar gösterebileceğini istatistiksel olarak ortaya koymuştur [24].

Dökme alüminyum bileşenlerin yorulma özellikleri, gözeneklilik gibi kusurların varlığına büyük ölçüde bağlıdır. Maksimum kusur boyutu önemli bir faktör olarak kabul edilmiştir [25].

Şekil 2.2'ye göre çelik eğri, yaklaşık 5 milyon döngüde düzleşirken, alüminyum eğrisinin düzleşmesi daha uzun sürer. Düşük çevrim sayılarında alüminyum göreceli olarak daha yüksek gerilme seviyelerinde dayanabilmektedir. Eğriye göre yüksek çevrimlerde göreceli olarak çelik daha iyi performans sergilerken, alüminyum eğrisinin düzleşmediği yani göreceli dayanıklılığının daha az olduğu gözlemlenebilmektedir [26].



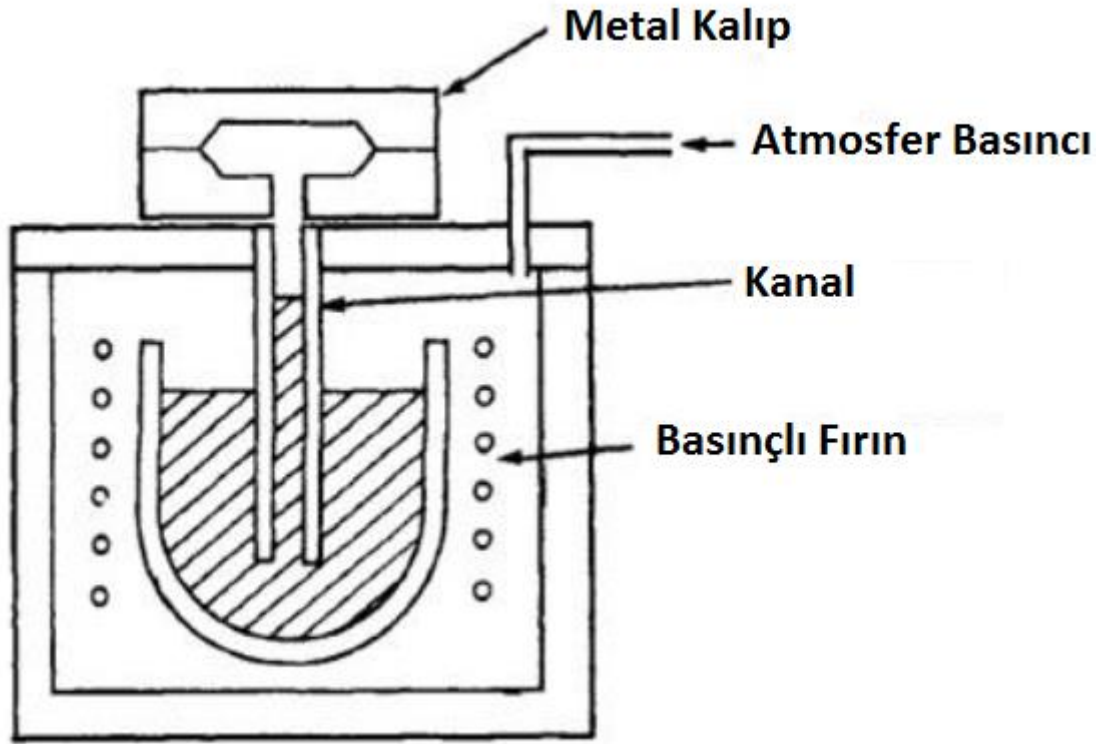
Şekil 2.2 Alüminyum dövme ve çelik kirişlerin S-N eğrileri [26]

2.1 Süspansiyon Braketinin Alüminyum Dökümle Üretimi

Yüksek basınçlı döküm, alçak basınçlı döküm ve kokil döküm olmak üzere üretim yöntemleri mevcuttur. Bu üç yöntem aşağıdaki bölümlerde incelenerek çalışmanın konusu alüminyum süspansiyon braketini için uygun olan yöntem seçilecektir.

2.1.1 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi

Eritilmiş metal içeren fırının üzerine metal kalıp konulmuştur. Kanal sayesinde eriyik metal kalıbın içerisine ulaşır. Eritilmiş metal, fırının içerisine düşük basınçlı hava basılınca yükselmeye başlar. Kalıp içindeki hava, kanal ile tahliye edilir. Kalıba dolan metal, soğuma süresi geçtikten sonra katılaşır. Döküm parça üretilmiş olur [6]. Şekil 2.3'te alçak basınçlı döküm yöntemi görseli verilmiştir.



Şekil 2.3 Alçak Basınçlı Döküm [6]

Yüksek kaliteli parçalar bu yöntemle üretilabilmektedir. Besleyici kullanımı olmadığı için ve bir adet kanal kullanıldığı için verimi %90'nın üzerindedir. Tolerans değerleri kabul edilebilirdir ve iyi yüzey kaliteli parçalar üretilabilir.

Alçak basınçlı döküm kalıpları, dökme demirden üretilirler. Kalıbın içerisine girip çıkan maçalar ve kalıbın ısıyla temas eden kısımları için takım çeliği kullanılır.

Kalıp parçaları, eritilmiş alüminyumun kendisine yapışmasını engellemek ve ısı transfer hızını kontrol edebilmek için bunu engelleyebilecek bir kaplama ile kaplanmalıdır. Kalıbın cam boncuk püskürtülerek temizlenmesi, üretilecek parçaların toleransları açısından önemlidir [6].

Besleyici kullanılmadığı için, alçak basınçlı döküm yönteminde işleme maliyetleri oldukça düşüktür. Kalıba doldurma işleminin dengeli olması ve kontrollü soğuma sağlandığı için, yüksek metalürjik kaliteye sahip ve bunun sonucunda mekanik özellikleri iyi parçalar üretilebilmektedir [27].

Örneğin otomotiv süspansiyon parçalarından salıncak kolu ve akson gibi alçak basınçlı döküm örnekleri bulunmaktadır (Şekil 2.4 ve Şekil 2.5).



Şekil 2.4 Alçak Basınçlı Döküm Örneği – Salıncak Kolu [28]

Yine bu yöntemle otomotiv endüstrisinde süspansiyon braketleri, silindir kafası, motor bloğu, jant, gibi parçalar üretilmektedir.



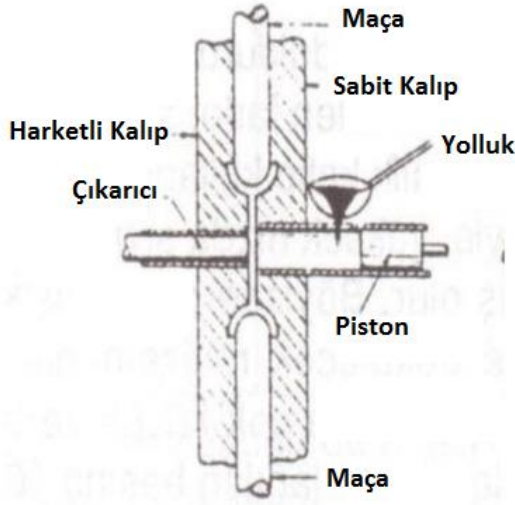
Şekil 2.5 Alçak Basıncı Döküm Örneği – Akson [7]

2.1.2 Yüksek Basıncı Döküm Yöntemi

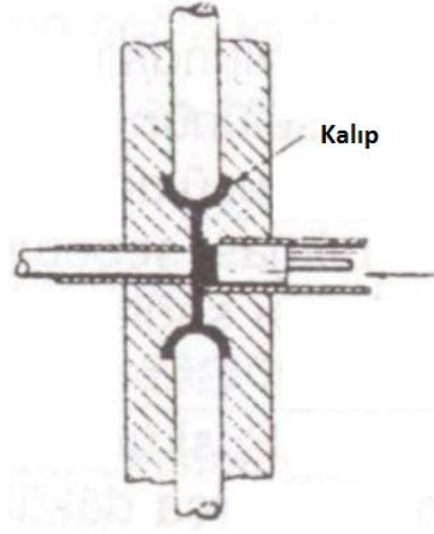
Eritilmiş alüminyum metal bekleme fırınında 650-750 °C sıcaklık seviyesine getirilir ve kepçe ile döküm kalıba koyulur. Fırının içine koyulan eritilmiş metal hava basıncı sayesinde ittirilir. Döküm kalıp makinesinin püskürtme bölümü bir silindir ve pistondan oluşur. Piston, hidrolik silindir tarafından kontrol edilir. Eritilmiş alüminyum silindir boşluğundan içeri girer. Hidrolik sistem bilgisayar destekli sistemle kontrol edilir (Şekil 2.6).

Alt ve üst kalıp birbirine doğru sıkıştırılır. Piston metali kalıbın içine doğru ittirir. Eritilmiş metal kalıbın boşluklarına dolar. Yüksek basınçlı döküm prensibi gereği 40 - 160 MPa basınç uygulanır ve eritilmiş metal katılaşana kadar kalıp tarafından soğutulur. Soğuma işlemi bittikten sonra iticiler yardımıyla kalıp ayrılır ve parça çıkarılır. Kalıba su-yag karışımı bir sıvı sıkılır ve kalıp soğutulmuş ve yağlanmış olur.

Eriyik metalin hazneye doldurulması



Pistonla kalıba basınç uygulanması



Şekil 2.6 Yüksek Basıncılı Döküm

Bu yöntem, eritilmiş metalin yüksek basınç altında metal kalıba dökülmesidir. Üretim hızı diğer metotlara göre daha yüksektir. Tolerans hassasiyeti ve yüzey kalitesi yüksektir. Otomotivde en yaygın kullanılan üretim alüminyum döküm yöntemidir [6].

2.1.3 Kokil Döküm Yöntemi

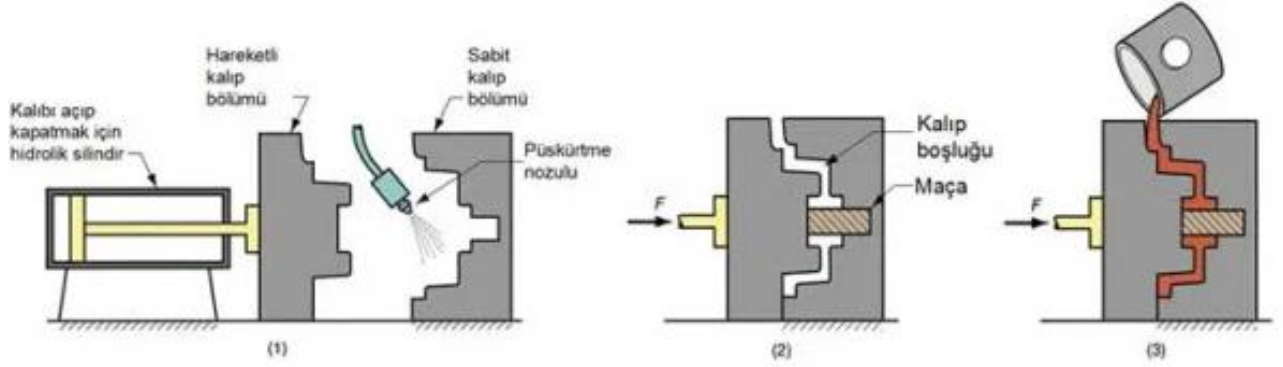
Kokil döküm yöntemi, eriyik alüminyumun işçi tarafından el kepçesi ile kalıba döküldüğü, maçanın operatör tarafından yerleştirildiği yani işçi odaklı hataya mahal verilebilecek elle yapılan bir işlemdir. Döküm esnasında metal sıcaklığı ve döküm hızı kontrol edilememektedir. Diğer üretim yöntemlerindeki gibi basınç uygulanmadığı için kilitleme mekanizmasına gerek yoktur.

Bu yöntem, karmaşık geometrideki parçaların üretilebilir olması nedeniyle tercih edilebilmektedir. Örneğin, silindir kafası ve manifold gibi parçaların üretimi için kullanılmaktadır.

Kalıp sıcaklığı çok yüksektir ve bu yüzden kalıplarda çarpılmaya sebep olur. Maçaların zarar görmemesi için kalıplara uzak tutulmalıdır. Kalıpların içerisindeki havanın dışarı atılabilmesi için havalandırma kanalları bulunur bu aynı zamanda soğumayı da hızlandırır.

Dökülen parçanın içerisinden kolayca çıkarılabileceği şekilde kalıplar tasarlanır. Manuel işlemlerde işçi tarafından bir kaldıraçla döküme zarar vermeden çıkarılır. Daha önce belirtildiği gibi yine bu işlem de insan hatasına açıktır. Kokil döküm yönteminin görseli Şekil 2.7’de verilmiştir.

Kalıpların kullanım ömrü genellikle 30.000 – 50.000 basım arasındadır [30].



Şekil 2.7 Kokil Döküm [29]

2.1.4 Süspansiyon Braketi Seçilen Üretim Yöntemi ve Tasarımı

Alüminyum dökümün üç temel yöntemi, “Süspansiyon Braketinin Alüminyum Dökümle Üretimi” bölümünde aktarılmıştır. Tasarımın hangi alüminyum döküm yöntemiyle en uygun şekilde üretilebileceği bu bölümde seçilecektir. Alçak basınçlı döküm, literatür araştırmaları ve Türkiye’deki mevcut imalatçı kapasitesine göre ilk bakışta öne çıkmaktadır.

Mekanik özellikler açısından karşılaştırıldığında alçak basınçlı dökümün ve kokil dökümün ancak T6 ısıtma işlemi gördükten sonra yüksek basınçlı döküm seviyesine gelebildiği görülmüştür. Bu da aynı mekanik özelliklerin alçak basınçlı döküm tarafından sağlanabilmesi için T6 ısıtma işleminin uygulanmasını gerektirmekte ve bu durum parça maliyetini artırmaktadır.

Yüksek basınçlı dökümde parça, yüksek basınç altında hızlı bir şekilde soğumasıyla üretilir. Diğer yöntemlerde soğuma oda sıcaklığında yani daha yavaş şekilde gerçekleşir. Bu yönüyle yüksek basınçlı döküm birim zaman parça üretimi açısından avantajlıdır.

Alçak basınçlı döküm ve yüksek basınçlı döküm otomatik makine sistemleri kullanılarak yapılırken, kokil döküm operatör performansına daha bağlı bir işleyiş gerektirir. Bu yüzden kokil döküm yöntemi üretim hatalarına açıktır.

Yüksek basınçlı dökümün, bahsedildiği gibi birim parça üretim zamanı çok daha kısadır. Yüksek üretim taleplerinde parça fiyatları makul hale gelebilmektedir. Bununla birlikte yüksek basınçlı dökümün kalıp maliyetleri çok yüksektir.

Alçak basınçlı döküm yönteminin kalıp maliyeti daha düşüktür bununla birlikte soğuma süresi uzun olduğundan parça maliyeti yüksektir. Çok yüksek olmayan üretim adetlerinde alçak basınçlı döküm maliyeti daha avantajlı çıkmaktadır.

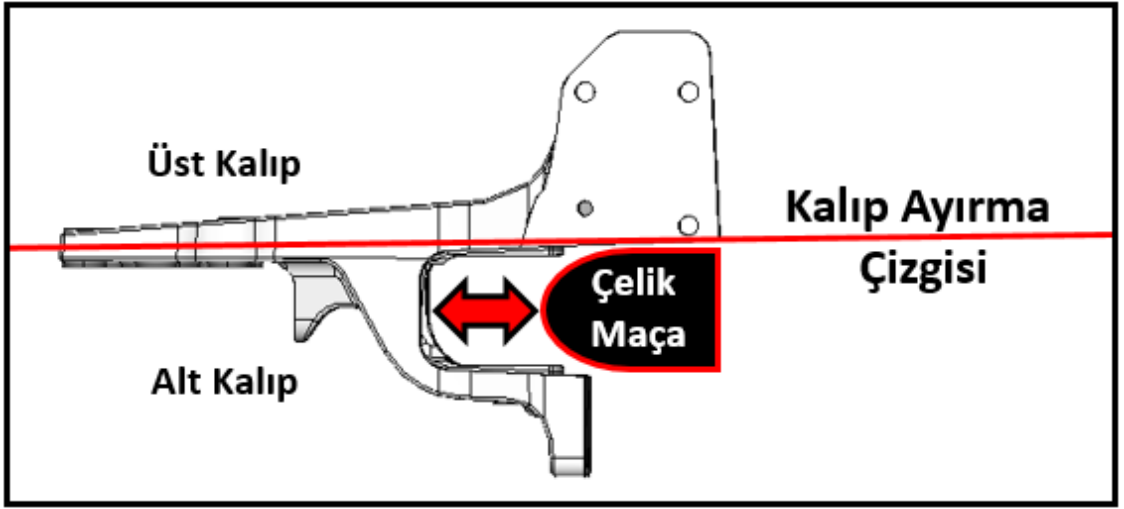
Kokil dökümde ise, kalıp maliyetleri çok daha düşüktür. Ancak kullanılan yolluklar, besleyiciler, kum maçalar ve işçilik maliyeti nedeniyle birim parça fiyatı diğerlerine göre oldukça yüksektir. Hata oranı yüksek olduğu için birçok otomotiv uygulamalarında tercih edilmez.

Süspansiyon braketleri tasarımı mekanik özellikleri görece daha düşük alüminyum malzemeye geçileceğinden, dökme demire göre kalınlaştırma yapılacağı kolayca öngörülebilir. Yüksek basınçlı dökümde, kalınlığı yaklaşık 10 mm üzerinde olan parçalarda kendini çekme riski vardır. Anlatıldığı gibi yüksek basınçlı dökümde soğuma hızı diğer iki yönteme göre oldukça yüksektir. Tasarım kalınlaşacağı için yüksek basınçlı dökümün parçanın imalatına uygun bir yöntem olmadığı görülmüştür.

Tasarımı yapılan parça, yüksek adetli parçalar sınıfına girmemektedir. İmalatçılardan alınan teklifler karşılaştırıldığında, alçak basınçlı dökümün kalıp maliyetinin kokil döküme göre daha yüksek olduğu ancak birim parça fiyatının kokil döküme göre çok daha düşük olduğu için daha avantajlı hale geldiği hesaplanmıştır.

Tasarım CATIA V5 yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Ön süspansiyon braketinin alçak basınçlı döküm kalıbından çıkabilecek şekilde, gerekli kalıp açılarının verilmesi ve değişen maça tipine göre parçanın bazı bölümlerinin tasarımının değiştirilmesi ele alınmıştır. Bununla birlikte, dökme demirden alüminyum döküme geçiş sırasında, parçanın tasarımsal olarak diğer bölgelerine göre zayıf olan bölgeleri, daha yüksek dayanım gösterecek şekilde geliştirilmiştir.

Alçak basınçlı alüminyum dökümde, çelik malzemeden imal edilmiş kalıp ve maça kullanılmaktadır. Parçanın kalıptan rahatça çıkarılabileceği kalıp ayırma çizgisi ve kullanılacak maça çalışılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Parçanın Çelik Kalıpta Yerleşim Şeması

2.2 Alüminyum Dökümün Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Bu çalışmada ömür tahmini yapılacak alüminyum süspansiyon braketinin, makas bağlantısından yüksek yüklere maruz kalacağı açıktır. Bu tespit de parçanın plastik deformasyonlara uğrayacağını göstermektedir. Bu nedenle malzemenin yorulma karakteristiğini tespit ederken düşük çevrim bölgelerinde maruz kaldığı yüksek yüklemeleri, malzeme modelinde daha iyi modelleyebilmek için gerinim – ömür(ϵ -N eğrisi) modeli, gerilme – ömür modeline göre daha iyi sonuç vereceği için seçilmiştir.

Yapılan malzeme testiyle, yorulma analizinde kullanılacak ϵ -N eğrisi çıkarılmıştır. Yapılan testler çoğunlukla düşük çevrimli yorulma bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Testin sonucunda üretilcek alüminyum malzemenin yorulma özellikleri ve plastik bölgedeki davranışı hakkında bilgiler elde edilmiştir.

2.2.1 Alüminyum Döküm Malzemenin Çekme Testi

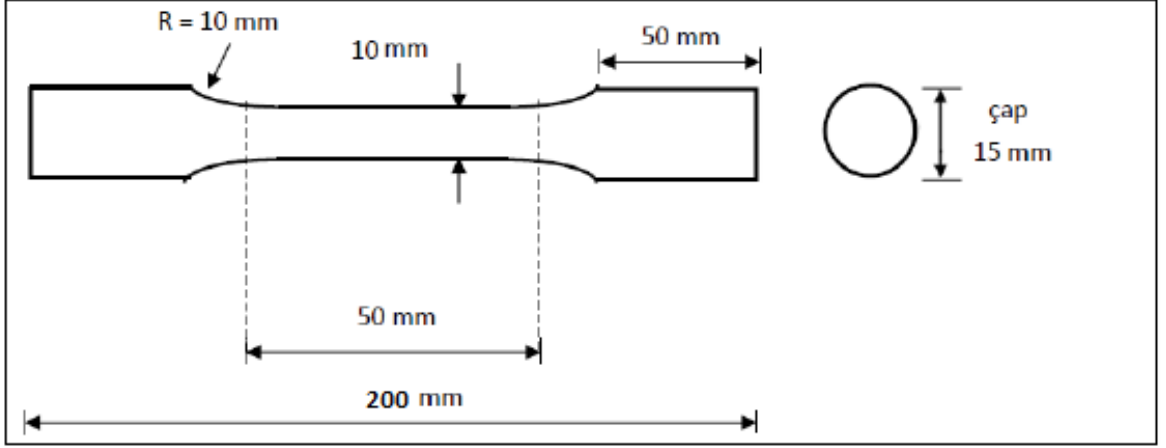
Süspansiyon braketinin istenen mukavemet ve yorulma özelliklerinin sağlayabileceği öngörülen EN AC 43300 malzemesi seçilmiştir. Yerli pazarda sıkça kullanılan ve imalatçı firmanın elinde bulunan malzeme, erişilebilirlik ve maliyet açısından da öne çıkmaktadır. EN AC 43300 alüminyum malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 2.1’de belirtilmiştir.

Tablo 2.1 EN AC 43300 [31]

ALLOY		ELEMENTS												
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Individual impurities	Global impurities
EN AC 43300	min	9.0				0.30								
	max	10.0	0.15	0.03	0.10	0.45	-	-	0.07	-	-	0.15	0.03	0.10

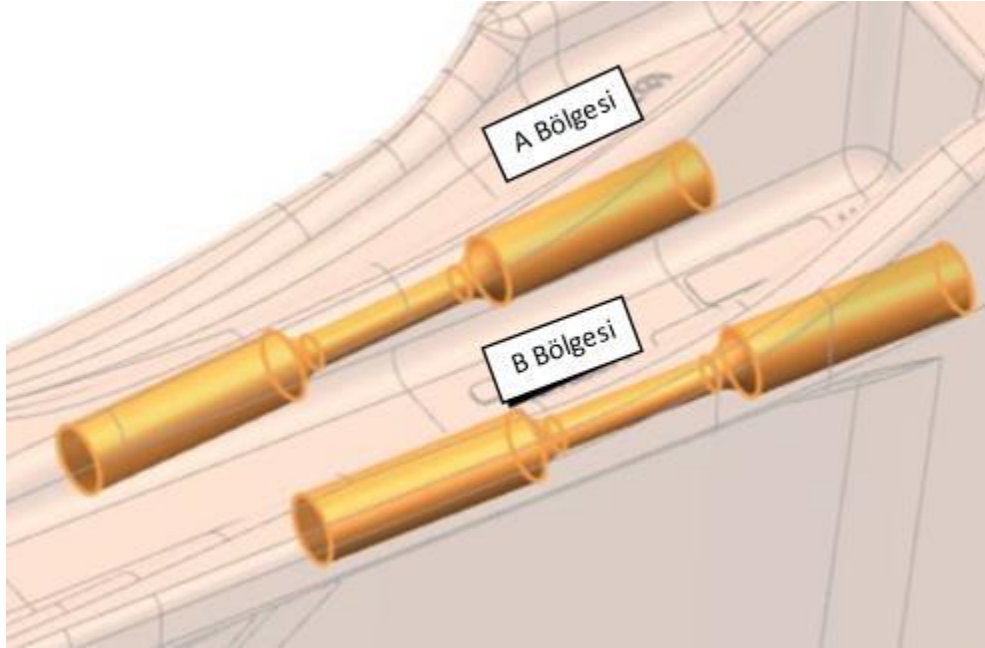
AC 43400 malzemesi ile alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen test parçası, döküm prosesi sonrası T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır.

Çekme testinde kullanılan numune ölçüleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Çekme Testi Numune Ölçüleri

Üretilen parçanın farklı bölgelerindeki soğuma hızının, malzemenin yorulma karakteristiğine etkisini de tespit edebilmek için 2 farklı bölgeden teste kullanılacak numuneler alınmıştır. Numune lokasyonları Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



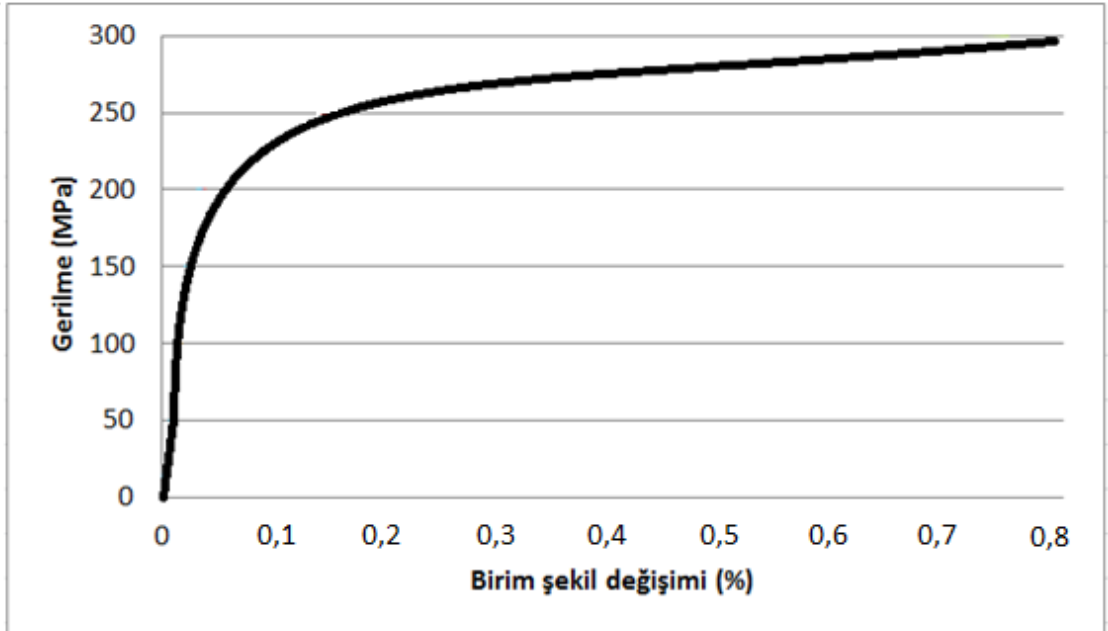
Şekil 2.10 Test Numune Bölgeleri

Elde edilen test numunelerinin malzeme yapılarındaki kusurları tespit edebilmek için x-ray cihazı ile kontrolü yapılmıştır. Test numuneleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Test Numuneleri

A ve B bölgelerinden elde edilen numunelerin çekme testi sonuçları elde edilmiştir. Tüm örneklerin sonuçları değerlendirilerek, ortalama değerler malzemenin Gerilme – Birim Şekil değiştirme eğrisi olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi malzemenin mukavemeti açısından davranışını gösteren eğri elde edilmiştir.



Şekil 2.12 Gerilme – Birim Şekil değiştirme Eğrisi

Elde edilen eğriden, malzemenin akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma uzaması ve elastisite modülü gibi değerler Hooke Kanununa göre hesaplanabilir. Hesaplanan değerler Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

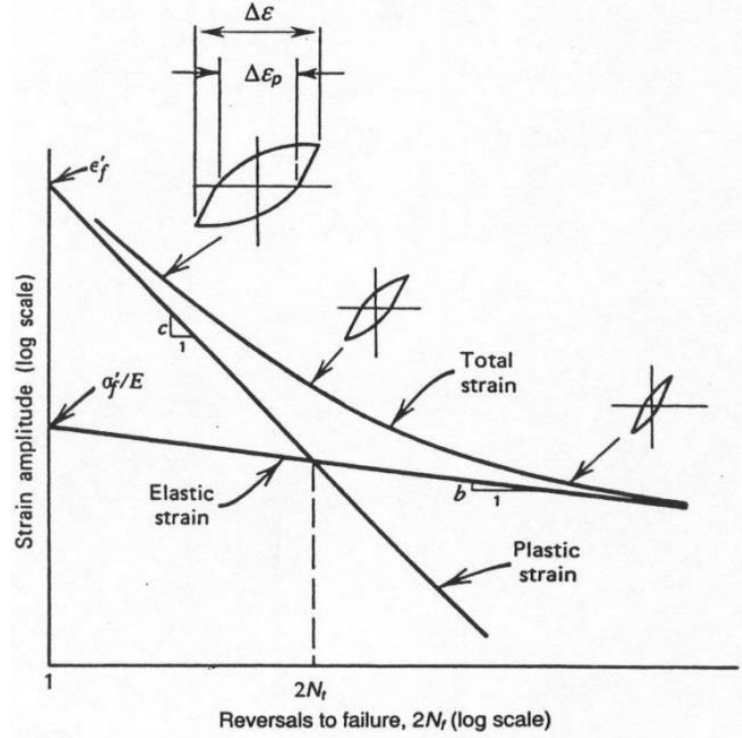
Tablo 2.2 Malzemenin Mukavemet Değerleri

Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrisi	Akma Gerilmesi [MPa]	Çekme Gerilmesi [MPa]	Kopma Gerinimi %	Elastisite Modülü [MPa]
Şekil 2.12	230	295	7.9	70000

2.2.2 Malzeme Yorulma Eğrilerinin Çıkarılması

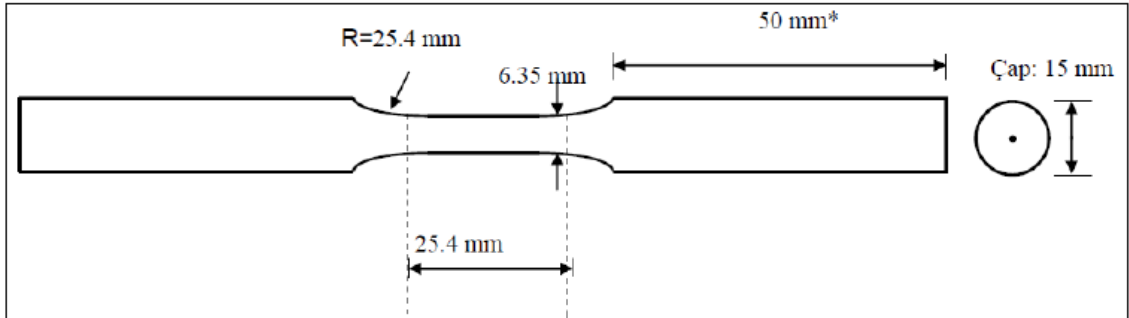
Yorulma analizlerini gerçekleştirebilmek için ϵ -N eğrisinin çıkarılabilmesi gerekmektedir. ϵ -N eğrisinin gerekli katsayıları test sonuçlarından çıkarılıp bu değerler nCode yazılımına girilerek yorulma eğrisi elde edilecektir. Süspansiyon braketine yüksek gerinim değerleri oluşturacak yükler geleceği tahmin edildiği için yorulma tahmininde gerilme bazlı yorulma eğrisi yerine plastik şekil değiştirmeyi daha iyi temsil edebildiği düşünülen ϵ -N eğrisi ile yorulma analizi yapılması tercih edilmiştir.

Eksenel ve burulma yükleme koşulları altında olan metallerin yorulma ömürleri ve toplam elastik ve plastik şekil değiştirmedeki davranışları Coffin – Manson katsayılarıyla enerji metodu kullanılarak literatürde incelenmiştir [32]. ϵ -N eğrisinin plastik ve elastik davranış bölgelerini gösteren örnek eğri Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 ϵ -N eğrisi Örneği [32].

Çekme testlerindeki A ve B bölgeleri gibi yorulma testi için bu bölgelerden ASTM E606 standardına göre numuneler üretilmiş ve testte kullanılmıştır. Test numune geometrisi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Yorulma Numune Geometrisi

A ve B bölgelerinden elde edilen 5'er adet numunenin yüzey pürüzlülük değeri R_a 0.2'den düşük olması beklenmiştir. Numunelerin yarıçapları neredeyse özdeş ve 6.35 mm'dir. Geometride görüldüğü üzere kesiti incelenen kısım yani yorulma testinde kırılma beklenen bölgede çentik oluşmaması için uygunca zımparalanmış ve çentik kontrolü yapılmıştır.

Yorulma testleri, aksenal yük uygulayabilen Instron 8801 cihazı ile yapılmıştır. Yorulma numunelerine aksenal yönde çeki ve bası kuvvetleri belirli bir frekansta uygulanmıştır. Test düzeneği Şekil 2.15’de gösterilmiştir.

Test makinesinin frekansı ayarlanarak farklı birim uzama genliklerinde numuneler test edilebilmiştir. Birim uzama genliği ile frekans arasındaki bağıntı Denklem 2.1’de gösterilmiştir.

$$\dot{\varepsilon} = 4 * f * \varepsilon \quad (2.1)$$

$$f = \text{Eyleme Frekansı (Hz)}, \varepsilon = \text{Gerinim}, (\dot{\varepsilon}) = 4 \times 10^{-3} \text{ (1s)}$$



Şekil 2.15 Yorulma Test Makinesi

Düşük çevrimli yorulma testleri farklı numuneler için % 0.3 ve % 0.6 gerinim değerleri arasında yapılmıştır. Testler numuneler kırılıncaya kadar devam etmiş ve çevrim sayıları 95 ile 15000 arasında değişmiştir. Gerinim ve çevrim sayıları kullanılarak çıkarılan eğrilerden yorulma analizinde kullanılacak ϵ -N eğrisi katsayıları elde edilmiştir. Test sonuçları Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

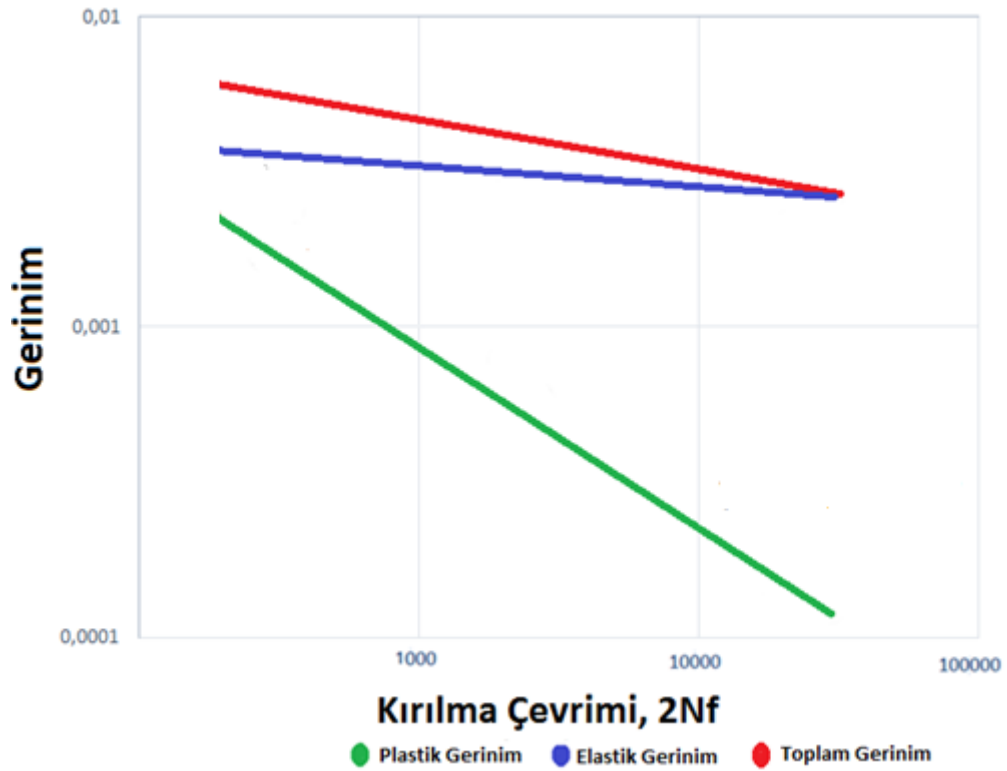
Kırılmış test numune örnekleri Şekil 2.16'da görülebilir. Kırılan numunelere bakılınca, kırılması beklenen ve kesiti inceltilen bölgeden kırıldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 2.16 Yorulma Testi Sonucu Kırılan Numuneler

Tablo 2.3 Gerinim- Çevrim sayısı test sonuçları

Numune	Çevrim	Gerinim %	Test Frekansı (Hz)
A-1	280	0,6	0,20
A-5	340	0,5	0,17
A-2	2800	0,4	0,25
A-4	18800	0,3	0,33
B-1	190	0,6	0,17
B-4	260	0,5	0,20
B-5	400	0,5	0,20
B-2	1900	0,4	0,25
B-3	30000	0,3	0,33



Şekil 2.17 Gerinim – Çevrim Sayısı Eğrileri

Şekil 2.17’de verilen gerinim – kırılma çevrimi eğrisi test sonuçlarına göre hesaplanmış ve çizdirilmiştir.

Toplam gerinim ve kırılma çevrim sayısı logaritmik eğrisi ayrıştırılarak elastik ve plastik şekil değiştirme davranışları çıkarılır ve doğrusal iki eğri elde edilir. Mavi renkli işaretlenen eğri elastik gerinim eğrisi ve yeşil ile işaretlenen eğri plastik gerinim eğrisini göstermektedir. Elde edilen test sonuçlarından elastik bölge davranışını modelleyebilmek için Basquin eşitliği ve plastik bölge davranışını modelleyebilmek için Coffin-Manson eşitliği kullanılmıştır. Doğrusal bölge için Basquin eşitliği Denklem 2.2’de gösterilmiştir.

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} * (2 * N_f)^b \quad (2.2)$$

Plastik davranış için kullanılan Coffin-Manson eşitliği Denklem 2.3’te gösterilmiştir.

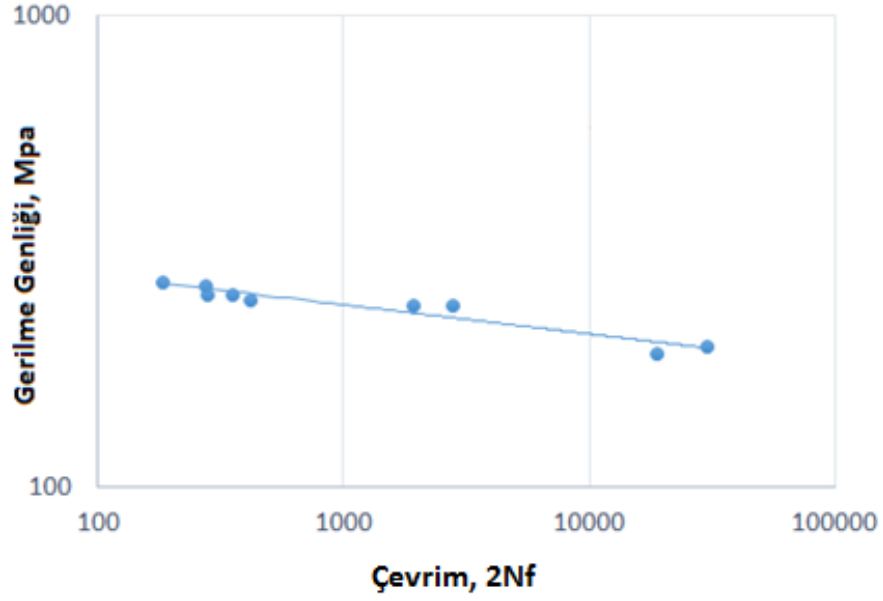
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' * (2 * N_f)^c \quad (2.3)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ε -N eğrisini elde edebilmek için kullanılmıştır. ε -N eğrisinin düşük çevrimli bölgesini elde edebilmek için Denklem 2.3, yüksek çevrimli bölgesini elde edebilmek için Denklem 2.2 kullanılmıştır.

Böylece toplam gerinimi ifade eden denklem 2.4’te gösterilmiştir.

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} \quad (2.4)$$

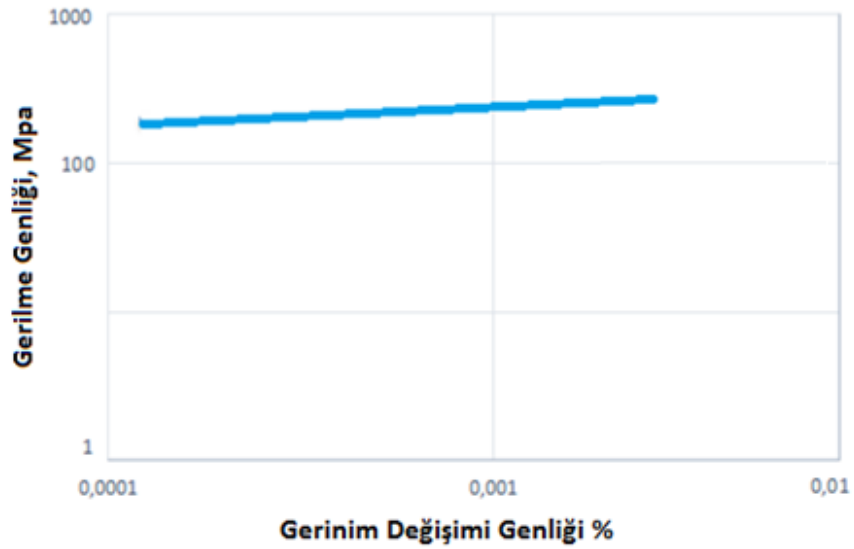
Şekil 2.17’de gösterilen Gerinim – Çevrim Sayısı eğrisinin plastik doğrusunun y eksenini kestiği nokta ve Şekil 2.18’de gösterilen Gerilme - Çevrim eğrisinde elastik doğrusunun y eksenini kestiği nokta; sırasıyla ε_f' ve σ_f' ‘tir. Yine Şekil 2.17’de gösterilen elastik ve plastik doğruların eğimleri sırasıyla b ve c katsayılarını verir.



Şekil 2.18 Gerilme Genliği – Çevrim

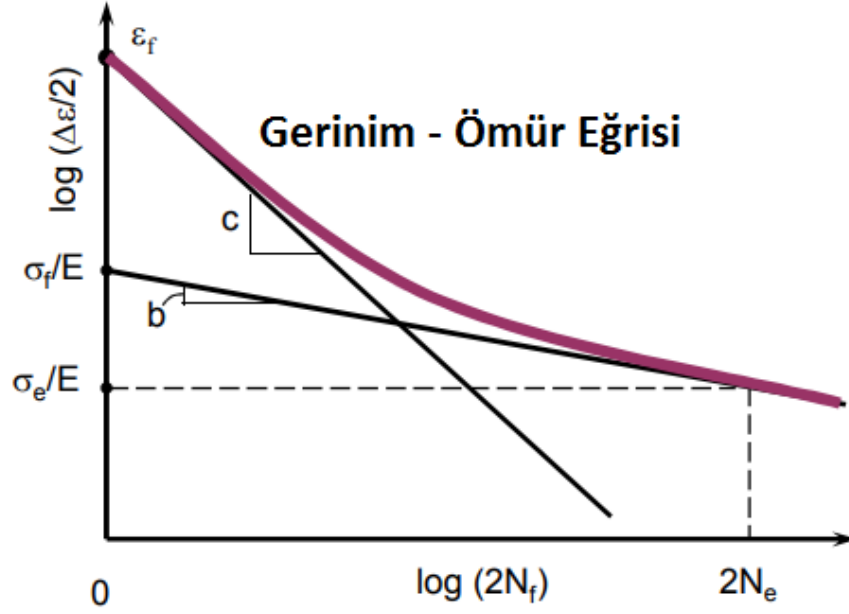
Şekil 2.19’da gösterilen Gerilme Genliği – Gerinim Değişimi Genliği test sonuçlarından çizdirilip, doğrusal bir eğrinin matematik modeli çıkarılarak sırasıyla yorulma çevrim katsayısı ve yorulma çevrim pekleşme üssü K' ve n' katsayıları Denklem 2.5’ten hesaplanır.

$$\sigma_a = K' * \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (2.5)$$



Şekil 2.19 Gerilme Genliği – Gerinim Değişimi Genliği

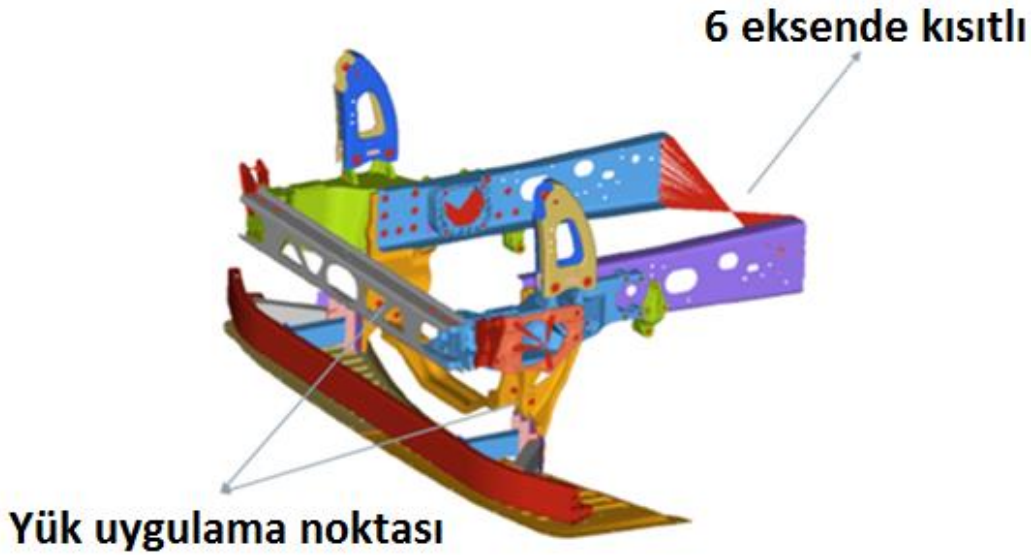
Bu sayede yorulma analizi için malzemenin ϵ -N eğrisinin tüm katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 2.20’de elde edilen ϵ -N eğrisinin parametrik gösterimi verilmiştir.



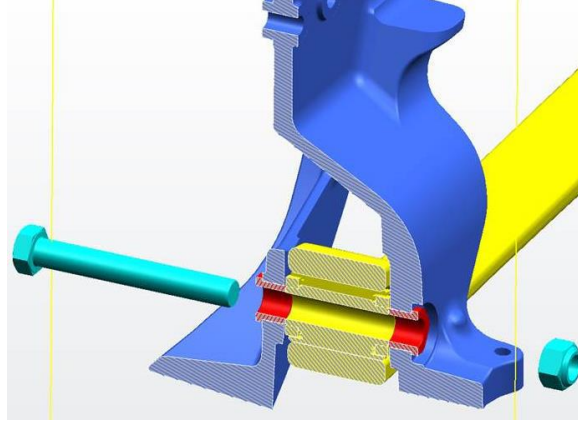
Şekil 2.20 ϵ -N Eğrisinin Katsayılarla Gösterimi

3.1 Sonlu Elemanlar Yorulma Modelinin Oluşturulması

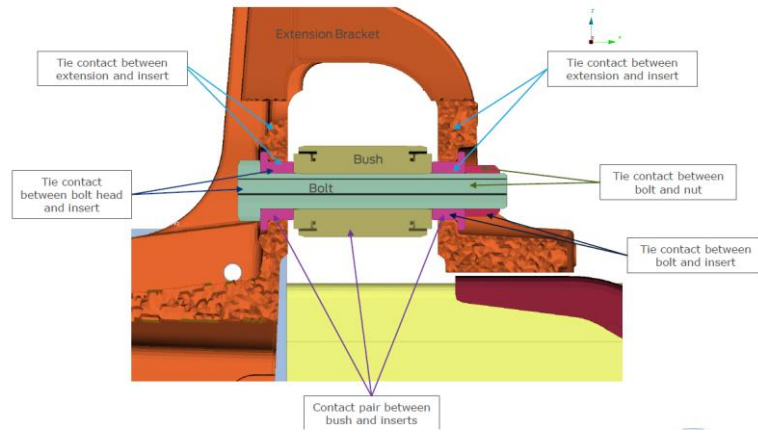
Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken şasi kollarının da elastisitesi dahil edilecek şekilde belirli bir uzunluğa kadar kesilmiş ve sanki 6 eksenle kısıtlanmış gibi kabul edilmiştir. Alüminyum süspansiyon braketine gelen yükler makas bağlantısından yükleme yapılacak şekilde model kurulmuştur. Model Abaqus yazılımında kurulmuş, alüminyum döküm süspansiyon braketi geometrisi için C3D10 elemanlar tercih edilmiştir. Toplamda üç boyutlu ve 2 boyutlu elemanlar olmak üzere 350000 adet eleman sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Bu eleman tipi, döküm parça geometrisine uygun hexa elemanlar tercih edilemeyeceği için ömür hesaplarının sonuçlarının daha hassas elde edilebileceği, literatürde ikinci-dereceden olarak geçen integrasyon noktaları artırılmış olduğu için tercih edilmiştir. Parça büyüklüğü göz önünde bulundurularak eleman boyutu için 3mm tercih edilmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Süspansiyon Braketi Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 3.2 Süspansiyon Braketinin Makas Bağlantı Bölgesi



Şekil 3.3 Sonlu Elemanlar Model Detayları

Tablo 3.1’de süspansiyon braketine uygulanan mesh kriterleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Mesh Kriterleri

Mesh Kriterleri	Hedef
aspect ratio	5
skewness	60
warping	10
taper	0.5
min height	2
jacobian	0.7
min length	3
max length	4
min angle trias	30
max angle trias	120
mesh distortion	4
distance from geometry	2
growth ratio	2

Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde civata ön yükü alüminyum malzemenin ömründe etkili olabileceği göz önünde bulundurularak modele dahil edilmiştir.

Şekil 3.2’de süspansiyon braketinin makas bağlantı bölgesi gösterilmiştir. Bu bölgenin detaylı sonlu eleman modelleri Şekil 3.3’te verilmiştir. Civata temas yüzeyleri Abaqus yazılımındaki *tie contact* algoritması kullanılmıştır. Alüminyum tasarım ve burç temas yüzeyinde *contact pair Augmented Lagrange method* tercih edilmiştir.

Yorulma analizi için nCode yazılımı kullanılmıştır. Malzeme testlerinden çıkarılan ϵ -N eğrisi bu yazılıma girilmiş ve ömür değerleri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde birim yük analizleri yapılmış, bu çıktılar nCode yazılımında yol verileri ile çarpılarak gerçek yükleme koşulları oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar modelinde asal gerilme çıktıları tercih edilmiş, bu sayede çekme ve basma durumları yorulma sonuçlarında dikkate alınmıştır.

Aracın doğrulama parkurundaki yorulma ve mukavemet dayanımını test edebilmek için, doğrulama parkurundan toplanan kuvvet ve moment verileriyle yorulma analizi yapılmaktadır. Süspansiyon braketi, makastan gelen kuvvetleri şasiye aktardığı için aracın yapısal yorulma dayanımını etkileyen en önemli parçalardan biridir.

Tasarımın dökme demirden, alüminyum döküme geçişi sırasında, malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve yorulma eğrisi denklemine ait katsayılar değişecektir. Kolayca söylenebilir ki alüminyum malzemenin mekanik özellikleri dökme demire göre daha düşük olacağından ve alüminyum malzemesi dökme demire göre nispeten mekanik olarak daha az tanınan bir malzeme olduğundan, yorulma analizinin daha güvenli bölgede kalınarak değerlendirilmesini gerektirir. Bu yüzden doğrulama parkurundan elde edilen kuvvet verileri ile yorulma analizi yapılan alüminyum tasarımın en az dökme demir kadar yorulma performansı göstermesi beklenmelidir.

3.1.1 Yük ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, sınır şartlarının belirlenmesi gerekir. Bu sınır şartlarının belirlenmesinde ne kadar gerçek araç üzerindeki çalışma şartları doğru aktarılabilirse model o kadar doğru sonuçlar verecektir. Bu alışma kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar modeli, tam araç modelinin kısaltılmış bir halidir. Tam araç modeli daha kapsamlı bir model olması dolayısıyla çözüm vermesi daha uzun zaman almaktadır. Tam araç modelinde ön, arka ve kabin süspansiyon olarak bir çok yük uygulama noktası vardır. Bu çalışmanın konusu olan n süspansiyon braketinin analiz sürelerini kısaltabilmek amacıyla, tüm araç modeliyle neredeyse aynı sonuçları verecek kısaltılmış bir model oluşturulmuştur. n süspansiyon braketinde oluşan hasarın nerdeyse tamamını makas gözü bağlantısından gelen yüklerle oluştuğu tespit edildiği için modelde yük uygulama noktası burası seçilmiştir (Şekil 3.1).

Yine arka süspansiyon kısmı modelden çıkarılarak şasi kolları belirlenen bir uzunluktan itibaren kesilmiştir ve sanki 6 ekseninde mesnetli olarak kabul edilmiştir. Kısaltılmış model ve tam araç modelinin yorulma sonuçları n süspansiyon braketi özelinde incelenmiş ve kısaltılmış modelin neredeyse tam araç modeliyle aynı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Uygulanacak yükler, araç doğrulama parkurunda koşarken toplanan verilerden oluşur. Müşterinin kullanacağı şartları temsil ettiği düşünülen doğrulama parkurundaki koşular belirli tekrar sayılarla nCode yazılımında girilerek ömür hesapları yapılacaktır.

3.1.2 Doğrulama Parkuru Verilerinin Modele Uygulanması

Yorulma analizi için, doğrulama parkurunda koşan araçtan, test pistindeki farklı parkurların araç üzerinde yarattığı kuvvet ve moment değerlerinin toplanması gerekmektedir. Doğrulama parkurunda araç koşarken, parkurların bazılarında yüklü, bazılarında yüksüz sürülmektedir (Tablo 3.2).

Araç doğrulama parkurunda koşturulmadan önce, aracın tekerleklerine tekerlek kuvvet dönüştürücüsü (wheel force transducer) adı verilen sensörler takılmaktadır. Araç doğrulama parkurunda koşarken, zamana bağlı tekerleklere gelen X, Y, Z kuvvet ve moment verileri bu sensörler ile elde edilir. Toplanan kuvvet ve moment verileri, Adams yazılımında kurulan tüm araç modeli ile daha önceden belirlenmiş taşıyıcı noktalara (hardpoint) atanmaktadır. Bu noktalardan biri de alüminyum süspansiyon braketinin yorulma analizinde kullanılan makas bağlantı noktasıdır. Bu noktaya gelen yüklerin elde edilmesiyle yorulma analizinde kullanılacak gerekli zamana bağlı yük verisi elde edilmiş olur.

Tablo 3.2: Doğrulama Parkuru Parkurları ve Tekrar Sayıları

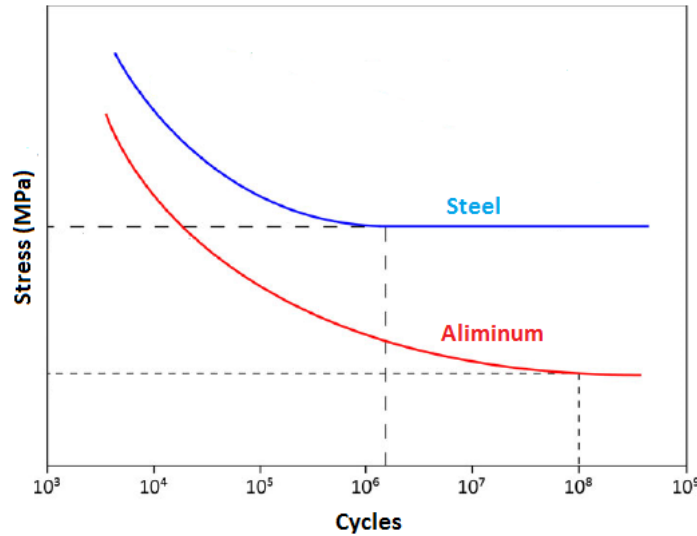
Event	Event description	Number of repeat for 1 life
1	Potholes and bumps	1050
	Curb platform	
2	Chatter bumps	600
3	Resonance and impact	1650
4	Shake road	600
	Simulated broken and concrete patch	
	Simulated wheel fight curve	
	Cobblestones straight	
5	Belgian blocks	600
	Washboard	
	Canted slab	
	Chuckhole lane	
	Crowned intersection	
6	Potholes and bumps	900
	Curb platform	
7	Resonance and impact	900

Yorulma analizinde, parkurların test senaryosundaki tekrar sayısı ve alüminyum süspansiyon braketinin mekanik özellikleri ile yorulma eğrisi denklemine ait katsayılar nCode yazılımına tanımlanmaktadır. Statik birim yük analizinde elde edilen gerilme değerleri ve her parkurun araç modeli üzerinde yarattığı gerilme değerleri, parkurların senaryodaki tekrar sayısı ile çarpılarak nCode yazılımında alüminyum süspansiyon braketinin ömür tahmini yapılabilmektedir. Hesaplanan gerilme değerleri, alüminyum parçanın yorulma eğrisi ile hesaplanarak parçanın yapısal araç testini kaç kez tamamlayabileceği, yorulma analizi ile elde edilmektedir.

3.2 Yorulma Tahmini

Günümüzde, numune parçasını tekrarlanan sabit yüklere maruz bırakarak test sırasında yük miktarı ve çevrim sayısı ölçülerek yorulma eğrileri elde edilmektedir. Test, numune parçası üzerinde çatlakların varlığı veya parça kırılmasıyla sona erer ve çevrim sayısı belirlenir. Bu işlemde, yük ve çevrim sayıları ile ϵ -N eğrisi belirlenir [3]. ϵ -N eğrisinin çıkarılması ve malzeme testi Bölüm 2.2.2’de ayrıntılı gösterilmiştir.

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi düşük gerilmelerde çelik sonsuz ömre sahip olduğu varsayılabilirken, alüminyum malzeme için böyle bir davranış söz konusu değildir [3].



Şekil 3.4 Çelik ve Alüminyum Karşılaştırılması için Gerilme - Ömür Eğrisi [3]

Bu çalışmada alüminyum malzemenin yorulma tahminini için “Birikimli Hasar Teorisi” kullanılmıştır. Farklı yol parkurlarından hesaplanan hasar değerleri doğrusal olarak toplanmıştır.

3.2.1 Uygulanan Yorulma Teorisi ve Metodu

Birikimli hasar teorisini uygulayabilmek için ve doğrulama parkurundaki farklı yol şartlarını temsil edebilmek için iki farklı metot uygulanabilir.

- 1) Yerel Gerilme-Gerinim Yaklaşımı, bir kerelik geçmiş gerilme girdisi kullanan geleneksel bir süreçtir.
- 2) İkincisi, birden fazla ve farklı yorulma durum parkurunun zamana bağlı kuvvet verilerini kullanarak, ayrı ayrı hesaplanan hasar değerlerini birleştirerek ömür tahmini yapan metottur.

Her iki yöntem de yorulma ömrünü hesaplamak için aynı matematik denklemleri kullanır. Birden fazla yorulma durum parkurunu birleştiren metot farklı olarak, tüm yol şartlarının hasarlarını olay tekrarlama sayılarıyla birleştirerek tam yorgunluk ömrünü elde eder. Bu yöntem, ispatlanmış verileri kullanarak parçalarının yorulma ömrünü hesaplayan otomotiv şirketine olanak sağlar. Otomotiv şirketleri seri üretimden önce tasarımlarını doğrulamak için doğrulama parkuru kullanırlar. Doğrulama parkuru, kullanıcının karşılaşılabileceği zorlu yol koşullarını temsil etmek için kullanılır.

Yorulma hesabı, yorulma durum parkurunu birleştiren metot ile bütün parkurların koşullarını hesaba dahil eder (Tablo 3.2).

Doğrulama parkurundaki farklı yol şartlarını birleştiren metot, yorgunluk ömrü tahminini tek eksenli yorulma algoritması kullanarak yapar, tüm yol şartları için yorgunluk hasarı hesaplaması ortak olan kritik bir düzlemde yapılmalıdır.

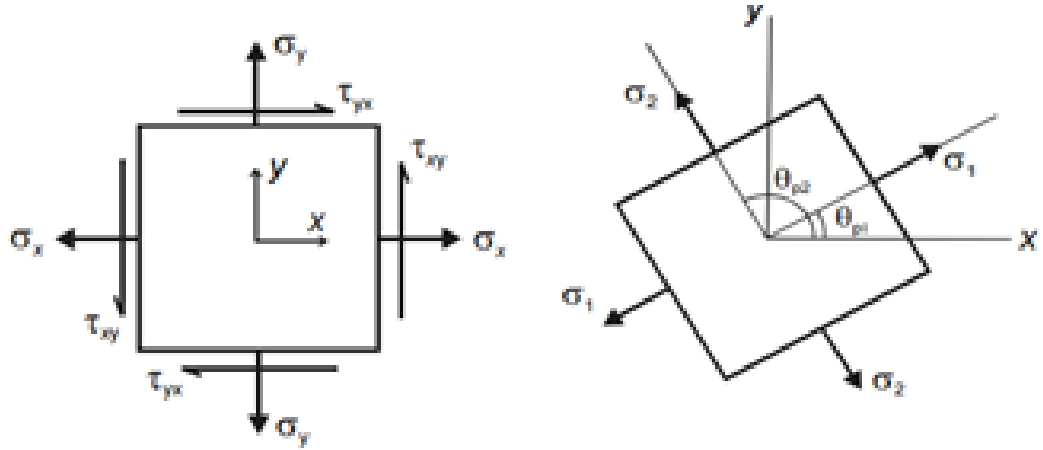
Tüm örnek yol şartlarının, tüm zaman adımlarındaki asal gerilmeler ve asal düzlem açıları hesaplanır ve tüm yol şartları, olay tekrarlama sayılarıyla birleştiren bir histograma dayalı olarak genel bir kritik düzlem belirlenir. Ortaya çıkan asal düzlem açısı, tüm olaylar için ortak kritik düzlem açısıdır. Seçilen tüm kritik elemanların kritik düzlemine dik olan gerilme bileşenleri, tüm doğrulama parkurunun farklı olaylarının her zaman adımında hesaplanır.

Asal Gerilme Denklemi :

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.1)$$

Asal Düzlemi Tanımlayan Asal Açılar Denklemi :

$$\tan 2\theta_p = \frac{2 * \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (3.2)$$



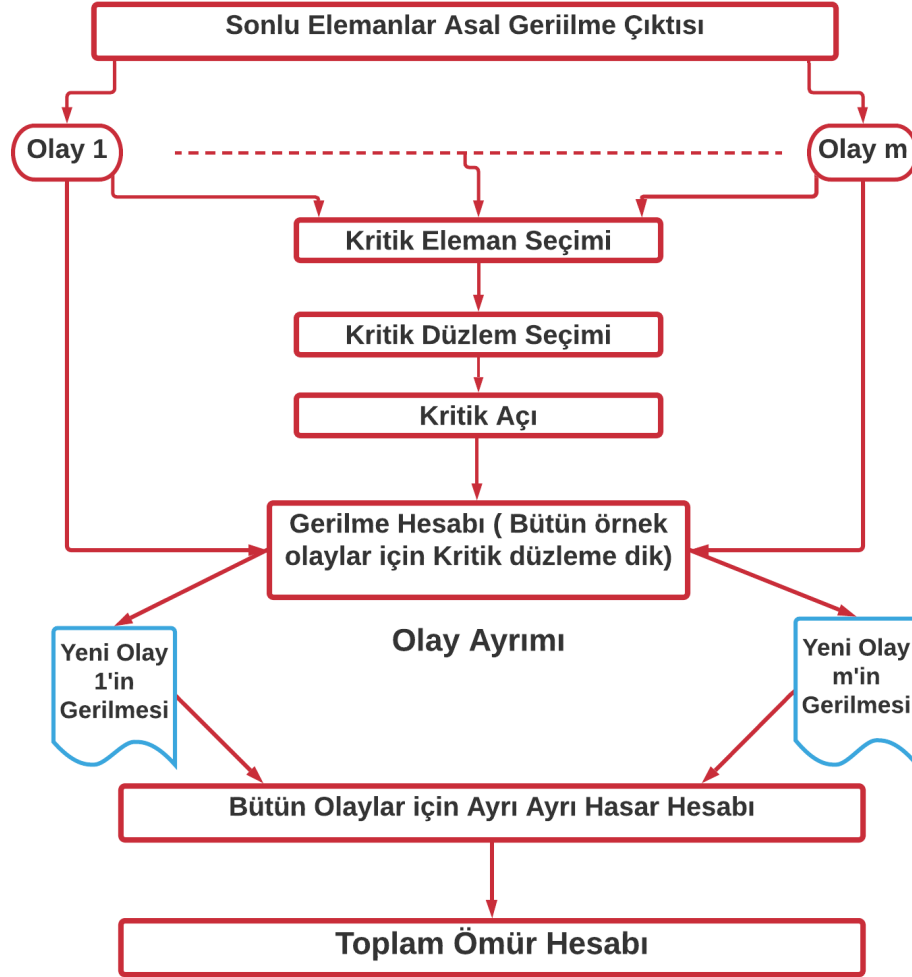
Şekil 3.5 Asal Gerilmeler ve Asal Açılar

Denklem 3.1’de farklı yol koşullarındaki asal gerilmelerin hesabı için kullanılan formül verilmiştir. Denklem 3.2’de ise asal gerilme açısı hesabı verilmiştir ve Şekil 3.5’te Asal Gerilmeler ve Asal Açılarının gösterimi verilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi çıktısı olarak hesaplanan gerilmeler yorulma analizi için daha doğru sonuç vermesi amacıyla asal gerilme olarak hesaplanması tercih edilmiştir. Bu sayede oluşan gerilmenin çeki ve bası olarak ayırt edilmesi sağlanmış olacak ve gerilmenin kritik asal açısı da hesaplanabilecektir. Bu parametreler nCode yazılımına beslenerek ömür hesabı için kullanılmıştır. Doğrulama parkurundaki her bir olay için asal gerilmeler ve asal açılar ayrı ayrı tüm zaman adımlarında hesaplanmıştır. Doğrulama parkurundaki her farklı yol şartı yani olay için de hasar değerleri hesaplanacak ve birikimli hasar teorisine göre toplam hasar bulunacaktır.

Kümülatif Olay Bazlı Yorulma Ömrü Tahmini Akış Şeması :

Abaqus yazılımıyla yapılan birim analiz çıktılarını nCode yazılımına besledikten sonra yorulma hesabının akışını gösteren şema Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Yorulma Hesabı Metodu

Kritik Yorulma Eleman Seçimi :

Bir yapının yorulma ömrü tahmini, yapı yol yüklerine maruz kaldığında ilk eleman çatlağının başlaması tahminine dayanır. Genel yapısal yorgunluk ömrü, yalnızca bu kritik unsurlar tarafından belirlenir. Ömür tahmini, tek eksenli yorgunluk teorisine dayanmaktadır. Teori, çatlağın, çatlak düzleminin normaline karşılık gelen asal gerilim tarafından başlatıldığını ve çatlak düzleminin genel olarak kararlı olduğunu varsayar.

Asıl gerilimler, ana düzlemlerde σ_1^i ve σ_2^i 'dir. Döngüsel gerilim aralığı, yorgunluk ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, eleman asal gerilme aralığı değerleri:

$$\sigma_{p-range}^i = \max \left[\left((\sigma_1^i(t))_{max} - (\sigma_1^i(t))_{min} \right), \left((\sigma_2^i(t))_{max} - (\sigma_2^i(t))_{min} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$i = 1, \dots \dots N \text{ (number of elements)}$$

Tek Eksenli Yorulma Ömrü Tahmini :

Tüm zaman aşamalarındaki asal düzlem açıları hesaplanır ve her bir eleman için gerilim aralığı, oluşum sayısı ve ortalama gerilime dayalı olarak bir kritik düzlem seçilir. Tek eksenli gerilme zaman geçmişi, $\sigma_e^i(t)$, kritik düzleme dik olarak hesaplanır. Neuber Kuralı kullanılarak doğrusal olmayan döngüsel gerilim $\sigma_c^i(t)$ ve döngüsel gerinim $\varepsilon_c^i(t)$ olarak adlandırılan değerler hesaplanır.

$$\sigma_e^i(t) * \sigma_e^i(t) * E = \sigma_c^i(t) * \varepsilon_c^i(t) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_c^i(t) = \left(\frac{\sigma_c^i(t)}{E} \right) + \left(\frac{\sigma_c^i(t)}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.5)$$

$K = \sigma_f/(\varepsilon_f)^n$: Yorulma mukavemet katsayısı (Cyclic Strength Coefficient)

$n = b/c$: Döngüsel Gerinim Katsayısı (Cyclic Strain Coefficient)

σ_f : Yorulma Mukavemet Katsayısı (Fatigue Strength Coefficient)

ε_f : Sünek Yorulma Katsayısı (Ductility Strength Coefficient)

b : Yorulma Dayanımı Üssü (Fatigue Strength Exponent)

c : Yorulma Süneklik Üssü (Fatigue Ductility Exponent)

Her gerinim genliği için, kırılma çevrim sayısı N_f , Smith-Watson-Topper ortalama gerilim düzeltmesi kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma_{max} * \varepsilon_a = (\sigma_f^2 / E) * (N_f)^{2b} + \sigma_f * \varepsilon_f * (N_f)^{b+c} \quad (3.6)$$

σ_{max} ve ε_a maksimum gerilim ve Şekil değiştirme genliğidir.

Kümülatif Hasar Hesaplaması :

Örnek olay h'deki element için kümülatif hasar, Palmgren – Miner Kuralı kullanılarak hesaplanır:

$$D_i = \sum_k \frac{N_k^i}{(N_f)_k} \quad (3.7)$$

D_i , i elemanın hasarı olduğuunda, N_k^i , k gerinim genliğindeki çevrim sayısıdır, $(N_f)_k$, k gerinim genliğinde kırılma çevrim sayısıdır.

Miner kümülatif hasar teorisinde, tüm döngü oranlarının toplamı bire eşit olduğuunda kırılma meydana geldiği varsayılır. Yorgunluk ömrü şu şekilde hesaplanır :

$$L_i = \frac{1}{D_i} \quad (3.8)$$

Burada, L_i , çatlak başlamadan önce elemanın dayanabileceği yük ve tekrar sayısı geçmişinde eleman i'nin yorulma ömrüdür.

3.2.2 Süspansiyon Braketinin Yorulma Ömrü Tahmini

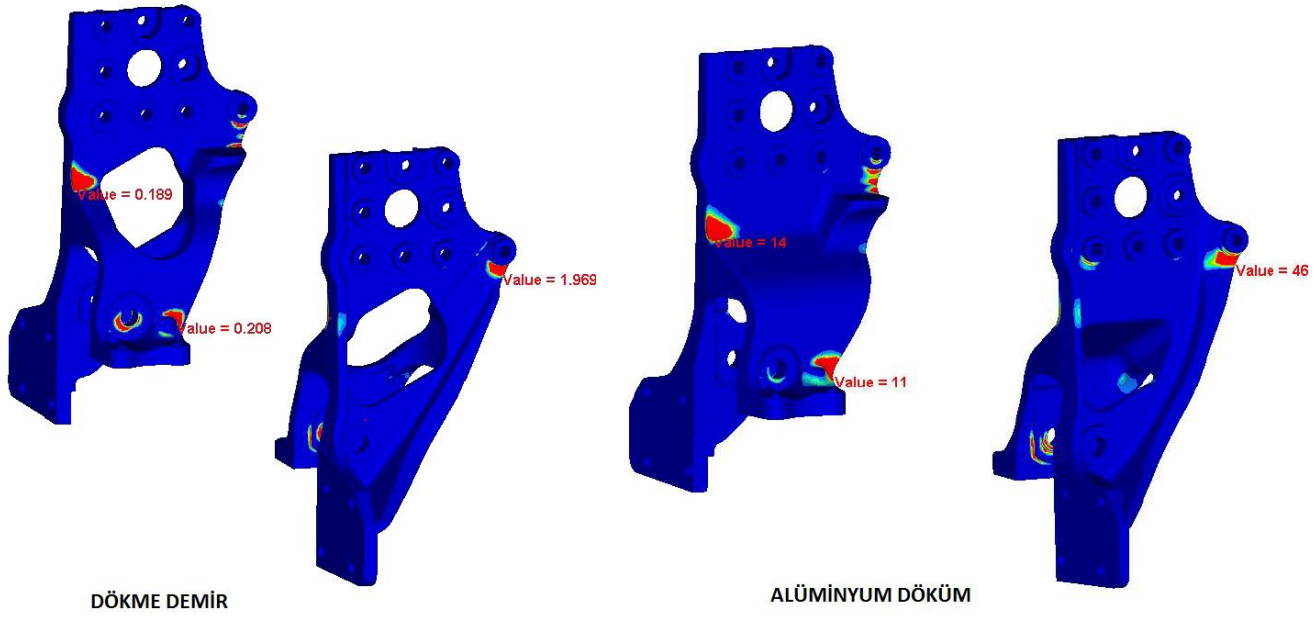
Dökme demirden imal edilmiş parçanın bağlantı yerleri ve oturma yüzeyleri gibi tasarım koşullarında herhangi bir değişiklik yapılmadan, yeni alüminyum döküm parçanın tasarımına başlanmıştır. Alüminyum döküm süspansiyon braketinin yorulma performansının daha düşük olmasından dolayı kritik parça bölgelerinde yükleme koşullarına ve parça kesitlerine göre takviye yapılmıştır. Kullanılacak alçak basınçlı döküm yöntemine uygun olarak kalıp çıkış açıları, malzeme akışı ve soğutma parametreleri dikkate alınarak yeni geometri tasarlanmıştır.

Tasarımın ilk aşamasında birim alandaki gerilme miktarını azaltmak için duvar kalınlıkları artırıldı. Ağırlık azaltma amaçlı dökme demir tasarımının ortasında yer alan boşaltma alanı iptal edilerek alüminyum tasarım bilgisayar destekli analiz için hazırlandı. Parça geometrileri Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



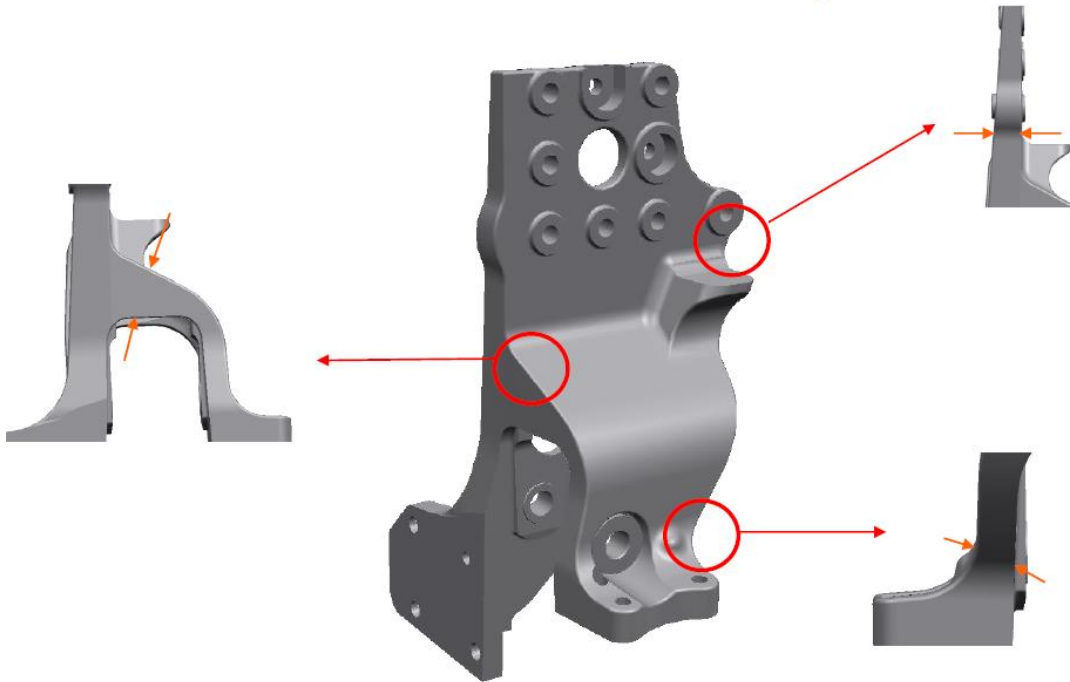
Şekil 3.7 Dökme Demir Tasarımdan Alüminyum Tasarıma Geçiş

Dökme demir tasarımının kritik bölgelerinden edinilen tecrübeye göre, alüminyum tasarım güçlendirilerek sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır. Buna göre oluşturulan alüminyum geometri, dökme demir tasarım ile karşılaştırmalı analizler yapılarak sonuçları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Dökme Demir ve Alüminyum Dizayn Karşılaştırmalı Analiz Sonuçları

Yapılan ilk analizlerde alüminyum tasarımın güçlendirilmesi gereken noktalar tespit edilmiştir. Lokasyon bazında ömür değerleri dökme demir tasarımından düşük olan bölgelerine Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da görülen tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

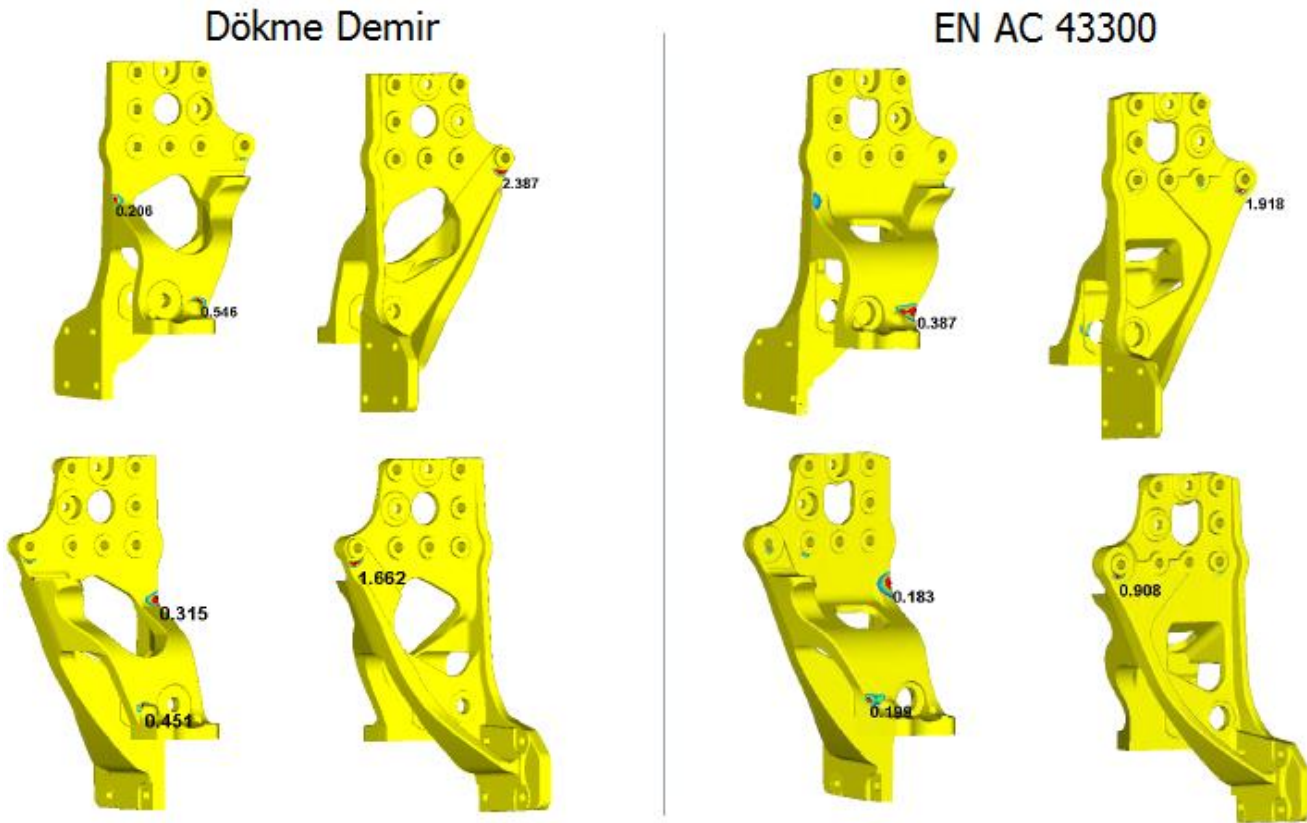


Şekil 3.9 Yorulma Analizi Sonucunda İyileştirme Alanları Soldan Görünüş



Şekil 3.10 Yorulma Analizi Sonucunda İyileştirme Alanları Sağdan Görünüş

Gerekli tasarım iyileştirmelerinden sonra Şekil 3.11’de karşılaştırmalı ömür sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.11 İyileştirme Sonrası Karşılaştırmalı Analizler

Tasarım iyileştirmeleriyle elde edilen alüminyum döküm tasarımının, dökme demir tasarımı kadar iyi bir yaşam performansı elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu sayede elde edilen yeni alüminyum döküm tasarım dökme demire çok daha hafif bir hale gelmiştir.

Alçak basınçlı alüminyum döküm üretim yöntemi ile elde edilen tasarım, dökme demir malzemenin piyasa ömrü boyunca kanıtlanmış ömrüne göre iyileştirilmiş ömür değerlerine ulaşabilmiştir. Bununla birlikte ağırlık azaltma hedefi doğrultusunda, malzeme değişikliği ile % 30 daha hafif tasarım hedefine ulaşılmıştır. Nihai tasarım Şekil 3.12’de görülebilir.

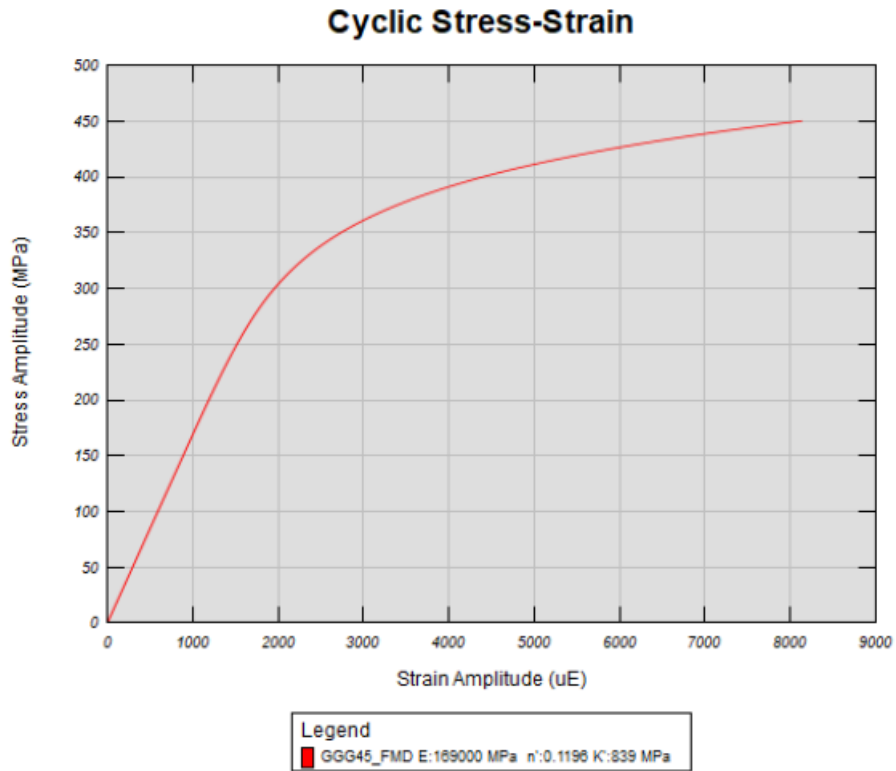


Şekil 3.12 Nihai Dökme Demir ve Alüminyum Tasarımlar

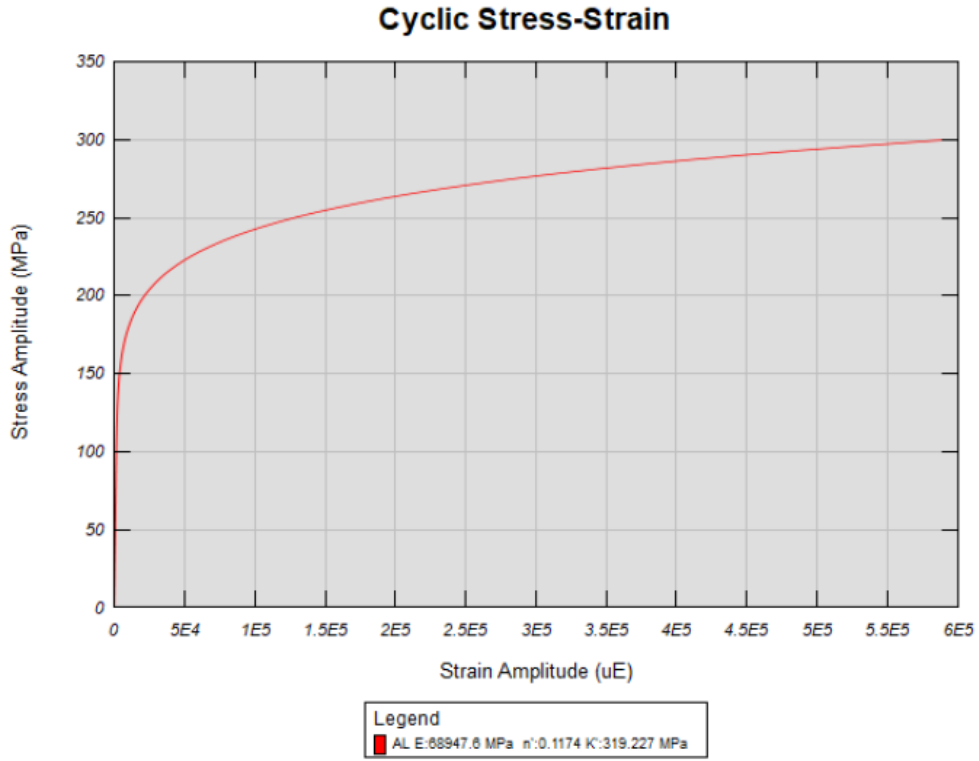
3.2.3 Yorulma Analizinde Kullanılan Çevrimsel Gerilme Gerinim Eğrileri

Bölüm 2.2.2’te ayrıntılı biçimde anlatılmış olan alüminyum ve dökme demir malzemelerinin, nCode yazılımında kullanılan Çevrimsel Gerilme Gerinim Eğrileri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde dökme demirin yorulma performansının alüminyuma göre çok daha üstün olduğu görülebilir.

Bu malzeme kartları kullanılarak nCode yazılımında alüminyum ve dökme demir tasarımlarının yorulma ömürleri hesaplanmıştır. Alüminyum tasarımın en az, dökme demir için hesaplanan ömür değerlerinden yüksek olması beklenmiştir.



Şekil 3.13 Dökme Demir Malzeme Eğrisi



Şekil 3.14 Alüminyum Malzeme Eğrisi

3.3 Sonlu Elemanlar Titreşim ve Rijitlik Modelinin Oluşturulması

3.3.1 Şasi Titreşim Analizi

Ön süspansiyon braketinin tasarımı dökme demir yerine alüminyum döküme geçilmesi sırasında; ağırlık değişimi ve rijitlik değişimi nedeniyle çekici şasinin titreşim ve rijitlik analizleri yapıp aracın hedef değerlerine uygunluğu kontrol edilmelidir. Şasi titreşim analizinde yatay eğilme, dikey eğilme ve burulma modu frekansları incelenmekte ve hedef değerlerle karşılaştırılmaktadır.

Hedef değerler, rakip araçların (Mercedes, DAF ve Renault vb.) şasi titreşim karakteristikleriyle karşılaştırılarak elde edilmektedir. Analiz sonuçlarının hedef değerlerin üzerinde olması beklenmektedir.

Şasi modal analizi 6 ekseninde geometrinin serbest olduğu kabulüyle yapılmaktadır (Şekil 3.15). Şasi sisteminde kullanılan parçaların elastisite modülleri, geometrileri ve ağırlıkları yazılıma girdi olarak tanımlanmaktadır.



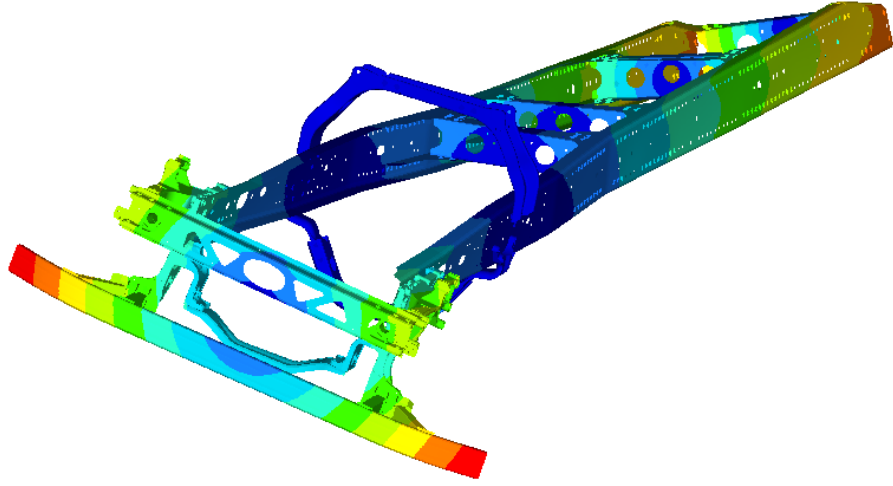
Şekil 3.15 Modal ve Rijitlik Analizlerinde Kullanılan Geometri

Şasi modal analizi, şasi sisteminin toplam ağırlığı ile rijitliğini (k) dikkate alarak ve sönümleyici eleman olmadığını varsayarak, özdeğer (eigenvalue) problemini çözmeye çalışmaktadır. Özdeğer problemi denklemi, Denklem 3.9’da gösterilmiştir.

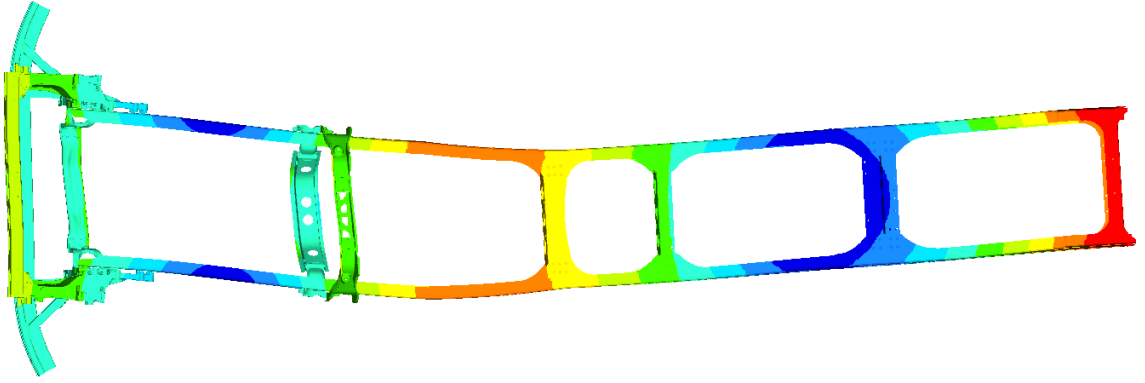
$$M * \ddot{X} + k * X = 0 \quad (3.9)$$

Modelde kullanılan ağ elemanı sayısı kadar özvektör hareketi çıkmaktadır. Yukarıdaki problemi çözerek her bir frekans değerinde birim elemanların özvektör hareketleri hesaplanmakta ve bunların birbirlerine göre hareketinden mod şekli belirlenmektedir. Bu analizde, ilk yirmi frekansın özvektör sonuçları dikkate alınmakta, diğer modlar incelenen aralıktaki karakterisitk modları ifade etmemektedir.

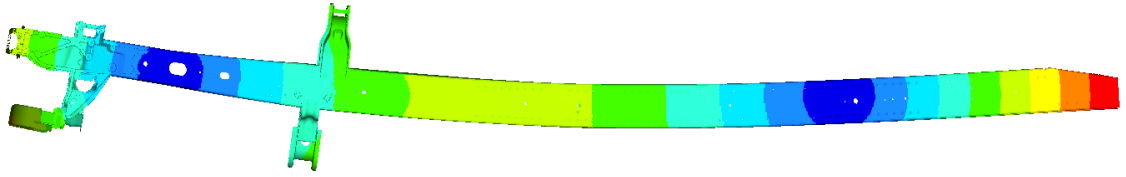
Genellikle birinci frekans burulma modunu (Şekil 3.16), ikinci frekans yatay eğilme modunu (Şekil 3.17) ve üçüncü frekans dikey eğilme modunu (Şekil 3.18) göstermektedir.



Şekil 3.16 Burulma Modu



Şekil 3.17 Yatay Eğilme Modu



Şekil 3.18 Dikey Eğilme Modu

Tablo 3.3: Modal Analiz Sonuçları

Modal Analiz	Burulma Modu (Hz)	Yatay Eğilme Modu (Hz)	Dikey Eğilme Modu (Hz)
Hedef	7.8	17.4	32.6
Dökme Demir Tasarım	7.8	18	35
Alüminyum Döküm Tasarım	7.7	17.5	33

Yapılan şasi modal analizi sonucunda, dikey eğilme modu ve yatay eğilme modunun hedef değerleri karşıladığı görülmüştür. Burulma modu, dökme demir için tam sağlarken alüminyum süspansiyon braketindeki değerin kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

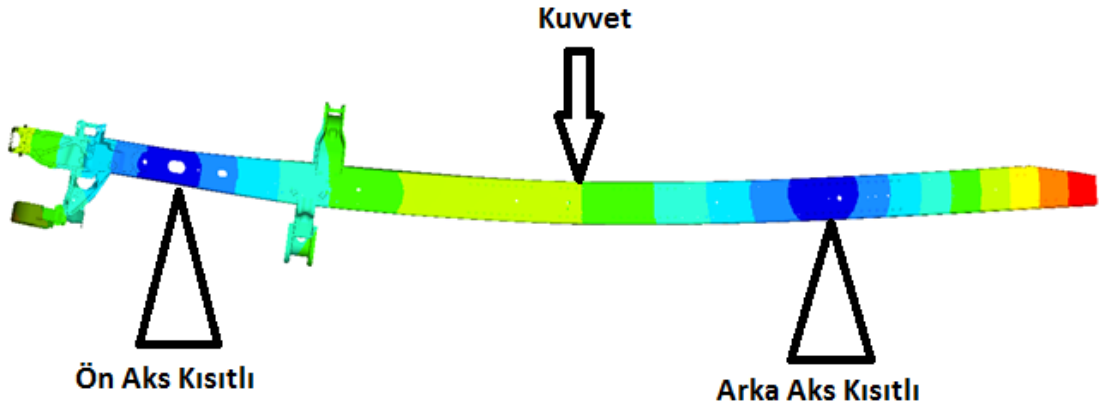
Şasi titreşim analizi sonuçlarına göre, alüminyum döküm ön süspansiyon braketinin, dökme demire göre kabul edilebilir titreşim karakteristiği sergilediği görülmüştür.

3.3.2 Şasi Rijitlik Analizi

Süspansiyon braketi tasarımı dökme demirden alüminyum döküme dönüştürülmesi sırasında; geometri farklılığı ve malzemeler arasındaki elastisite modülü farkı nedeniyle şasisinin rijitlik analizinin tekrarlanması gerekmektedir.

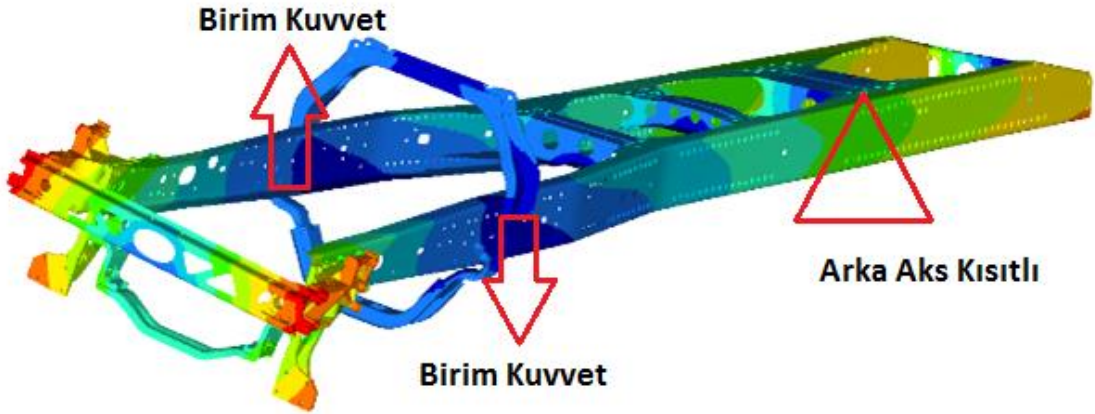
Şasinin dikey eğilme rijitliği ile burulma rijitliği hesaplanmakta ve rakip araçların şasi rijitlik değerlerinden hedef olarak belirlenen değerlere göre yüksek olması gerekir.

Dikey eğilme rijitliği analizinde, şasi sisteminin iki aks üzerinden sabitlendiği düşünülerek, iki aksın tam ortasındaki bölgeden birim kuvvet uygulanır ve elde edilen birim Şekil değiştirmeden dikey rijitlik değeri hesaplanır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Dikey Eğilme Rijitliği Analizi

Burulma rijitliği analizinde, şasi sistemi arka akstan ve ön traversin orta noktasından dönme eksenini kısıtlayacak şekilde sabitlenmektedir. Ön aksın sağ ve sol taraflarından birbirine zıt yönlü iki adet birim kuvvet uygulanarak burulma momenti uygulanmaktadır (Şekil 3.20). Böylelikle, kuvvetlerin uygulandığı noktaların birbirine göre birim açısal yer değişimi ile oluşturulan momente bölünmekte ve burulma rijitliği hesaplanmaktadır.



Şekil 3.20 Burulma Rijitliği Analizi

Tablo 3.4: Rijitlik Analizi Sonuçları

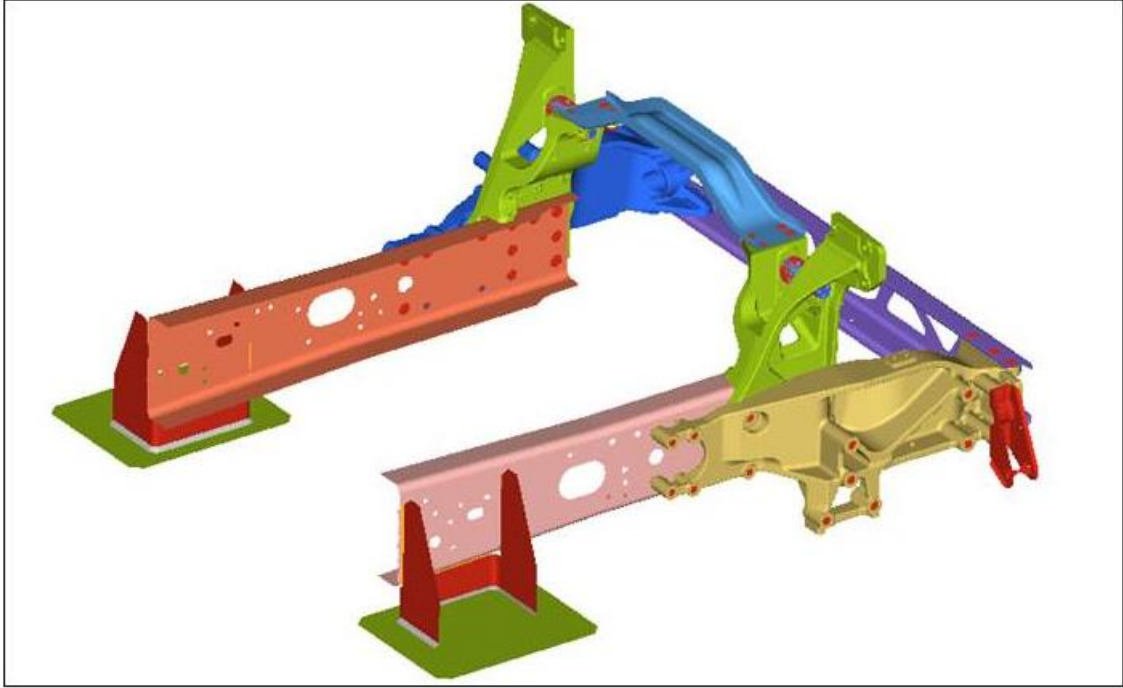
Rijitlik Analizi	Eğilme Rijitliği (kN/mm)	Burulma Rijitliği (kN/mm)
Hedef	15.3	100.5
Dökme Demir Tasarım	17.5	125.7
Alüminyum Döküm Tasarım	16	110

Şasi rijitlik analizi sonuçlarına göre, alüminyum tasarımın, şasinin dikey eğilme rijitliği ile burulma rijitliği hedef değerleri karşıladığı görülmüştür. Böylelikle alüminyum döküm tasarım, şasi rijitik ve titreşim karakteristiğinin gerekliliklerini sağlamıştır.

4 TASARIM DOĞRULAMA TESTLERİ

Bilgisayar destekli analizlerle tasarlanan alüminyum döküm tasarım, kullanıcıya verilmeden yani araca takılmadan önce rig testlerinde doğrulanması gerekir. Bu yüzden de alüminyum tasarımın doğrulanması için araç parkur testi daha maliyetli olacağından rig testi tercih edilmiştir. Süspansiyon braketine makas bağlantısından gelen zamana bağlı kuvvet verileri rig testinde piston ile uygulanmıştır.

Alüminyum braketin araç sınır koşullarını sağlayacak şekilde rig testi kurulmuştur. Bu sayede süspansiyon braketin gerçek çalışma koşulları rig testine yansıtılmaya çalışılmıştır. Bu sebeple süspansiyon braketine bağlı üst döküm uzatma braketi, şasi kolları, ön travers ve şanzıman traversi rig testine dahil edilmiştir (Şekil 4.1).

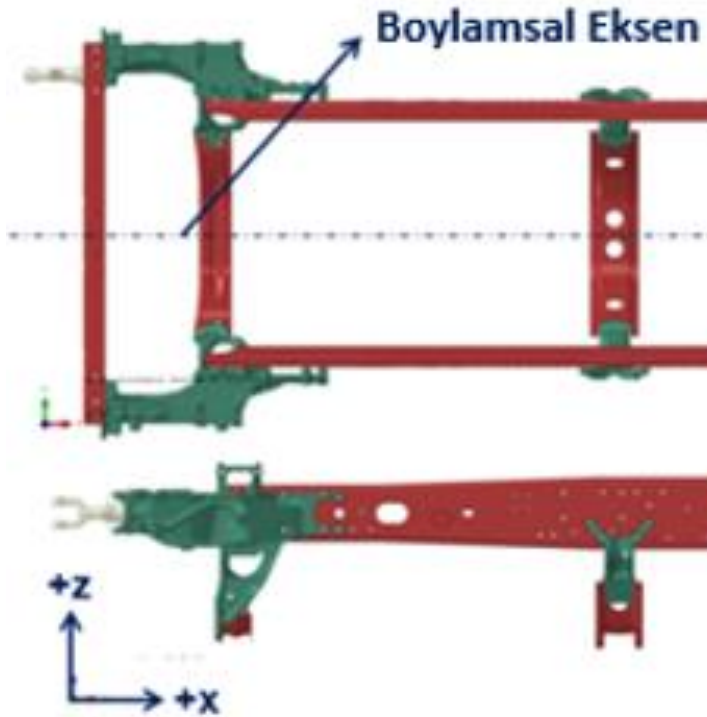


Şekil 4.1 Rig Testi CAE Modeli

4.1 Süspansiyon Braketi Tasarımının Rig Testi ile Doğrulanması

Rig testi kurulurken ana hedef parçanın araç üzerindeki çalışma koşullarını rig testine yansıtmaktır. Bununla birlikte rig testinin uygulanabilir olabilmesi ve maliyet açısından uygun olması da önemlidir. Bu yüzden şasi kollarının rijitliğini modele yansıtabilecek uzunlukta kesilip, rig testine dahil edilmiştir. Yine motor traversinin aracın ön bölgesindeki rijitliğe etkisi olacağı için modele dahil edilmiştir (Şekil 4.2).

Sistem yere paralel şekilde oturtulmuş, rijitliği çok yüksek parçalarla zemine sabitlenmiştir.

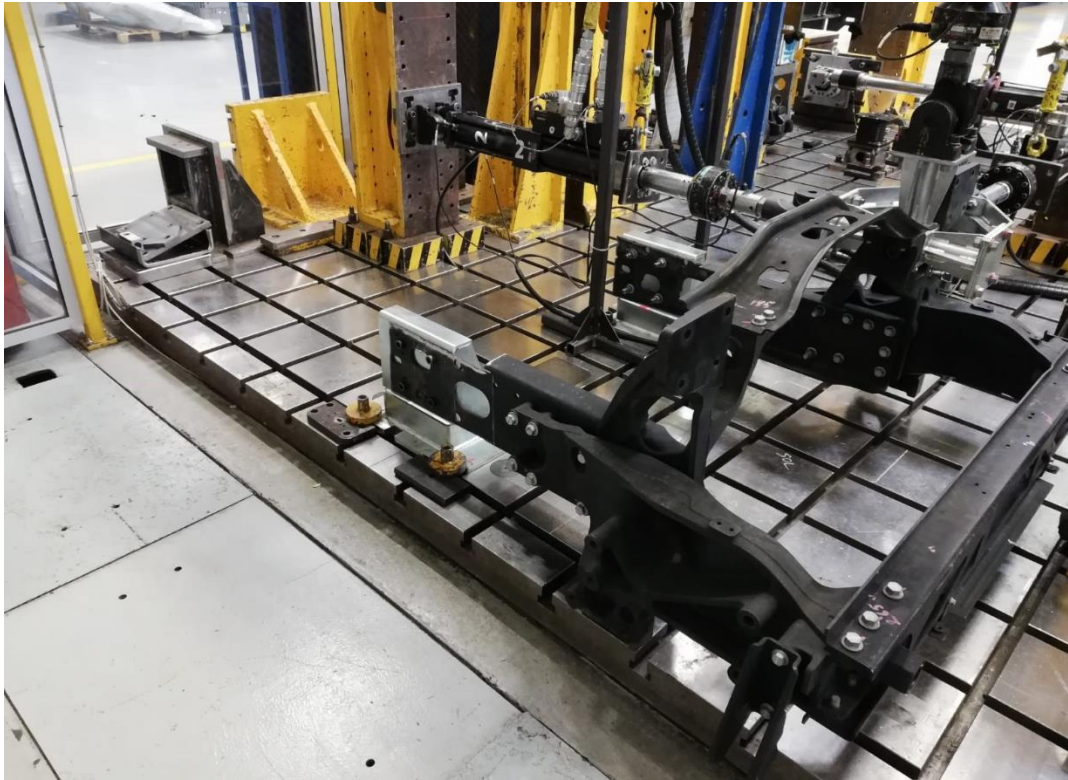


Şekil 4.2 Rig Testinde kullanılacak Geometri ve Eksen Takımı

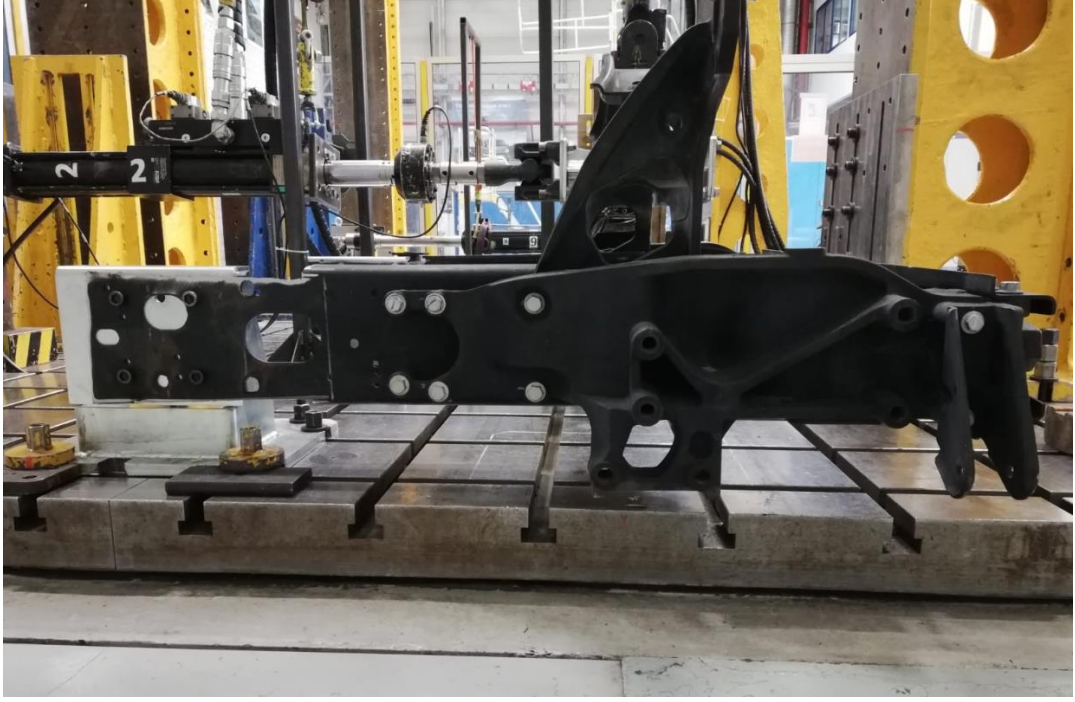
4.1.1 Rig Testi Kurulumu

Rig testi kurulurken kuvvetin piston vasıtasıyla rahatça uygulanabilmesi ve şasi kollarından sistem kolayca 6 eksenle sabitlenebilmesi için, araçtaki konumuna göre ters biçimde oturtulmuştur (Şekil 4.3).

Piston, zamana bağlı kuvvet verisini uygulayabilecek kapasiteye sahiptir. Rig testi önce dökme demir tasarım için kurulmuş ve teste başlanılmıştır. Bölüm 3.1.2’de detaylıca anlatılan doğrulama parkuru verileri dökme demire uygulanmış ve testi hasarsız tamamlayacağı öngörülmüştür. Aynı şekilde alüminyum döküm tasarımının, dökme demir gibi aynı testi hasarsız atlatması gerektiği bilgisayar destekli analizlerle ortaya konulduğundan rig testinde de aynı performansı sergileyeceği öngörülmüştür.



a)



b)
Şekil 4.3 Rig Testi Görselleri

4.1.2 Rig Testi Sonuçları ve Yapılan Çıkarım

Doğrulama parkurundan elde edilen, süspansiyon braketinin maruz kalacağı zamana bağlı kuvvet verileri rig testinde piston vasıtası ile uygulanmıştır. Süspansiyon braketine gelebilecek en yüksek yükler makas bağlantısından geldiği bilinmektedir. Bu yüzden rig testi bu yükler uygulanarak tamamlanmıştır. Bu yükler ve tekrar sayıları Bölüm 3.1.2’de anlatılmıştır.

Doğrulama parkurunun tam bir turunu temsil eden yük ve tekrar sayıları uygulandığında beklendiği gibi daha önceden doğrulanmış tasarım olan dökme demir hasar almamıştır. Bu testte amaçlanan, aynı şartlar altında alüminyum döküm tasarımın, dökme demir tasarımın performansını karşılayabilmesidir.

Rig testleri bu şartlar altında tamamlanmış, alüminyum döküm tasarım testi hasarsız geçmiştir.

Çalışmada, kamyon süspansiyon sisteminde kullanılan dökme demirden üretilmekte olan ön süspansiyon braketlerinin alüminyum döküm tasarıma geçirilerek ağırlık azaltma çalışması konu edilmiştir. Dökme demir yerine alüminyum döküm kullanılarak araçta %30 ağırlık azaltılması hedefine ulaşılmıştır. Böylece daha hafif bir tasarımla aynı mukavemet ve yorulma performansı sağlanabileceği gösterilmiş, ağır ticari araçlar için çok önemli olan yük taşıma kapasitesinin artırılması ve yakıt sarfiyatının azaltılması sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında referans model olarak hali hazırda mevcut araçlarda kullanılan dökme demir tasarım kabul edilmiştir. Bu yüzden dökme demirin üretim yöntemleri incelenmiş ve alüminyum tasarımda kullanılacak üretim yöntemine karar verilmiştir. Üretim yöntemi olarak 3 farklı metot karşılaştırılmış, maliyet ve dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak alçak basınçlı döküm yöntemi uygun görülmüştür.

Alçak basınçlı döküm üretim yöntemine göre parça geometrisi kalıptan hatasız biçimde çıkabilmesi için gerekli tasarım aksiyonları belirlenmiştir. Bununla birlikte mukavemet, yorulma ve titreşim hedeflerini sağlayabilmek için tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır.

Ön süspansiyon braketlerinin tasarım aşaması tamamlandıktan sonra parça statik, dinamik ve yorulma analizlerine tabi tutulmuştur.

Süspansiyon braketinin gerekli mukavemet ve yorulma şartlarını karşılayabilecek malzemenin seçilebilmesi için örnek alüminyum malzeme test edilmiştir. Malzeme testlerinden, gerinim - gerilme eğrisi ve yorulma eğrisi elde edilmiştir. Bu malzeme eğrileri sonlu elemanlar modelinde kullanılarak, rig testlerinden önce alüminyum tasarımın dökme demir performansını karşılayıp karşılamadığı ortaya koyulmuştur.

Mukavemet ve yorulma analizlerinin ardından, şasi titreşim ve rijitlik analizleri yapılmıştır. Şasi titreşim analizi sonuçlarına göre, alüminyum süspansiyon braketlerinin dahil olduğu şasi karakteristik doğal frekansları hesaplanmıştır. Burulma modu, dikey eğilme modu ve yana eğilme modu elde edilmiştir. Sonuçlara göre alüminyum süspansiyon braketinin karakteristik modlarının doğal frekans değerleri, hedef değerlerle karşılaştırılmış ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğuna karar verilmiştir.

Şasi rijitlik analizi yapılmış ve alüminyum süspansiyon braketlerinin dahil olduğu, şasi rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Burulma rijitliği ve dikey eğilme rijitliği elde edilmiştir. Sonuçlara göre alüminyum süspansiyon braketinin burulma rijitliği ve dikey eğilme rijitliği değerleri, hedef değerlerle karşılaştırılmış ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğuna karar verilmiştir.

Alüminyum süspansiyon braketini içeren şasi yorulma ve mukavemet analizleri yapılmıştır. İlk oluşturulan alüminyum döküm tasarım, dökme demir performansını karşılayamadıysa da yapılan tasarım aksiyonlarıyla alüminyum döküm tasarımın gerekli yorulma ve mukavemet değerlerini karşılayabildiği sonlu elemanlar analizinde gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar modelleriyle doğrulanan alüminyum süspansiyon braket tasarımı son olarak rig testinde doğrulanmıştır. Rig testi sonlu elemanlar sınır koşullarını karşılayacak şekilde tasarlanmış ve test sonucunda alüminyum süspansiyon braket hasarsız biçimde testi geçmiştir.

Nihai olarak, dökme demir ön süspansiyon braketinin tasarımı alüminyum döküm tasarıma geçirilmiş ve toplamda yaklaşık yüzde 50 kadar ağırlık azaltması elde edilmiştir. Aracın toplam ağırlığı azaltıldığı için taşınabilecek faydalı yük miktarı arttırılmış ve yakıt ekonomisine katkıda bulunulmuştur.

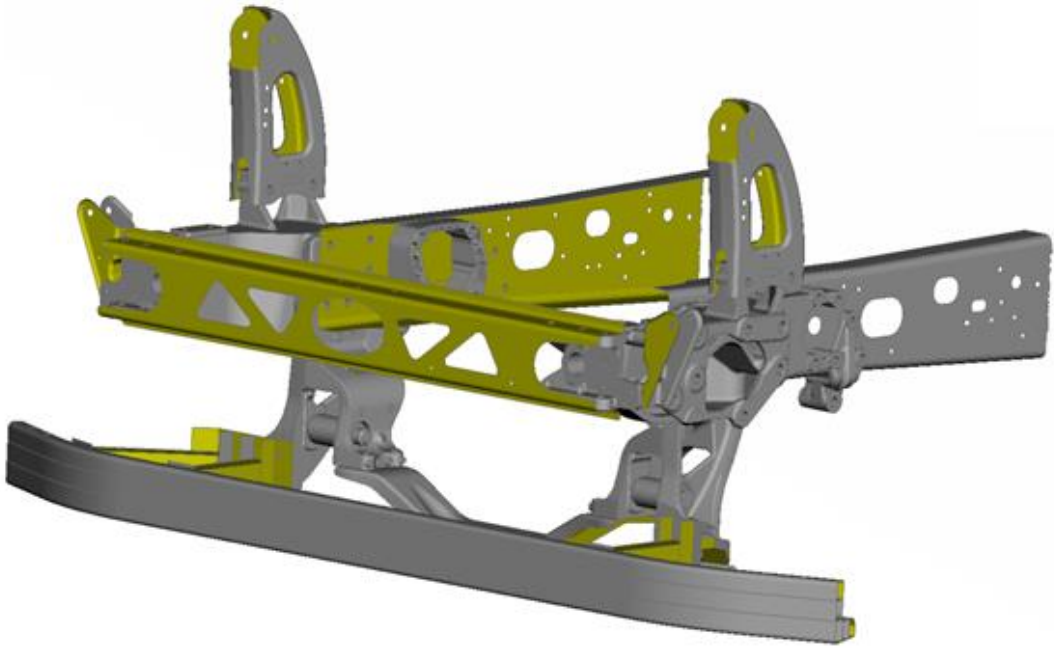
Bundan sonra otomobil süspansiyon parçalarında yapılacak ağırlık azaltma çalışmalarında alternatif malzemelerin kullanımı denenebilir. Kompozit malzemeler üzerinde yapılacak yorulma çalışmalarıyla daha hafif tasarımlar elde edilebilir.

-
- [1] Sadeler, R., Totik, Y., Gavgalı, M., Kaymaz I., (2003). "Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening", *Materials and Design* 25 (2004) 439–445.
- [2] Url-1 <<http://web.deu.edu.tr>>, Birol Y., Malzeme Bilimi, alındığı tarih 16.04.2019.
- [3] Richard G., (2017). "Stress-Life Fatigue Testing Basics" *Quality Magazine*.
- [4] Maskery, N.T. Aboulkhair, C. Tuck, R.D. Wildman, I.A. Ashcroft, N.M. Everitt, R.J.M. Hague, "Fatigue performance enhancement of selectively laser melted aluminium alloy by heat treatment" 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin, Texas, USA, 2015.
- [5] Budgen, N.F. (1947) *Aluminium and its alloys*. London: Pitman.
- [6] Brown, J. (1999). *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Pressure Diecasting of Aluminium Alloys (1st ed., Ch. 9, pp. 108-117). Butterworth-Heinemann.
- [7] Hebeisen, C.J. & Cox, M.B. (2004). The Effect of HIP Processing on the Properties of A356 T6 Cast Aluminum Steering Knuckles. *SAE Paper 2004-01-1027*.
- [8] Borns, R. & Whitacre, D. (2005). Optimizing Designs of Aluminium Suspension Components Using an Integrated Approach. *SAE Paper 05M-2*.
- [9] Cole, G. S. & Sherman, A. M. (1994). Lightweight Materials for Automotive Applications, *International Metallographic Society Symposium on "Microstructural Characterization of Lightweight Materials for Transportation,"* Montreal, July 24-25, 1994.
- [10] Borns, R. & Whitacre, D. (2005). Optimizing Designs of Aluminium Suspension Components Using an Integrated Approach. *SAE Paper 05M-2*.
- [11] Hirsch, J. (2014). Recent Development in Aluminum For Automotive Applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society*, 24. 1995-2002.
- [12] Novikov, İ.İ. (2012). *Metallerin Isıl İşlem Teorisi (1. Basımdan Çeviri)*, Ankara Nobel Akademik Yayıncılık.

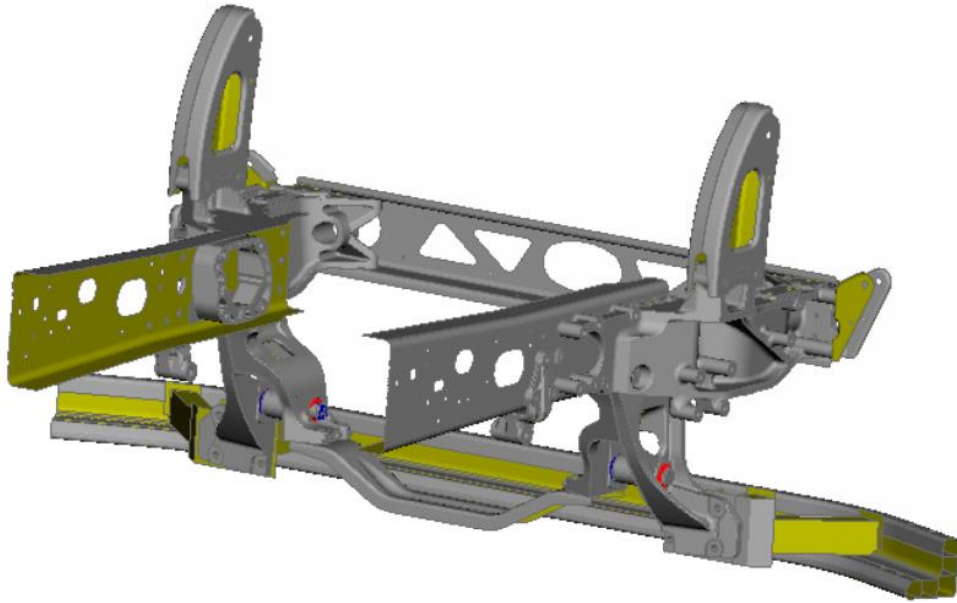
- [13] Topbaş, M. A. (1993). Endüstri Malzemeleri 1. Cilt, İstanbul Yıldız Yayınları.
- [14] Shan, D., Zhen, L. (2012). Aging Behavior and Microstructure Evolution in the Processing of Aluminum Alloys.
- [15] Keshavaram, G., Seiler, D. & DeWitt, D. (2000). Aluminum Alloys for Automotive Knuckle Castings. *SAE Paper 2000-01-1291*.
- [16] William, G., Shoukry, M.S. & Prucz, J.C. (2011). Analysis of Lightweighting Design Alternatives for Automotive Components. *SAE Paper 2011-01-2287*.
- [17] Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A.J., Smet, P.D., Haszler, A., Vieregge, A. (2000). Recent Development in Aluminum Alloys For the Automotive Industry. *Materials Science and Engineering* (A280, pp. 37–49).
- [18] Mallick, P. K. (2010). Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles. In Benedyk, J.C. (Eds.), *Aluminum Alloys For Lightweight Automotive Structures* (Ch. 3, pp. 79-113). Woodhead.
- [19] Url-2 <<http://www.caliskanmetalkrom.com/aluminyum-dokum/aluminyum-dokum-1/>>, online 08.03.2020.
- [20] Cole, G. S. & Sherman, A. M. (1994). Lightweight Materials for Automotive Applications, *International Metallographic Society Symposium on "Microstructural Characterization of Lightweight Materials for Transportation,"* Montreal, July 24-25, 1994.
- [21] Hirsch, J. (2004). Automotive Trends in Aluminium - The European Perspective. *Materials Forum*, (V. 28, pp. 15-23).
- [22] Triantos, D. & Michaels, M. (1999). Design and Fabrication of an Aluminum Engine Cradle for a General Motors Vehicle. *SAE Paper 1999-01-0659*.
- [23] Rowe, J. (2012). Advanced Materials in Automotive Engineering. In Mallick, P. K. (Eds.), *Advanced Materials for Automotive Applications : An Overview* (Ch. 2, pp. 5-27). Cambridge: Woodhead.
- [24] Boileau, J. M. and Allison, J. E. (2001). The Effect of Porosity Size on the Fatigue Properties in a Cast 319 Aluminum Alloy, *SAE Paper 2001-01-0818*.

- [25] Couper, M.J., Neeson, A.E. and Griffiths, J.R. (1990). Fatigue Fract. of Engg. Materials and Structures, 213-227.
- [26] Butz, G. A. and Nordmark, G. E. (1964). Fatigue Resistance of Aluminum and Its Products, *SAE Paper 893E*.
- [27] Bonollo, F., Urban, J., Bonatto, B. & Botter, M. (2005). Gravity and Low Pressure Die Casting of Aluminium Alloys: A Technical and Economical Benchmark. *La Metallurgia Italiana*, (pp. 23-32).
- [28] Mus, C., Mattiel, M., Valzan, D., Delbianco, A. & Tucker, J. (2001). Innovative Foundry Technologies for Safety Aluminum Suspension Parts and Complex Castings. *SAE Paper 2001-01-0407*.
- [29] Url-3 <<https://www.cihanaydokum.com/kokil-dokum-2/>>, online 22.03.2020
- [30] Brown, J. (1999). Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. *Low Pressure and Gravity Diecasting* (1st ed., Ch. 10, pp. 118-134). Butterworth-Heinemann.
- [31] Url-4 <<http://bayrammetal.com.tr/bayram/pdf/EN%20AB%20and%20AC%2043300.pdf>>, online 28.03.2020.
- [32] Jahed, H., Varvani-Farahani, A., Noban, M., Khalaji I. (2007). An energy-based fatigue life assessment model for various metallic materials under proportional and non-proportional loading conditions. *International Journal of Fatigue*.

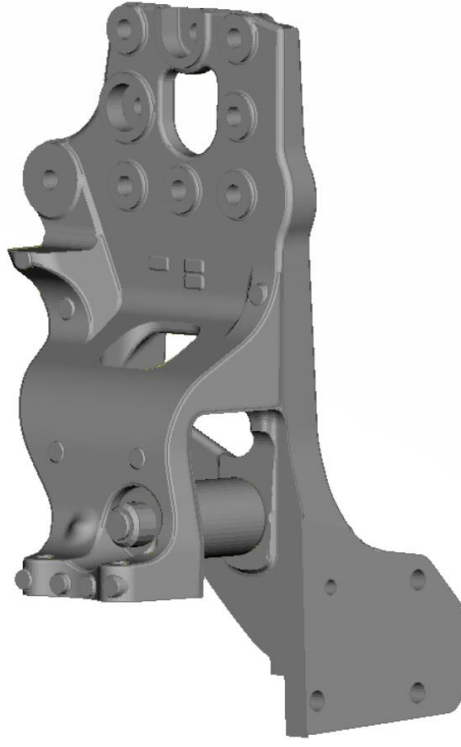
SONLU ELEMANLAR MODELİ



Şekil A.1 Sonlu Elemanlar Modeli Önden Görünüm



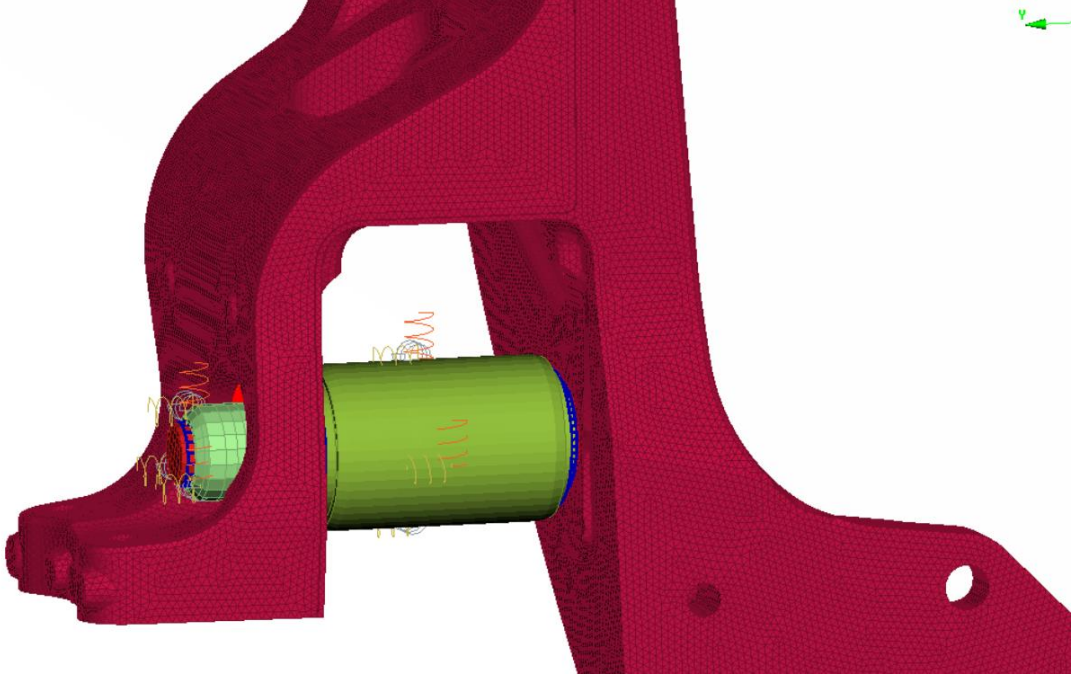
Şekil A.2 Sonlu Elemanlar Modeli Arkadan Görünüm



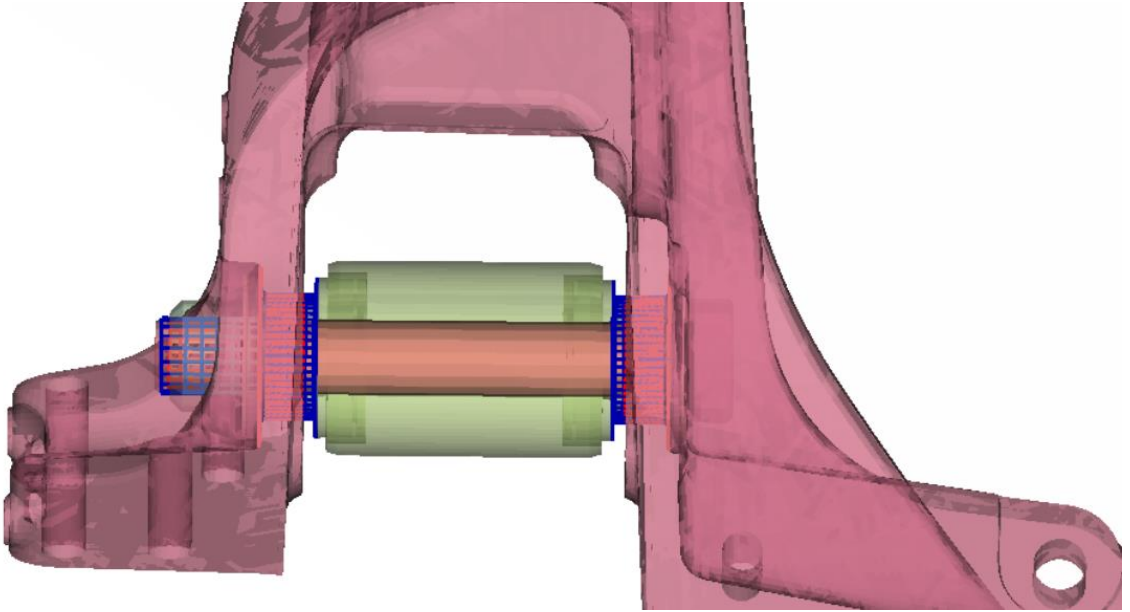
Şekil A.3 Süspansiyon Braketi Sonlu Elemanlar Modeli Soldan Görünüm



Şekil A.4 Süspansiyon Braketi Sonlu Elemanlar Modeli 2 Sağdan Görünüm



Şekil A.5 Makas Bağlantısı Burçlu Modeli Gösterimi



Şekil A.6 Makas Bağlantısı Kontak Modeli Gösterimi

NCODE DESIGNLIFE KONFİGÜRASYONLARI

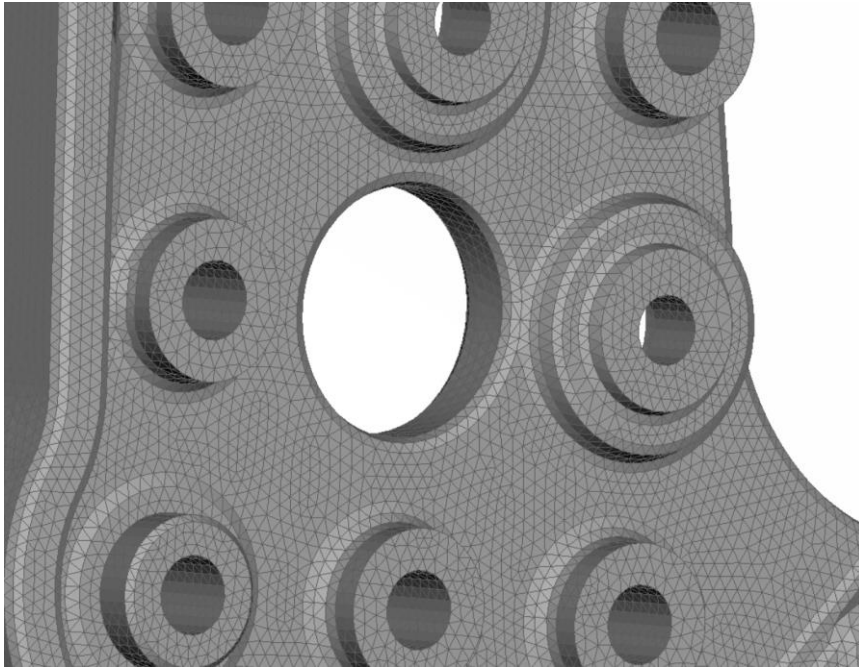
Name	Value	Description
General		
Description		Analysis group description
EntitySelection		
SelectionGroupType	ElementSet	▼ Sets the grouping type to be used for extracting results
GroupNames	PART-1-1_FEXT_SHELL	Groups to process
MaterialAssignmentGroup	SelectionGroup	▼ Sets the grouping type to be used for material mapping
IgnoreZeroData	True	▼ Whether to ignore entities with zero data in the translation
EntityType		
SolutionLocation	AveragedNodeOnElement	▼ Solution location
EntityDataType	Stress	▼ Entity data type
EntityOptions		
SurfaceNodesOnly	True	▼ Whether to process surface nodes only
ResolveToLocal	True	▼ Whether to resolve surface nodal values to a local coordinate system
ShellLayer	TopAndBottom	▼ Shell layer to use
SolidLayer	All	▼ Layer to use from solid composite elements
StressGradients	False	▼ Whether to read stress gradients
MaterialOrientationTensor	None	▼ Specifies where to read orientation tensors for composite analysis
StateVariableKey	Macro	▼ Specifies the type of state variable result to read
IdentifyFreeEdges	False	▼ Identify results with free element edges
Units		
DistanceUnits	mm	▼ The units to use for distance values
StressUnits	MPa	▼ The units to use for stress values
StrainUnits	strain	▼ The units to use for strain values
ForceUnits	N	▼ The units to use for force values
MomentUnits	N.mm	▼ The units to use for moment values
TemperatureUnits	deg C	▼ The units to use for temperatures
UnitsDefinition		Units definition string (overrides all individual Units property settings)

Şekil B.1 NCODE DESIGNLIFE Konfigürasyonları

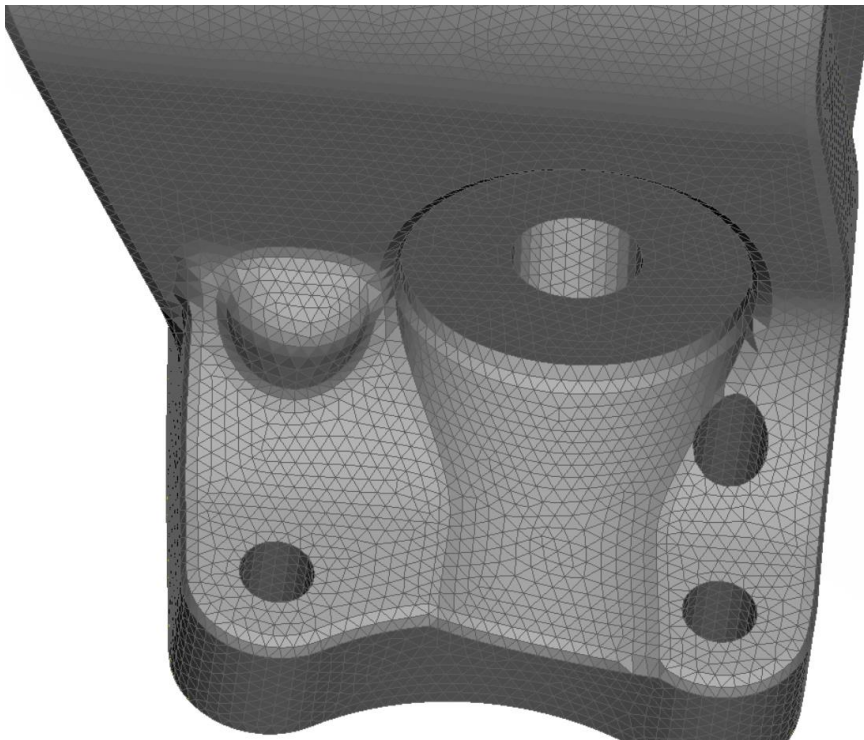
	Name	Value	Description
☐	General		
	ENMethod	Standard	▼ The method used to calculate damage from a stress cycle
	CombinationMethod	AbsMaxPrincipal	▼ The method used to combine component stresses/strains
	MeanStressCorrection	Morrow	▼ The method used to correct the damage calculation for mean stress
	InterpolationLimit	UseMaxCurve	▼ Multicurve material interpolation limit
	MultiAxialAssessment	Standard	▼ Whether to perform assessment of the multi-axial stress state
	ElasticPlasticCorrection	HoffmannSeeger	▼ The correction method for elastic plastic transformation in biaxiality
	PlasticLimitLoadCorrection	None	▼ Method used to include shape effect in Elastic Plastic Correction
	CertaintyOfSurvival	50	Required certainty of survival (%) on damage results
	ScaleFactor	1	The scale factor to apply prior to damage calculation
	OutputMaxMin	False	▼ Whether to output max and min stresses
	OutputMaterialNames	False	▼ Whether to output material names to the results
	OutputDistributedSource	False	▼ Whether to output details of the distributed process that generated each result
☐	BackCalculation		
	BackCalcMode	None	▼ Whether to perform a back-calculation or not
	TargetDamage	1E-6	Target damage for back calculation
	BackCalcAccuracy	1	The accuracy of the back calculation
	BackCalcMaxScale	5	The max scale factor to allow in back calculation
	BackCalcMinScale	0.2	The min scale factor to allow in back calculation
☐	DutyCycle		
	EventProcessing	Independent	▼ How to process separate events in duty cycles
	OutputEventResults	False	▼ Whether to output results per event or not for duty cycle processing
☐	Advanced		
	SWTMethod	Iterative	▼ The Smith-Watson-Topper calculation method
	DamageCalcMethod	LookupTable	▼ The method used to calculate the damage for each cycle
	LookupTableSize	256	The size of the lookup table used for the damage calculation
	CheckStaticFailure	Warn	▼ The action to take on static failure
	DamageFloor	1E-20	The calculated damage value below which the damage is set to zero
	MaxDamage	1E30	The maximum damage value
	StaticFailureDamage	1E10	The damage value to insert on static failure
☐	StressGradients		
	StressGradients	Auto	▼ Controls whether stress gradient corrections are done
	StressGradientsUser		The name of the file that contains the stress gradient parameters
	StressGradientMethod	VonMises	▼ The measure of stress used in stress gradient calculations
	OutputStressGradientFactors	False	▼ Whether to output stress gradient factors
☐	Vibration		
	OutputVibrationStats	False	▼ Whether to output Vibration PSD parameters such as ExpectedZeroUpcrossings and ExpectedPeakCour
	VibrationLoopMultiplier	1	The factor by which vibration RMS stress is multiplied when determining cycle centres

Şekil B.2 NCODE DESIGNLIFE E-N Konfigürasyonları

MESH YAPISI DETAY GÖSTERİMİ



Şekil C.1 Süspansiyon Braketi Detaylı Mesh Yapısı Gösterimi



Şekil C.2 Süspansiyon Braketi Detaylı Mesh Yapısı Gösterimi 2

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Volkan Nalçacıoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 24/04/1991

Adres: İstanbul

E-Posta: knalcacioglu@gmail.com

Lisans: YTÜ Makina Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Ford Otosan Şasi Mühendisliği – Şasi CAE Ekibi
(2015 -)

Bildiri

1. Bayraktar, M., Nalçacıoğlu, V., (2019). "ALUMINUM SUSPENSION BRACKET FATIGUE LIFE PREDICTION FOR LIGHTWEIGHT VEHICLES", 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019, 17-19 DECEMBER 2019
Page :1458