

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN ÇİFT
EKSEN YORULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**



Burhan Kıvanç TAR

Ağustos, 2021
İZMİR

ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN ÇİFT EKSEN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

Burhan Kıvanç TAR

**Ağustos, 2021
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BURHAN KIVANÇ TAR, tarafından **DOÇ. DR. OKAN ÖZDEMİR** yönetiminde hazırlanan “**ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN ÇİFT EKSEN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR

Yönetici

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Dr. Öğr. Üyesi Uğur KEMİKLİOĞLU

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan ve bana yol gösteren tez danışmanın, değerli hocam, Sn. Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR'e,

Çalışmanın her aşamasında desteklerini esirgemeyen, başta Sn. Meriç IŞIK olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma, çalışmalarda maddi ve manevi her türlü desteği veren sektöründe öncü CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş.'ne,

Yoğun çalışmalarım sırasında beni her konuda destekleyen sevgili eşim Özge TAR'a ve tüm hayatım boyunca yanımda olup beni sonuna kadar destekleyen, bugünlere gelmem için büyük emek sarfeden sevgili aileme,

Saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Burhan Kıvanç TAR

ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLARIN ÇİFT EKSEN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZ

Aracın en önemli güvenlik parçalarından biri olan jantlar, statik ve dinamik yükler altında çalışmasından dolayı hayati öneme sahip parçalardır. Bu yüzden tasarım sürecinde, kullanılacağı araç özelliklerine, otomotiv standartlarına ve test şartnamelerine göre jant üzerinde meydana gelecek maksimum yüklere göre analiz edilir. Mekanik analizler dikkate alınarak tasarımı gerçekleştirilen jantlar numune üretiminin ardından mekanik testlere tabi tutulur. Çift eksen yorulma (Zwarp) testi, dinamik viraj yorulması testi, radyal yorulma testi, dik darbe testi, 13° darbe testi mekanik testlerden bazılarıdır. Kritik tekrar sayısına ulaşan değişken yükler jantlarda yorulma hasarı meydana getirebilir.

Bu çalışma kapsamında SAE J2562 çift eksen yorulma (Zwarp) testi standardına uygun şekilde jantların değişken yol koşullarında yorulma davranışları incelenmiştir. Yapılan incelemede Minitab istatistik programı ile deney tasarımları hazırlanarak LBF.WheelStrength mühendislik yazılımı ile analiz edilmiştir. Deney tasarımı yöntemi, birden fazla parametrenin incelenerek sonuca etkisinin belirlenmesini sağlamıştır. Jantın çift eksen yorulma dayanımına etki eden kol boşaltma ölçüleri, kol kalınlığı, bijon konumu gibi 16 geometrik parametrenin etkisi incelenmiş ve etkili olan parametreler minimum gerilme – ağırlık sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması amacıyla aynı sınır koşullarında, SAE J2562 standardına göre CMS Jant firmasının test tezgahında jantın deneysel çift eksen yorulma testi yapılmıştır. Yorulma çatlağı meydana gelen modelde tasarım iyileştirmesi ile maksimum gerilme değeri düşürülüp, minimum ağırlıkta testten uygun sonuç elde edilmesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Jant, yorulma, sonlu elemanlar analizi, deney tasarımı, optimizasyon

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF BIAXIAL FATIGUE BEHAVIOR OF ALUMINIUM ALLOY WHEELS

ABSTRACT

Wheels, one of the most important safety parts of the vehicle, are vital parts because they operate under static and dynamic loads. Therefore, during the design process, it is analyzed according to the maximum loads that will occur on the wheel according to the vehicle characteristics, automotive standards and test specifications. Wheels, designed by taking into account the mechanical analysis, are subjected to mechanical tests after sample production. Biaxial fatigue (Zwarp) test, dynamic cornering fatigue test, radial fatigue test, vertical impact test, 13° impact test are some of the mechanical tests. Variable loads that reach the critical number of repetitions can cause fatigue damage to the wheels.

Within the scope of this study, fatigue behavior of wheels in variable road conditions was investigated in accordance with SAE J2562 biaxial fatigue (Zwarp) test standard. Experimental designs were prepared with Minitab statistical program and analyzed with LBF.WheelStrength engineering software. The effect of 16 geometric parameters such as spoke pocket dimensions, spoke thickness, wheel bolt position, which affect the biaxial fatigue strength of the wheel, were examined and the effective parameters were optimized to provide minimum stress - weight.

In order to verify the finite element model, the experimental biaxial fatigue test of the wheel was carried out on the test bench of CMS Wheel company according to the SAE J2562 standard under the same boundary conditions. With the design improvement in the model with fatigue cracking, the maximum stress value was reduced and appropriate results were obtained from the test with minimum weight.

Keywords: Wheel, fatigue, finite element analysis, design of experiment, optimization

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLAR.....	5
2.1 Alüminyum Alaşımli Jantların Temel Ölçüleri ve Sınıflandırılması.....	6
2.2 Alüminyum Alaşımli Jantların Üretimi	7
2.2.1 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi	7
2.2.2 Alüminyum Alaşımli Jantın Üretim Adımları.....	10
BÖLÜM ÜÇ – MALZEME VE YÖNTEM.....	15
3.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanımı	15
3.1.1 Alüminyum Alaşımların Jant Sektöründe Kullanımı	17
3.1.2 Alüminyum Alaşımların Özellikleri	18
3.1.3 Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması	21
3.2 Yorulma	22
3.3 Çift Eksen Yorulma (Zwarp)	24
BÖLÜM DÖRT – DENEY TASARIMI.....	30
4.1 Parametrelerin Belirlenmesi	31
4.2 Eleme Deney Tasarımı.....	35
4.3 Faktöriyel Deney Tasarımı	37
BÖLÜM BEŞ – MODELLERİN OLUŞTURULMASI.....	39

BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR 43

6.1 Eleme Deney Tasarımı Sonuçlarının İncelenmesi 45

6.2 Faktöriyel Deney Tasarımı Sonuçlarının İncelenmesi..... 57

6.3 Jantın Çift Eksen Yorulma Davranışı Optimizasyonu..... 69

6.4 Çift Eksen Yorulma Testi 71

6.5 Değerlendirme..... 74

KAYNAKLAR..... 76



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Alüminyum alaşımlı jant	5
Şekil 2.2 Jantın temel ölçüleri	6
Şekil 2.3 Alüminyum alaşımlı jantlarda kullanılan flanş tipleri	7
Şekil 2.4 Alçak basınçlı döküm tezgahı	8
Şekil 2.5 Döküm işlemi esnasındaki sıcaklık değişimi örneği	9
Şekil 2.6 Dökümden sonra malzemenin katılaşma örneği	9
Şekil 2.7 Alüminyum ergitme fırını	10
Şekil 2.8 Isıl işlem tesisi	11
Şekil 2.9 AlSi7Mg ısıtıl işlem prosesi	12
Şekil 2.10 Alüminyum alaşımlı jantın talaş kaldırma işlemi	13
Şekil 2.11 Ön yüzey işlemleri (sol), ön yüzey işlemli (sağ) jant	14
Şekil 3.1 Avrupa’da üretilen araç başına kullanılan alüminyum alaşım miktarı	16
Şekil 3.2 Araç başına kullanılan malzemelerin yıllara göre değişimi	17
Şekil 3.3 Isıl işlemli - ısıtıl işlemli malzemelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği ...	20
Şekil 3.4 Yorulma çatlağı örneği	23
Şekil 3.5 S-N grafiği	24
Şekil 3.6 Janta etkileyen dikey ve eksenel kuvvetler	25
Şekil 3.7 Zwart test tezgahı	25
Şekil 3.8 Yüklerin uygulandığı dairesel bölgeler	26
Şekil 3.9 Palmgren-Miner kuralı	27
Şekil 3.10 Hasar hesaplama eğrisi	28
Şekil 3.11 WheelStrength yük dağılımı grafiği	20
Şekil 4.1 İncelenen kritik bölgeler	32
Şekil 4.2 Parametrelerin etkili olduğu bölgelere göre sayısal dağılımı	38
Şekil 5.1 Catia temsili çizim	40
Şekil 5.2 Jant tasarım örneği	41
Şekil 5.3 Catia V5 tasarım tablosu	41
Şekil 5.4 Farklı parametrelere sahip jant tasarım örneği	42
Şekil 6.1 Son yıllarda tasarlanan jantların ölçülerinin pareto grafiği	44

Şekil 6.2 WheelStrength analizinin ön yüzey örnek sonuç görseli	45
Şekil 6.3 WheelStrength analizinin arka yüzey örnek sonuç görseli	45
Şekil 6.4 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etkilerinin pareto grafiği.....	49
Şekil 6.5 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etki yönlerinin grafiği.....	49
Şekil 6.6 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	50
Şekil 6.7 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etki yönlerinin grafiği	51
Şekil 6.8 Parametrelerin Ön-Stil Radyusu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	52
Şekil 6.9 Parametrelerin Ön-Stil Radyusu üzerindeki etki yönlerinin grafiği	52
Şekil 6.10 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	53
Şekil 6.11 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etki yönlerinin grafiği...	54
Şekil 6.12 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etkilerinin pareto grafiği ..	55
Şekil 6.13 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etki yönlerinin grafiği	55
Şekil 6.14 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	56
Şekil 6.15 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etki yönlerinin grafiği	57
Şekil 6.16 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etkilerinin pareto grafiği.....	59
Şekil 6.17 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etki yönlerinin grafiği.....	59
Şekil 6.18 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etkilerinin pareto grafiği.....	60
Şekil 6.19 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etki yönlerinin grafiği.....	61
Şekil 6.20 Parametrelerin Ön-Stil Radyus üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	62
Şekil 6.21 Parametrelerin Ön-Stil Radyus üzerindeki etki yönlerinin grafiği	62
Şekil 6.22 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	63
Şekil 6.23 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etki yönlerinin grafiği...	64
Şekil 6.24 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etkilerinin pareto grafiği ..	65
Şekil 6.25 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etki yönlerinin grafiği	65
Şekil 6.26 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	66
Şekil 6.27 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etki yönlerinin grafiği	67
Şekil 6.28 Parametrelerin Ağırlık üzerindeki etkilerinin pareto grafiği	68
Şekil 6.29 Parametrelerin Ağırlık üzerindeki etki yönlerinin grafiği	68
Şekil 6.30 Minimum değerlere göre yapılan optimizasyon sonucu	70
Şekil 6.31 Limit değerlere göre yapılan optimizasyon sonucu	71
Şekil 6.32 12 numaralı (sol) ve optimize edilmiş (sağ) modellerin test sonuçları	72
Şekil 6.33 Optimize edilmiş model stil yüzeyi analiz sonucu	73

Şekil 6.34 Optimize edilmiş model arka yüzey analiz sonucu	73
--	----



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Çalışmada kullanılan A356.0 T6 mekanik özellikleri	20
Tablo 3.2 Çalışmada kullanılan A356.0 T6 kimyasal özellikleri	20
Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarda ısıtıl işlem kodlaması.....	21
Tablo 3.4 Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması	22
Tablo 3.5 Döküm alüminyum alaşımların sınıflandırılması	22
Tablo 3.6 Yükleme şartları.....	26
Tablo 4.1 İncelenen ölçüsel parametreler	32
Tablo 4.2 Eleme deney tasarımı.....	36
Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan jantın teknik özellikleri	44
Tablo 6.2 Eleme deney tasarımı çift eksen yorulma analizi sonuçları.....	46
Tablo 6.3 Ön-Feder üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu	48
Tablo 6.4 Ön-Bijon üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu	50
Tablo 6.5 Ön-Stil Radyus üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu.....	51
Tablo 6.6 Arka-Boşaltma Yanı üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu	53
Tablo 6.7 Arka-Boşaltma İçi üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu...	54
Tablo 6.8 Arka-Kol Ucu üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu	56
Tablo 6.9 Tam faktöriyel deney tasarımı çift eksen yorulma analizi sonuçları	58

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Bir aracın en önemli güvenlik parçalarından biri olan jantlar, güvenli sürüş, araç stabilitesi, sürüş konforu ve sürüş ekonomisi için önemli rol oynamaktadır. Temel olarak jantlar, aracın yol ile temasını sağlayan, hayati öneme sahip olan otomotiv parçalarıdır. Jantın çalışma koşullarının düzensiz ve karmaşık olmasından dolayı tasarım aşamasında mühendislik çalışmalarının detaylı yapılması önem kazanmaktadır (Wan, Shan, Liu, Wang, ve Wang, 2016).

Bu çalışmada alüminyum alaşımlı binek araç jantlarının çift eksen yorulma (Zwarp) davranışı incelenmiştir. Konu hakkında yapılan çalışmalardan birkaçı aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Santiciolli, Möller, Krause, ve Dedini (2017) simülasyon çalışması ile alüminyum alaşımlı jantlara ait çift eksen yorulma testinin incelemesini yapmışlardır. Öncelikle Zwarp tezgahında çalışılan jantın testi gerçekleştirilmiş, sonrasında MSC.Adams ve Abaqus yazılım programları kullanılarak yapılan test modellenmiştir. Testin modellenmesi 2 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada; Zwarp test tezgahı, jant ve lastik dahil edilerek MSC.Adams yazılımı ile modelleme yapılmıştır. MSC.Adams yazılımında, jantın ve lastik yan duvarlarının test tezgahı ile kontakt noktalarında oluşan kuvvet ve moment değerleri hesaplanmıştır. İkinci aşamada; MSC.Adams yazılımında elde edilen çıktılar Abaqus yazılımında girdi olarak kullanılıp, jantta meydana gelen uzamalar hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında yol koşullarını simüle edecek şekilde yeni bir Zwarp yükleme verisi tasarlanmıştır. Yol verisi, farklı yol şartlarında yarı-durağan yükleme dizisinden oluşmaktadır. Öncelikle sadece dikey yüklemeler oluşturulmuş, sonrasında dikey ve eksenel yüklerin her ikisi de meydana gelecek şekilde, çift eksen yükleme oluşturulmuştur. Tasarlanan yükler belli bir sıraya göre artma ve azalma eğilimi göstermektedir. Lastik ile tezgah tamburunun açısall temasından meydana gelen frekanslar, hem Zwarp test tezgahından hem de MSC.Adams programından elde

edilmiştir. Aralarındaki korelasyon incelendiğinde test ile simülasyonun uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, jantların göbek kısmına yakın bir bölgeye yerleştirilen gerinim ölçerler ile fiziksel olarak jantın testinde meydana gelen uzamalar tespit edilmiştir. Korelasyon incelemesinde, testte elde edilen uzamalar ile Abaqus programının uzama sonuçları karşılaştırıldığında, simülasyon ile test arasındaki korelasyon kanıtlanmıştır.

Wan ve diğer. (2016) bir ticari araç jantının çift eksen yorulma simülasyonu ve testi yöntemleriyle yorulma ömrü belirleme çalışması yapmıştır. Genel olarak yapılan çalışmalarda standart yorulma testleri radyal ve viraj yorulmasını kapsamaktadır. Janta farklı yol koşullarında etki eden statik ve dinamik yükleri incelemek amacıyla, bileşke yüklerin kullanıldığı çift eksen yorulma testi yapılmalıdır. Yapılan yorulma ömür yaklaşımı çalışmasında temel standartlar olan EUWA ES 3.23 ve SAE J2562 standartları kullanılmıştır.

Simülasyon yaklaşımı 2 adımda yapılmıştır. Öncelikle test tezgahında janta uygulanan kamber açıları her yükleme koşulu için kamber analizi yöntemi ile hesaplanmış, sonrasında bu hesaplamalar jantın dayanım analizinde kullanılmıştır. Analizden elde edile gerilme değerleri jantın S-N grafiğine göre yorumlanmıştır. Kamber açısı hesabı için Solidworks yazılım programı ile jant ve test makinası modellenmiş, kamber açısı analizi için Abaqus simülasyon programına model aktarılmıştır. Simülasyon detayında tüm parçalar katı cisim olarak tanımlanmış, test tezgahındaki tambur sabitlenmiş ve tambur iç yüzeyi ile lastik arasına sürtünmeli kontakt tanımlanmıştır.

Jant malzemesi BG380L Standardına göre çelik malzeme seçilmiştir. Lastik malzemesi için ise sıkıştırılamayan izotropik Mooney-Rivlin elastik malzeme modeli tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda, test sonuçlarına uygun simülasyon elde edilmiş ve buna göre yorulma ömrü yaklaşımı yapılmıştır.

Ballo, Previati, Mastinu, ve Gobbi (2020) alüminyum alaşımlı jantlara ait çift eksen testinin nümerik olarak modellenmesi üzerinde çalışmıştır. Modelleme 3 aşamada

incelenmiştir. İlk adımda; simülasyon yöntemi ile çalışmada girdi olarak kullanılacak lastik yüzeyi ve tezgah tamburu temas yüzeyine etki eden dikey ve eksenel kuvvetler elde edilmiştir. Sonraki adımda; belirlenen kuvvetler değişken yol şartları kullanılarak jant üzerine uygulanmıştır. Son adımda; yorulma ömrü yaklaşımı Sines ve Papadopoulos kritik düzlem yorulma kriterleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon detayında katı izotropik eleman olarak kabul edilip Mooney-Rivlin kuralı uygulanmıştır. Test tezgahı malzemesi olarak da demir kullanılmıştır. Çift eksen kuvvetleri, simülasyon ortamında jantın her bir düğüm noktasındaki zamana bağlı gerilme gradyanlarını elde etmek için janta uygulanmış, yorulma ömrü yaklaşımı için Palmgren-Miner metodu referans alınmıştır.

Eş zamanlı olarak jantın fiziksel testi de gerçekleştirilip, test sonuçları simülasyon doğrulaması için kullanılmıştır. Jant, Zwarp test tezgahında test edildikten sonra penetrant sıvısı uygulanarak çatlak kontrolü yapılmıştır. 13500 km sonrası kolun göbeğe bağlantısını sağlayan radyus üzerinde çatlak tespit edilmiştir. Test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında yorulma ömründe 30% fark olduğu görülmüştür.

Topaç, Ercan, ve Kuralay (2012) tarafından ticari araç çelik jantının havalandırma deliklerinde dinamik yorulma testinde meydana gelen yorulma hataları incelenmiştir. Tüm test numunelerinde dinamik yorulma testinde aynı bölgede yorulma hataları meydana geldiği için sonlu elemanlar analizi ile problem incelenmiştir. Simülasyon için kullanılacak malzeme özellikleri, janttan alınan numunelerin çekme testi ve sertlik ölçümleri ile elde edilmiştir. Yorulma ömrü yaklaşımı çekme testinden elde edilen S-N grafiğine göre yapılmıştır.

Çelik jantın yük değerleri ve yorulma davranışı dinamik yorulma testi ile belirlenmiştir. EUWA (Avrupa Jant Üreticileri Birliği) ve SAE (Otomotiv Mühendisleri Derneği) standartlarına göre çelik jantın çatlak oluşmadan 1×10^6 tur dönmesi gerekmektedir. Her 2×10^4 turda bir çatlak kontrolü yapılan jantın hava delikleri bölgesinde $5,3 \times 10^5$ turda çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir.

Jantın üç boyutlu modellemesinin Solidworks yazılımı ile yapılmasının ardından simülasyon için ANSYS Workbench V12.0 yazılım programı kullanılmıştır. Test tezgahında 237 rpm hıza sahip tambur ile yapılan test aracın yaklaşık 45 km/h hızına denk gelmektedir. Lastiğin janta temas ettiği yüzeylere dikey kuvvet uygulanıp, jantın dış yüzüne 10 bar basınç uygulanmıştır. Merkezkaç kuvvetin etkileri göz ardı edilmiştir.

Çalışma sonucunda kritik bölge olan havalandırma deliklerinin yorulma ömrünün $3,23 \times 10^5$ - $4,37 \times 10^5$ aralığında olduğu görülmüştür. Meydana gelen gerilmeleri azaltıp, jantın yorulma ömrünü azaltmak için tasarım iyileştirilmesi yapılması gerekmektedir. İlk akla gelen yöntem jantın sac kalınlığının artırılmasıdır. Ancak tüm janta uygulanacak bu iyileştirme gereksiz ağırlık artışına neden olacağı için çalışmada lokal çözümler önerilmiştir. Flow form üretim operasyonunun esnekliğinden dolayı tüm jantın sac kalınlığının artırılması yerine, sadece kritik bölgenin kalınlığının artırılıp lokal iyileştirme yapılması önerilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda önerilen iyileştirme yöntemi uygulanarak, minimum ağırlık artışı ile yorulma ömrünün $1,26 \times 10^6$ - $1,39 \times 10^6$ aralığına çekilmesi ortaya konmuştur.

Bu çalışmada alüminyum alaşımlı binek araç jantlarının çift eksen yorulma (Zwarp) davranışı üzerinde etkisi olan tasarım parametreleri incelenecek ve en uygun tasarımı elde etmek için optimize edilecektir. İlk olarak daha önceki tecrübelerle dayanarak jantın inceleme yapılacağı kritik bölgeler ve bu bölgeler üzerinde etkisi olduğu düşünülen parametreler belirlenecektir. Sonrasında deney tasarımları oluşturularak jant modelleri Catia V5 R26 tasarım programında modellenecek ve tüm jantların çift eksen yorulma analizleri WheelStrength analiz programında yapılacaktır. Ardından elde edilen sonuçlar Minitab 18.0 İstatistik programında deney tasarımı analizi ile incelenip, jantın belirlenen bölgeleri üzerindeki etkileri tespit edilecektir. Son olarak da müşteri taleplerine uygun en ideal jant tasarımı elde etmek için optimizasyon yapılacaktır.

BÖLÜM İKİ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLI JANTLAR

Binek araçlarda kullanılan alüminyum alaşım jantlar, hem araç üzerinde görselliğe olan katkısı ile endüstriyel tasarımın bir parçası olan hem de aracın yol ile temasını sağlayan ve görevi gereği statik ve dinamik yüklere maruz kalması ile mekanik tasarımın bir parçası olan güvenlik ekipmanıdır (Şekil 2.1). Belirtildiği gibi iki farklı bölüme ait olan jant tasarımları OEM (Original Equipment Manufacturer – Orijinal Ekipman Üreticisi) ile tedarikçi firmanın ortak çalışması ile yapılmaktadır. Jantın stili olarak adlandırılan, jantın dışarıdan görülen ön yüzeyinin tasarımı OEM ve tedarikçi firma tasarımcılarının ortaklaşa çalışmaları ile gerçekleştirilir. Jantın mekanik tasarımı ise tedarikçi firma tarafından OEM firmadan talep edilen özellikler dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir (Kara ve diğer., 2017).

Jantların ömrü boyunca maruz kaldığı ortam şartları ve yüksek yükler göz önüne alındığında, jantın tasarım aşamasında çok sayıda mekanik analizin ve jantın üretiminden sonra da çok sayıda mekanik testin yapılması gerekmektedir. Alüminyum alaşımli jantlara uygulanan başlıca mekanik testler;

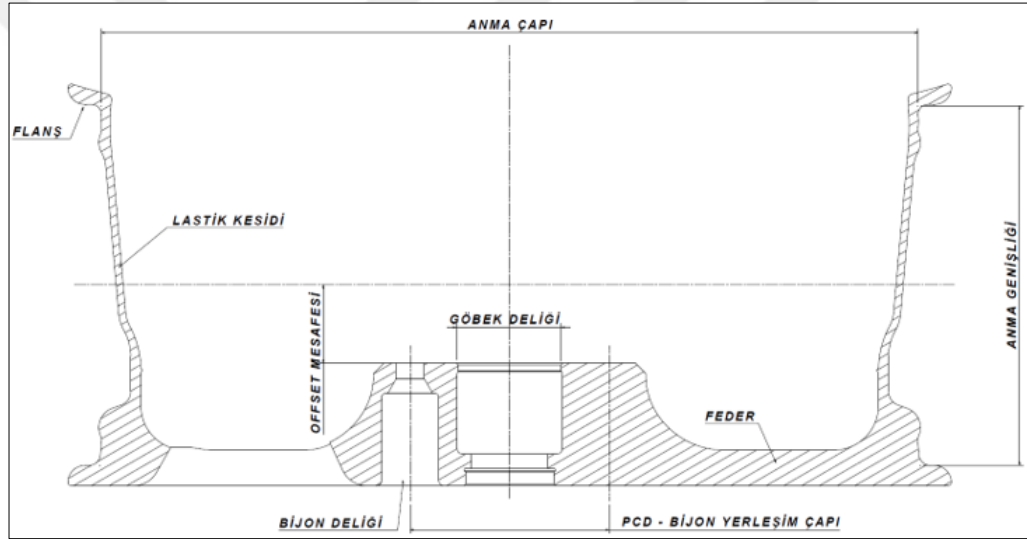
- Dinamik viraj yorulması testi,
- Radyal yorulma testi,
- Çift eksen yorulma (Zwarp) testi,
- 13° Darbe testi,
- Dik darbe testidir.



Şekil 2.1 Alüminyum alaşımli jant (CMS Jant, 2021)

2.1 Alüminyum Alaşım Jantların Temel Ölçüleri ve Sınıflandırılması

Jantların ölçüsel olarak sınıflandırılması ETRTO (Avrupa Lastik ve Jant Teknik Birliği) veya JATMA (Japon Otomobil ve Lastik Üreticileri Birliği) tarafından belirlenen standartlara göre yapılmaktadır. Jantın temel ölçülerini belirtmek için kullanılan tanımlar; anma çapı, anma genişliği, offset mesafesi, göbek deliği, feder, flanş tipi, lastik kesiti, bijon deliği ve PCD (Pitch Circle Diameter - Bijon Yerleşim Çapı) olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Binek araçlarda kullanılan jantların anma çapı 10” ile 22” arasında, anma genişliği ise 4” ile 10” arasında değişmektedir (ETRTO, 2021).



Şekil 2.2 Jantın temel ölçüleri (Işık, 2019)

Jantın anma çapı, lastik oturma yüzeyinin bitimindeki radyus ile 180° karşı tarafına olan mesafedir. Jantın çapını tanımlamak için kullanılır. Anma genişliği, lastiğin oturma yüzeylerinin yer aldığı iki flanş arası mesafedir. Lastiğin jant üzerine oturduğu bölgelere flanş adı verilir. Lastiğin janta tam olarak montajlanmasını sağlar. Flanş tipleri üretici taleplerine göre farklılık göstermektedir. ETRTO standartlarında yer alan flanş tipleri Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Offset mesafesi, jantın anma genişliğinin orta ekseninden jantın araca montaj yüzeyine olan mesafesidir. Bijon deliği, jantın araca sabitlenmesini sağlayan cıvataların geçtiği dairesel deliklerdir. OEM ve tedarikçi firmalara göre farklılık gösteren ve lastiğin iç kısmında kalan bölgeye lastik kesiti denir. Göbek deliği olarak adlandırılan bölge jantın merkezinde yer alan, içinde porya

ve yağ kapağı gibi parçaların bir bölümünün bulunduğu kısmı belirtir. Bijon yerleşim çapı (PCD) ise bijonların jant üzerindeki konumlarını belirtir.

Markalama		H	H2	FH	FH2	CH	EH2	EH2+
Profil								
Tanımlama		Kambur	Çift Kambur	Yassı Kambur	Çift Yassı Kambur	Birleşik Kambur	Uzatılmış Kambur	Uzatılmış Kambur +
Şekil	İç	Kambur	Kambur	Yassı Kambur	Yassı Kambur	Yassı Kambur	Uzatılmış Kambur	Uzatılmış Kambur
	Dış	Normal	Kambur	Normal	Yassı Kambur	Normal	Uzatılmış Kambur	Uzatılmış Kambur

Şekil 2.3 Alüminyum alaşımlı jantlarda kullanılan flanş tipleri (Karakaş, 2020)

2.2 Alüminyum Alaşımlı Jantların Üretimi

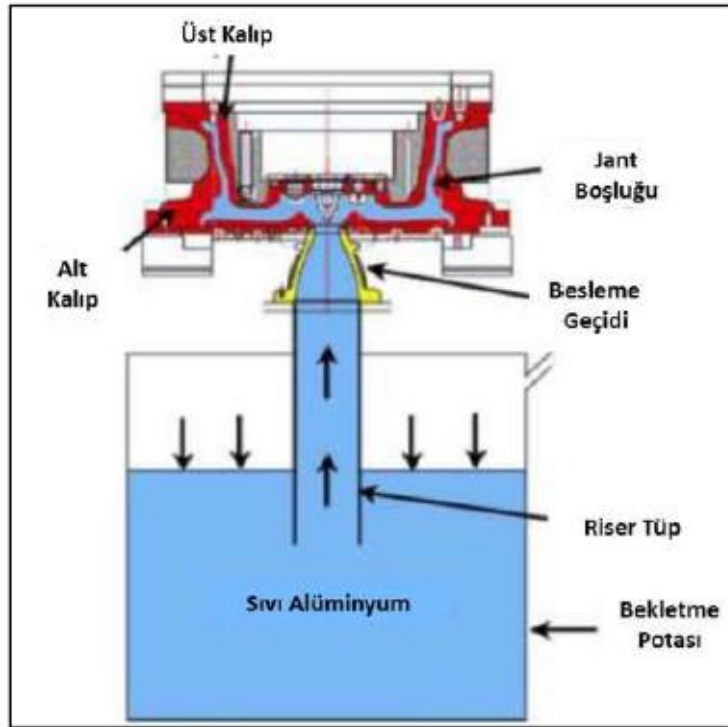
Bu bölümde alüminyum alaşımlı jantların üretim sürecindeki alçak basınçlı döküm, ısıl işlem, talaşlı imalat ve boya (kaplama) yöntemleri ile ilgili bilgi verilecektir.

2.2.1 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi

Alçak basınçlı döküm işlemi, jantların karmaşık stil yapısına uygun üretime imkan sağlamasından dolayı jant üretimi için en çok kullanılan yöntemler arasında yer alır. Yüksek hassasiyet ve yüksek verimlilik gereksinimlerinin yanı sıra düşük maliyetli ve yüksek kaliteli jant üretiminde yüksek kapasiteye elverişli bir üretim yöntemidir (Guofa, Xiangyu, Kuangfei ve Hengzhi, 2009).

Alçak basınçlı döküm tezgahı, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi alt kalıp, üst kalıp, yan bloklar, yolluk, riser tüp ve bekletme potası parçalarından oluşmaktadır. Alçak basınçlı

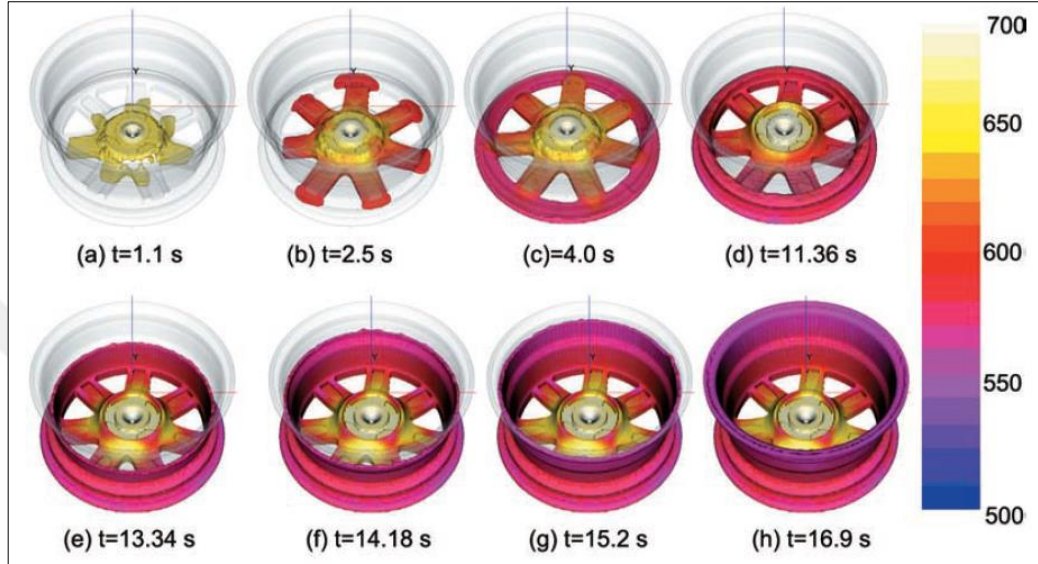
döküm metodu, bekletme potasında ergimiş halde bulunan sıvı alüminyumun yüzeyine üstten basınç uygulayarak sıvı metalin riser tüp ve yolluklar vasıtasıyla kontrollü bir şekilde kalıbın içine doldurulması prensibine dayanır. Bekletme potasında bulunan sıvı metalin üst kısmında cüruf ve ametaller, alt kısmında ise çökmüş durumda olan ağır metaller bulunduğu için kalıbın içine potanın orta kısmında temiz eriyik metal alınır. Daha sonra kalıbın içine alınan sıvı metalin hava veya su soğutucular ile soğutulur katılaşması sağlanır. Gerekli katılaşma sağlandıktan sonra yan blokların ayrılması ile katı jant elde edilmiş olur (Tarkun, 2007).



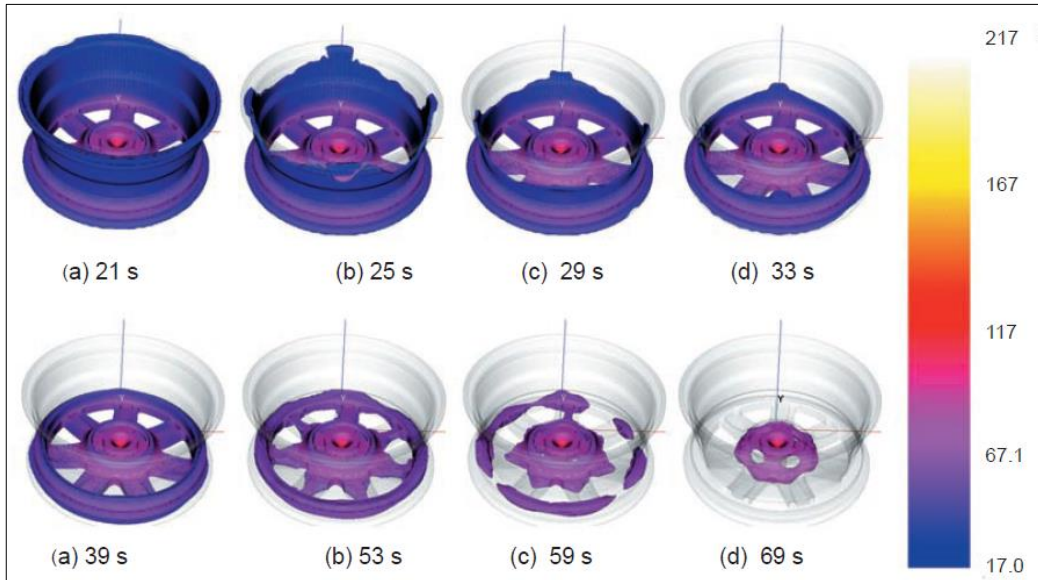
Şekil 2.4 Alçak basınçlı döküm tezgahı (Topçuoğlu, Çe, Aybarç, ve Keskiç, 2014)

Döküm sürecindeki hataların önüne geçmek ve maliyeti azaltmak için, kalıp imalatı ve döküm işleminden önce döküm analizlerinin yapılması önemlidir. Döküm endüstrisinde kalıp tasarımı ve optimizasyonu için geleneksel deneme yanılma metodolojilerine göre avantajlara sahip olan simülasyon programları bulunmaktadır. Bu programlar, tasarımı biten jantın henüz kalıp tasarımı yapılmadan, döküm işlemi esnasındaki malzeme dolma ve katılaşma durumundaki malzeme hızı ve sıcaklığı gibi bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu bilgiler ile döküm esnasında yaşanabilecek problemleri ve dökümden sonra jantta görülebilecek kusurları önceden

tespit edip, döküm kalitesini iyileştirmek için tasarım ve süreç optimizasyonu yapılabilmektedir. Bir döküm analizi ile elde edilen sıvı metalin kalıp içerisine dolumu esnasındaki sıcaklık değişimi örneği Şekil 2.5'te, sıvı metalin kalıp içerisindeki katılaşma sürecinin örneği de Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Guofa ve diğer., 2009).



Şekil 2.5 Döküm işlemi esnasındaki sıcaklık değişimi örneği (Guofa, 2009)



Şekil 2.6 Dökümden sonra malzemenin katılaşma örneği (Guofa ve diğer., 2009)

2.2.2 Alüminyum Alaşımli Jantın Üretim Adımları

Sıvı metal elde etmek amacıyla alüminyum malzemeler külçe halinde tedarik edilmektedir. Jant sektöründe en çok kullanılan alüminyum alaşımlar, A356.2 ticari adı ile bilinen $AlSi_7Mg$ veya A356.0 ticari adı ile bilinen $AlSi_{11}Mg$ alaşımlı külçelerin şartnameye uygunluğunun kontrolü yapılır. Kontrolden sonra Şekil 2.7’de gösterilen alüminyum ergitme fırınında eritilmesi ile hammadde hazırlanmış olur. Külçeler ile birlikte üretimden çıkan talaşlar ve fireye ayrılmış olan jantlar da belli bir oranda ergitilerek hammadde olarak kullanılır.



Şekil 2.7 Alüminyum ergitme fırını (Karakaş, 2020)

Sıvı metal elde edildikten sonra hammaddeye gaz giderme işlemi uygulanır. N_2 veya flaks gazı kullanılarak yapılan bu işlem, eriyik metal içerisindeki istenmeyen parçacıkları sıvı metalin dış yüzeyine doğru yönlendirerek döküm esnasında daha temiz bir metal kullanılmasına imkan sunar. Bu işlem jantın mekanik özelliklerinin artmasını sağlayan işlemlerden biridir. İstenilen özelliklerde hammadde elde edildikten sonra, uygun metal ve ocak sıcaklığı ile birlikte sıvı metalin yükseltici tüp ve yolluk vasıtasıyla kalıbın içine dolması sağlanır. Bu işlem için bekletme potasında bulunan sıvı metalin yüzeyine N_2 gazı ile 1 bar basınç uygulanır. Jant boyutlarına bağlı olmakla birlikte dolumun başlamasından katılaşmanın gerçekleşmesine kadar

geçen süre yaklaşık 100 saniyedir. Kalıp içerisinde belli bir dereceye kadar soğutulan jant, kalıptan alındıktan sonra soğutma havuzunda bekletilir. Alüminyum malzemenin hızlı soğutulması malzemenin mekanik özelliklerini artıracak için, bu işlem jantın mekanik özelliklerini artıran işlemlerden biridir.

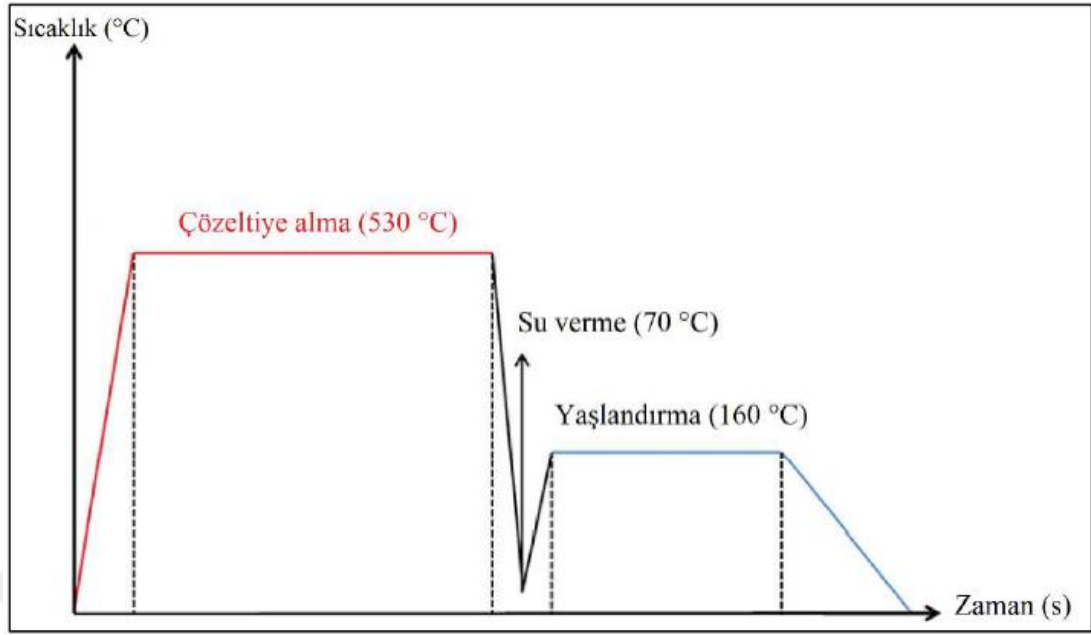
Döküm işleminden sonra, döküm esnasında oluşabilecek olası malzeme problemlerinin tespiti amacıyla tüm jantlara X-Ray kontrolü yapılır. Jantın mekanik özelliklerini ciddi bir şekilde etkileyebilecek olan malzeme hatalarına sahip tüm jantlar bu kontrol ile ayrılır. X-Ray kontrolünden geçen jantlar göbek delme işlemi için ilgili tezgaha aktarılır.

Döküm işleminde jantların göbek deliği kısmı dolu olarak çıkmaktadır. Göbek deliği bölgesinin kesiti önce göbek delme işlemi, sonrasında ise talaşlı imalat prosesi ile oluşturulur. Bu aşamada jantlara talaşlı imalat prosesinden önce göbek delme işlemi uygulanır. Göbek delme işleminden sonra jantlar, müşteri talebine göre ısıtma işlemi var ise ısıtma işlemi prosesine, yok ise direkt talaşlı imalat prosesine aktarılır.

AlSi₇Mg alaşımlı jantların mekanik özelliklerini iyileştirmek için T6 ısıtma işlemi uygulanır. Örnek bir alüminyum alaşım ısıtma işlemi tesisi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Alüminyum alaşımlı jantların ısıtma işlemi prosesi Şekil 2.9’da belirtildiği gibi, jantlar ilk olarak 530 °C sıcaklığa kadar ısıtılır. İkinci aşamada havuz içerisinde bulunan 70 °C sıcaklıkta suyun içerisine daldırılarak, 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılır.



Şekil 2.8 Isıtma işlemi tesisi (Karakaş, 2020)



Şekil 2.9 AlSi7Mg ısıtım işlemi (Işık, 2019)

Müşteri talebine bağlı olarak ısıtım işlemi uygulanmış veya uygulanmamış jantlar bu aşamadan sonra talaşlı imalat işlemine aktarılır. Talaşlı imalat işlemi, dökümden çıkan brüt jantın tasarım aşamasında belirlenen ölçüleri ve kesitleri sağlaması için yapılan talaş alma operasyonudur. Bu operasyon, lastik kesiti ve kol (feder) formlarının verilmesi, bijon ve supap deliklerinin oluşturulmasını içerir. Talaşlı imalat işlemi için tasarımı bitmiş olan jantın teknik resmi, tasarım kesitleri ve üretim talimatları kullanılır.

Jantların talaşlı imalat işlemi belli bir sıraya göre yapılmaktadır. Belli bir düzene göre yapılan talaşlı imalat adımlarında jantın tezgaha sabitleme yönü veya işlem yapılan tezgah farklılık göstermektedir. Sırasıyla jantın iç ve dış lastik yüzeyi, iç ve dış flanş, göbek ve offset yüzeyi bölgelerinden talaş kaldırma işlemi yapılmaktadır (Şekil 2.10). Sonrasında dik işlem freze tezgahlarında bijon ve sübap deliklerinin delme işlemleri uygulanır.



Şekil 2.10 Alüminyum alaşımlı jantın talaş kaldırma işlemi (Karakaş, 2020)

Talaşlı imalat işlemleri tamamlanan jantların balans kontrolleri yapılır. Balans kontrolü, her proje için müşteri tarafından belirtilen balanssızlık limiti ve balans kontrol ağırlığı değerleri kullanılarak yapılan bir işlemdir. Balans kontrolünden geçen jantlara talaşlı imalattan kaynaklanan istenmeyen durumların önüne geçmek için tesviye işlemi uygulanır. Talaşlı imalat işlemi tamamlanan tüm jantlara boya prosesinden önce sızdırmazlık testi uygulanır. Jantın araca montajından sonra lastik basıncında meydana gelebilecek bir azalma direkt olarak can güvenliğini etkilediği için sızdırmazlık testinin önemi büyüktür. Bu nedenle güvenlik karakteristiğine sahip olan sızdırmazlık testi OEM firmalar tarafından zorunlu tutulmaktadır.

Bu aşamaya kadar tüm kontrollerden geçen jantlar boya işlemi için boyahaneye aktarılır. Boyahane bölümünde toz astar, sıvı boya, toz vernik ve sıvı vernik uygulaması yapılır. Bu uygulamalardan toz astar ve toz vernik jantın korozyon direncini artırırken, sıvı vernik UV direncini artırmak için ve sıvı boya ise görsel amaçlı kullanılmaktadır.

Müşteri isteğine bağlı olarak boyahane sonrası jantların ön yüzey işlemesi yapılmaktadır. Görsel amaçlı olarak kullanılan ve jantların ön yüzeyinde parlak bir

bölge oluşmasını sağlayan ön yüzey işlemesi için, boya sürecinden sonra jantın parlak olması istenen bölgelerine talaş kaldırma operasyonu uygulanır. Jantlara uygulanan ön yüzey işleme operasyonunun farkı Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Talaş kaldırma işleminden sonra jantlara vernik uygulaması tekrar yapılır (Karakaş, 2020).



Şekil 2.11 Ön yüzey işlemez (sol), ön yüzey işlemeli (sağ) jant (CMS, 2021)

BÖLÜM ÜÇ

MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanımı

Geçtiğimiz yıllarda modern araçlarda kullanılan malzemelerin teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle motorlu araçlarda kaydedilen ilerlemeye rağmen, hafiflik ve mukavemet başta olmak üzere çeşitli konularda malzeme çalışmaları artan hızıyla devam etmektedir.

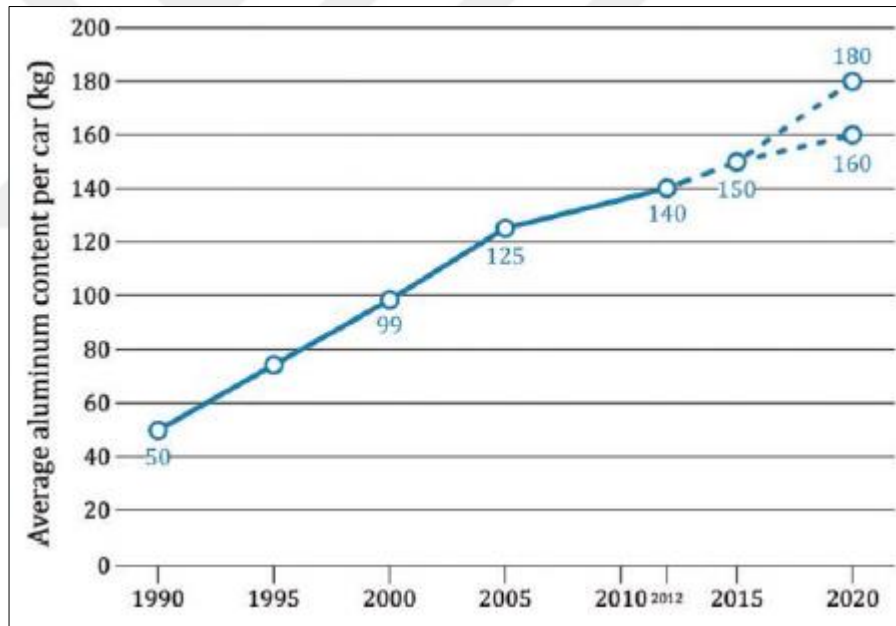
Modern alüminyum alaşımların yüksek güç/ağırlık oranı, düşük maliyet ve yüksek aşınma direnci ile otomotive ve havacılık sektörlerinde geniş kullanım alanları mevcuttur. Ayrıca çoğu alüminyum alaşımın üretimindeki kolaylık ve ekonomik avantaj bu malzemelerin kullanım alanının hızla yayılmasına olanak sağlamaktadır. Alüminyum bileşikler, silikon karbür, grafit, toz bileşikler ve diğerlerinin, yaygın döküm ve karıştırma metotları kullanılarak alüminyum alaşım içerisine dahil edilmesi kolaydır (Stojanovic ve Epler, 2018).

Alüminyumun uygun malzemeler ile yapılan alaşımları alüminyumu, yumuşak ve oldukça sünek yapısından dolayı çok amaçlı, ekonomik ve en çok tercih edilen metal malzemelerden biri yapmaktadır. Alüminyumun, çeliğin yaklaşık üçte biri kadar olan $2,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu kullanıldığı alanlar için ağırlık olarak büyük avantaj sağlamaktadır. Hafif özelliğinin yanında, uygun metal malzemelerin karışımı ile çeliğe yakın mukavemet elde edilen alüminyum alaşımları, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde dayanıklı ve daha hafif yapıların tasarımına imkan vermektedir (Davis, 1993).

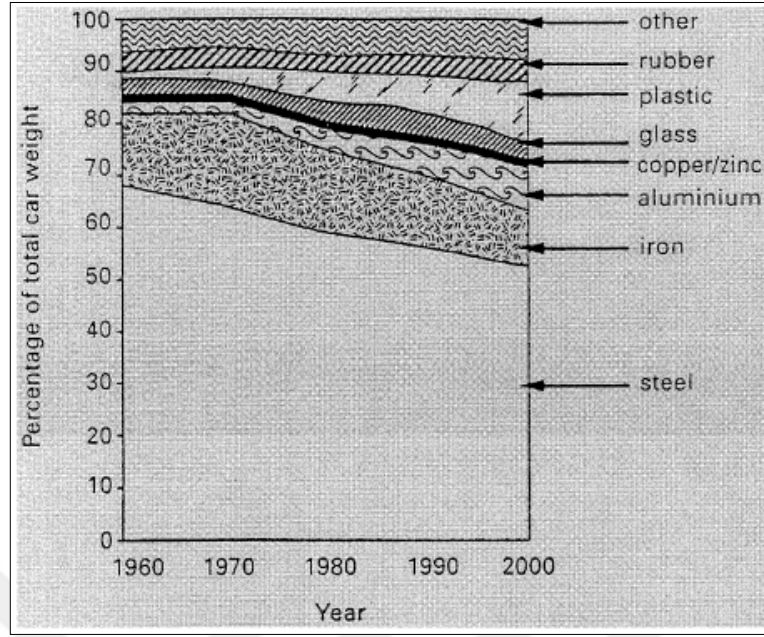
Alüminyum alaşımların elverişli karakteristiğinden dolayı özellikle otomotiv sektöründe kullanımını yaygınlaştırmıştır. Avrupa Alüminyum Birliği tarafından yapılan bir çalışmada Avrupa otomotiv endüstrisinde 1990 ile 2012 yılları arasında alüminyum alaşım kullanımı yaklaşık üç katına çıkmıştır (Şekil 3.1). Alüminyum alaşımlar gibi gelişmiş malzemelerin kullanımının artışında, araçlardaki en uygun

malzeme karakteristiği belirlemek ve olası potansiyel hataları önceden belirleyip önlem almak için tasarlanan yazılımlar tarafından desteklenmesi ve bu sayede malzemelerin araç üzerindeki davranışlarının tasarım aşamasında belirlenmesinin de payı büyüktür.

Öncelikle araç gövdesinde kullanılmaya başlanan alüminyum alaşımların, özellikle düşük ağırlıkları ve korozyona eğilimli olmama özellikleri ile diğer otomotiv sistemlerindeki kullanımı da artış göstermektedir (Şekil 3.2). Bunun yanında, yaygınlaşan alüminyum alaşım parçalar en büyük dezavantajlarından biri olan titreşim ve gürültü problemlerinin artışını beraberinde getirmiştir. Bu problemi çözmek için araç üreticileri tarafından yüksek performanslı yalıtım malzemelerinin kullanımı artmıştır (Stojanovic ve Epler, 2018).



Şekil 3.1 Avrupa’da üretilen araç başına kullanılan alüminyum alaşım miktarı (Miller ve diğer., 2000)



Şekil 3.2 Araç başına kullanılan malzemelerin yıllara göre değişimi (Miller ve diğer., 2000)

3.1.1 Alüminyum Alaşımların Jant Sektöründe Kullanımı

Temel olarak alüminyum alaşım jantlar düşük malzeme ağırlığı özellikleri ile araçlarda yol tutuşunu ve sürüş konforunu artırır, ayrıca yakıt tasarrufu sağlar. Dahası yüksek ısı iletkenliğe sahip alüminyum alaşımlar, aşırı ısınmaya bağlı frenleme problemlerine sebep olan koşullarda ısının hızlı iletmesini ve fren performansının artırılmasını sağlar. Jantlar, binek ve hafif ticari araçlarda kullanılan alüminyum malzemenin yaklaşık %15'ini oluşturmaktadır.

Dövme ve döküm üretim çeşitliliğine sahip alüminyum alaşım jantlar görsel çeşitlilik, ölçüsel tutarlılık, statik ve dinamik yükleme altında yeterli mekanik dayanım sunmaktadır. Alçak basınç döküm yöntemi ile üretilen jantlar, dövme üretim yöntemine göre daha düşük mekanik özellikte olmasına rağmen sektörde popülarlığını korumaktadır. Döküm jantlarda kullanılan alaşımların, döküm esnasında oluşabilecek sıcak yırtılma ve çekmeye dirençli, kullanım esnasında oluşabilecek fiziksel darbeye karşı dayanıklı, korozyon ve yorulma direncinin yüksek olması beklenmektedir. Jantlar için bu özelliği karşılayan en uygun malzeme %7-12 Si, %0,6'ya kadar Mg, düşük Fe ve minör kirliliğe sahip hipoötektik alüminyum alaşım malzemesidir. Bu bilgiler ışığında ısı ısıtma işlemi AlSi7Mg0,3 alüminyum alaşım malzemesi üretim

elverişliliği, yorulma direnci ve malzeme uzaması yönlerinden jant üretimi için en uygun özellikleri sağlamaktadır.

Jantların geçmiş uygulamalarında, 1980’li yıllarda özellikle İtalya ve Almanya’da ısıtıl işlemsiz AlSi11Mg alaşım malzemesi kullanılmıştır. Farklı Si içerikli alüminyum alaşım malzemeleri ile yapılan çalışmalarda Si oranının artması alaşımın tane boyutunun artmasına neden olduğu, bunun da süneklik ve kalın kesitlerde katılma sürelerine olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Bu yüzden düşük yüzdeli Si katkısı olan Al-Si-Mg alaşımları, daha küçük tane yapısından dolayı daha iyi mekanik performans sunmaktadır.

Si oranının üretim ve mekanik performans üzerindeki etkisinden dolayı jant sektöründe malzeme geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. İlk faz çalışma aşamasında olan standart jant alaşımlarında daha az Si katkısına sahip olan AlSi5Mg0,3 alaşım malzemesinin kullanımı çalışması bunlardan biridir. Laboratuvar ölçekli ilk faz çalışmaları olumlu olarak değerlendirildiği takdirde, endüstriyel ölçekli ikinci faz üretim çalışmalarına geçilmesi planlanmaktadır (Kaba ve diğer., 2018).

3.1.2 Alüminyum Alaşımların Özellikleri

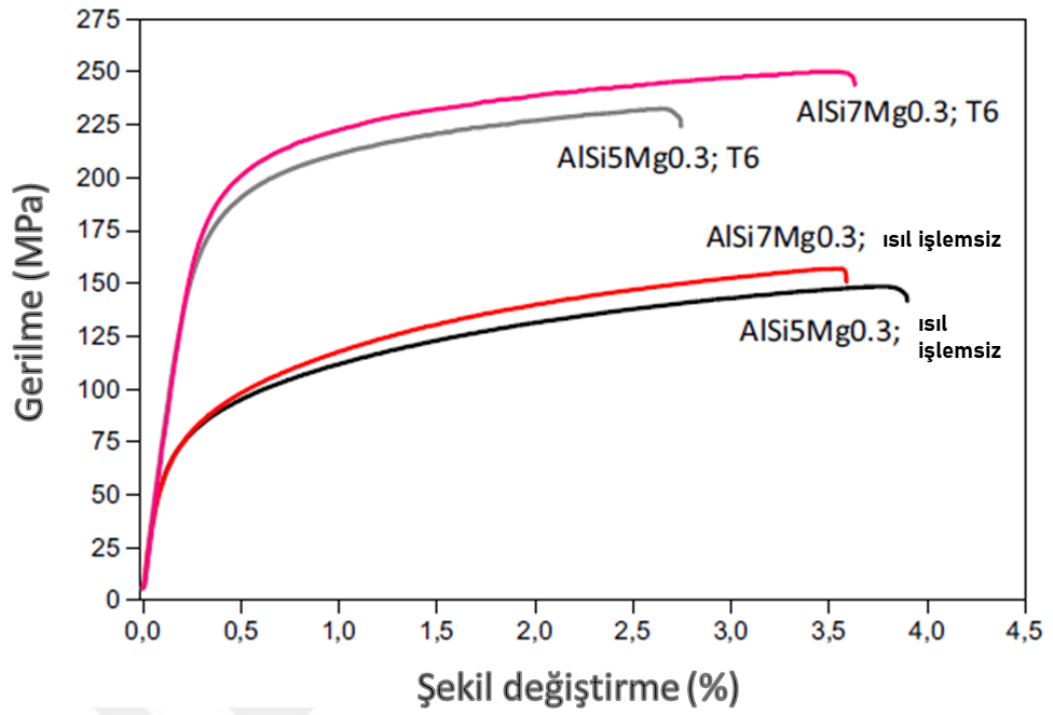
Genel olarak alaşımlar, talep edilen malzeme özelliklerinin elde edilmesi amacıyla, yüzdesi fazla olan temel malzemeye uygun oranlarda farklı malzemelerin karıştırılması ile elde edilir. Önceki bölümde bahsedilen sebeplerden dolayı alüminyum alaşımlar diğer alaşım tipleri arasında en yaygın olanıdır. Güçlendirilmemiş malzemelere göre alüminyum alaşımların avantajlı olan temel özellikleri;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek sertlik,
- Düşük ağırlık,
- Yüksek sıcaklıklardaki gelişmiş özellikleri,
- Kontrollü ısıtıl genleşme kabiliyeti,

- Kontrollü ısıt işlemler kabiliyeti,
- Geliştirilmiş ve adapte edilebilir elektrik iletkenliği,
- Yüksek aşınma ve paslanma direncidir (Stojanovic ve Epler, 2018).

Avantajlarının yanında alüminyum alaşımlı malzemelerin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, katılaşma esnasında %3,5 - %8,5 oranındaki yüksek hacimsel çekme oranları alüminyum döküm alaşımlarının başlıca dezavantajları arasında söylenebilir. Dökümden sonraki ölçüsel doğruluğun hassas bir şekilde sağlanabilmesi için bu oranların kalıp tasarım sürecinde dikkatle göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer dezavantajları arasında yüksek hidrojen çözünürlüğü, sıcak çatlamaya yatkınlık ve düşük süneklik yer almaktadır (Güven, 2005).

Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerinin alüminyum dövme alaşımlara göre daha iyi olmasına rağmen, dökümden sonra uygulanan ısıt işlemler ile mekanik özelliklerinin artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. AlSi5Mg0,3 ve AlSi7Mg0,3 alüminyum alaşımlı malzemelerinin ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işleme sahip iki farklı durumunun gerilme-gerinme grafiğı Şekil 3.3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Isıt işlemler uygulaması malzemenin mekanik, fiziksel ve içyapı özelliklerinin istenilen seviyede iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır ve temel olarak ısıtma ve soğutma uygulamalarını içermektedir. Süreç içerisinde bulunan tavlama, çözeltiye alma, soğutma ve yaşlandırma işlemleri hedeflenen malzeme ve mekanik özelliklere göre farklılık göstermektedir (Güven, 2005). Bu çalışma kapsamında, alüminyum alaşımlı jant üretiminde en çok kullanılan malzemelerden biri olan, ticari adı ile A356.0 olarak bilinen AlSi7Mg alaşım malzemesinin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de ve T6 ısıt işlemlerli mekanik özellikleri de Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Isıt işlemler sürecinin adımlarındaki farklılıktan dolayı bu işlemler farklı ısıt işlemler kodları ile tanımlanmaktadır. Isıt işlemler uygulamalarının tipleri ve özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Isıl işlemlili - ısıt işlemsiz malzemelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Kaba ve diğer., 2018)

Tablo 3.1 Çalışmada kullanılan A356.0 T6 mekanik özellikleri (Işık, 2019)

Özellik	Değer	Birim
Özkütle	2,67	gr/cm ³
Sertlik	70 - 105	HB
Akma dayanımı	165	MPa
Çekme dayanımı	234	MPa
Kopma uzaması	3,50	%
Elastisite modülü	72,4	GPa
Kayma modülü	27,2	GPa
Poisson oranı	0,33	
İşlenebilirlik	50%	%

Tablo 3.2 Çalışmada kullanılan A356.0 T6 kimyasal özellikleri (Işık, 2019)

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
% 91,1-93,3	%0,20	%0,20	%0,25-0,45	%0,10	%6,5-7,5	%0,20	%0,10

Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarda ısıt işlemleri kodlaması (Güven, 2005)

Temper	Temper Kodu	Açıklama
	F	Mekanik veya ısıt işlemleri görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
	O	Tavllanmış ve yeniden kristalleşmiş
		Soğuk işlemleri uygulanmış
	H1x	Sadece soğuk işlemleri uygulanmış (x, deformasyon sertleşmesini göstermektedir.)
	H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen
	H3x	Soğuk işlemleri uygulanmış ve malzeme yaşlanmaması için düşük sıcaklıkta ısıt işlemleriyle stabilize edilmiş (x, stabilizasyon sonrası sertleşme işlemleri ifade eder.)
	W	Çözeltiye alınmış
		Yaşlandırma işlemleri göstermektedir
	T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlanmış
	T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
	T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
	T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış
	T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış.
	T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlanmış
	T7	Çözeltiye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
	T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
	T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlemleri uygulanmış
	T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlemleri uygulanmış, yapay yaşlanmış

3.1.3 Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırma işlemleri Amerikan Alüminyum Birliği tarafından belirlenmiş olan standartlara göre yapılmaktadır. Dört haneli kodlama sistemine dayalı olan bu sınıflandırma alaşımların kimyasal kompozisyonlarını temel alır. Dövme alüminyum alaşımları için kullanılan sınıflandırma sistemi Tablo 3.4'te, döküm alüminyum alaşımları için kullanılan sınıflandırma sistemi de Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Dövme alaşımların sınıflandırma sistemi; 1XXX grubu için ilk rakam alaşım grubunu, ikinci rakam orijinal alaşımdaki değişimi, son iki rakam da 1XXX serisi alaşımlarda alüminyumun saflığını tanımlar.

Döküm alaşımların sınıflandırma sistemi; 1XX.X grubu için noktanın sol tarafındaki iki rakam alaşım içerisindeki minimum alüminyum yüzdesini, noktadan sonraki rakam ürün şeklini tanımlar. Bu değer döküm için 0, külçe için 1 değerini alır.

Tablo 3.4 Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması (Işık, 2019)

<i>Alaşım</i>	<i>Sertleştirme yöntemi</i>		<i>1. Alaşım elementi</i>
	<i>Şekil değiştirme</i>	<i>Isıl işlem</i>	
1XXX	X		Al
2XXX		X	Cu
3XXX	X		Mn
4XXX	X		Si
5XXX	X		Mg
6XXX		X	Mg/Si
7XXX		X	Zn
8XXX		X	Li

Tablo 3.5 Döküm alüminyum alaşımların sınıflandırılması (Işık, 2019)

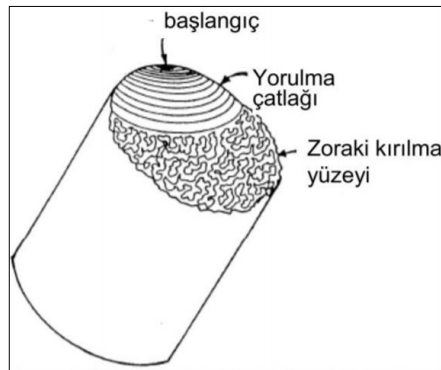
<i>Alaşım</i>	<i>Sertleştirme yöntemi</i>		<i>1. Alaşım elementi</i>
	<i>Şekil değiştirme</i>	<i>Isıl işlem</i>	
1XX.X	X		Al
2XX.X		X	Cu
3XX.X		X	Si, Mg, Cu
4XX.X		X	Si
5XX.X	X		Mg
7XX.X		X	Zn
8XX.X	X		Li

3.2 Yorulma

Yorulma, tekrarlı yüklemeler sonucu parçaların malzeme özelliklerinin bozulması ile oluşan bir hata türüdür. Makine parçalarına etki eden tekrarlı yük değeri, parçanın akma mukavemetinden daha düşük olduğu durumlarda bile yorulma hasarı meydana gelebilir. Malzemelerde yorulma kaynaklı meydana gelen deformasyon ve çatlaklar ile ilgili araştırmalar 19. yüzyıla dayanmaktadır. Malzeme bilimleri ve çatlak mekaniği

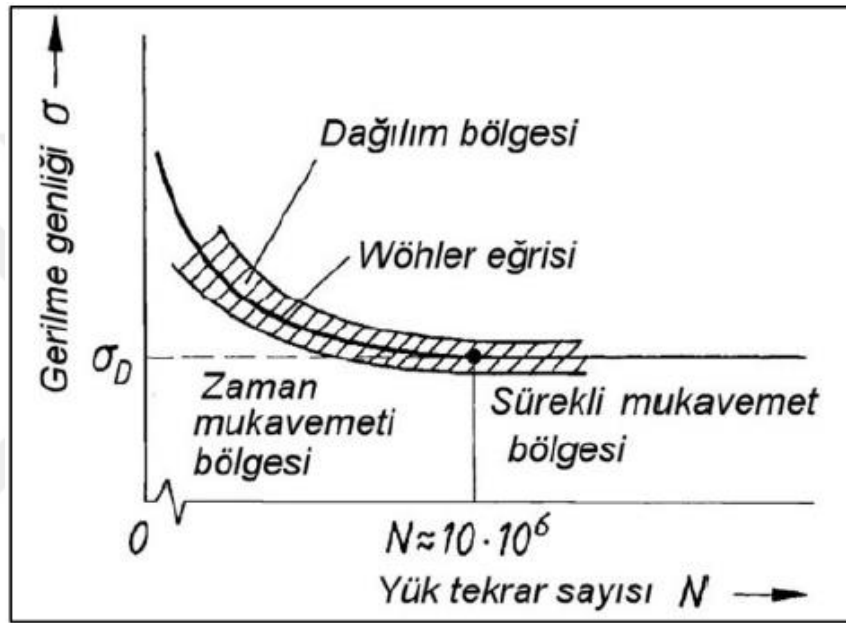
alanlarında elde edilen ilerlemeler ile birlikte, makine, inşaat, uzay mühendislikleri ve biyomekanik, uygulamalı fizik ve uygulamalı matematik alanlarında malzemelerde yorulma çalışmaları ana faaliyet konusu olarak önem kazanmıştır.

Yorulma gevrek bir hata türü olup, mekanik parçalarda oluşan hataların 90%'ını oluşturması ile kritik bir hata türü olarak ele alınır. Yorulma hasarı farklı biçimlerde görülebilir. Parçada şekil değişimine yol açan dalgalı dış gerilmeler mekanik yorulma hasarı oluşturur. Yüksek sıcaklık altında uygulanan periyodik birleşik yükler sürünme-yorulma hasarı, bu hasara yüksek sıcaklığın da etkisi var ise termomekanik yorulma hasarı(termal ve mekanik yorulma kombinasyonu) oluşur. Yoğun kimyasal etki veya gevrekleşme meydana gelen ortamlarda uygulanan tekrarlı yükler sonucu korozyon yorulması meydana gelir. Aralarında kayma ve yuvarlanma ilişkisi olan malzemelere tekrarlı yüklerin etkisi sonucu kayma temaslı yorulma ve yuvarlanma temaslı yorulma hasarları, maruz kaldığı titreşimler sonucu oluşan sarsıntı gerilimi altında ve temas yüzeylerin arasında oluşan sürtünmeli kayma gerilmesi altında titreşimli aşınma yorulması meydana gelir. Bahsedilen yorulma türleri, mekanizmalar ve yapısal komponentlerde meydana gelen hasarların çok büyük bir kısmını oluşturur. Bu tip hasarlar, statik çatlak analizleri ile belirlenen güvenli yüklerden daha düşük periyodik yükleme durumlarında meydana gelmektedir. Şekil 3.4 ile gösterilen başlangıç bölgesinden mikroskobik ölçekte çatlak başlar ve her çevrimde büyüyerek yorulma çatlağı bölgesine ilerler. Ardından makroskopik ölçekte çatlak oluşan malzeme, üzerine etki eden gerilme büyüklüğüne dayanamayarak kırılır (Suresh, 1998).



Şekil 3.4 Yorulma çatlağı örneği (Suresh, 1998)

Bir malzemenin hasar meydana gelen çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değerini tespit etmek için S-N grafiği veya Wöhler eğrisi kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi S-N grafikleri zaman mukavemet bölgesi ve sürekli mukavemet bölgesi olmak üzere iki bölgede incelenmektedir. Zaman mukavemet bölgesinde malzemenin ömrü belirli bir çevrim sayısına bağlıdır. Sürekli mukavemet bölgesinde malzeme üzerindeki gerilme σ_D yorulma sınırını geçmediği sürece pratik olarak malzemenin sonsuz ömre sahip olduğu kabul edilmektedir (Işık, 2019).

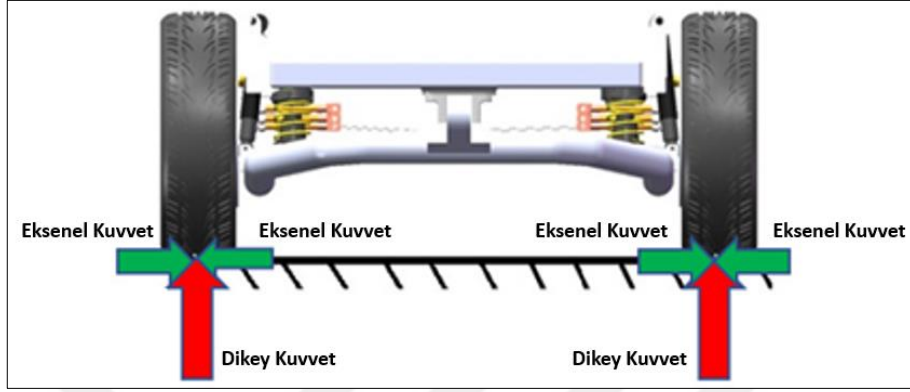


Şekil 3.5 S-N grafiği (Işık, 2019)

3.3 Çift Eksen Yorulma (Zwarp)

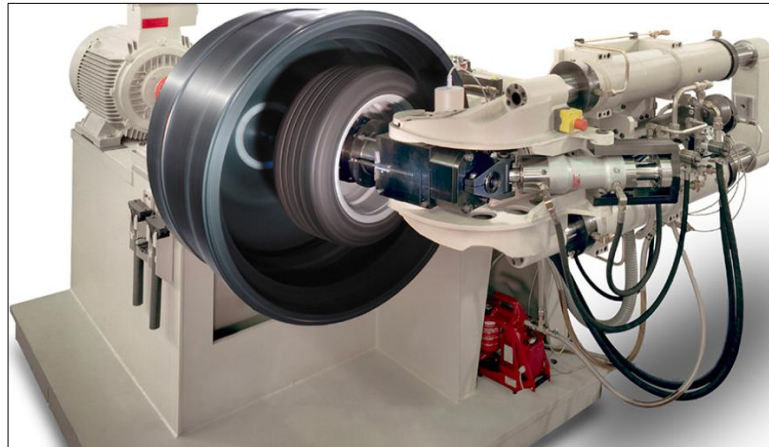
Jantların ömrü boyunca maruz kalacağı zor şartları seri üretimden önce doğrulamak adına, jantın darbe performansı için 90° veya 13° darbe testleri, dayanımı ölçmek için çeşitli statik ve dinamik testler, dinamik viraj yorulması ve radyal yorulma testleri kullanılır. Bunlara ek olarak, jantların gerçek yol koşullarındaki yorulma davranışını incelemek amacıyla, daha geniş kapsamlı bir yorulma çeşidi olan çift eksen yorulma (Zwarp) testi uygulanmaktadır. Alman otomotiv endüstrisi tarafından geliştirilmiş olan test ismini Almanca “ZWei Axialer Rader Prüfstand” kelimelerinin baş harflerinden alır. Dilimize tam çevirisi çift eksenli jant testi yapılabilir ancak jant sektöründe çift eksen yorulma testi olarak bilinmektedir. Bahsedilen çift eksen teriminin anlamı,

düz ve virajlı yollarda jantın maruz kaldığı dikey ve eksenel kuvvetlerin test tezgahında janta uygulanabilmesidir. Şekil 3.6'da değişken yol koşullarında jant üzerine etkiyen dikey ve eksenel kuvvetler gösterilmiştir (Tar ve Özdemir, 2021).



Şekil 3.6 Janta etkiyen dikey ve eksenel kuvvetler (Biçek ve diğer., 2020)

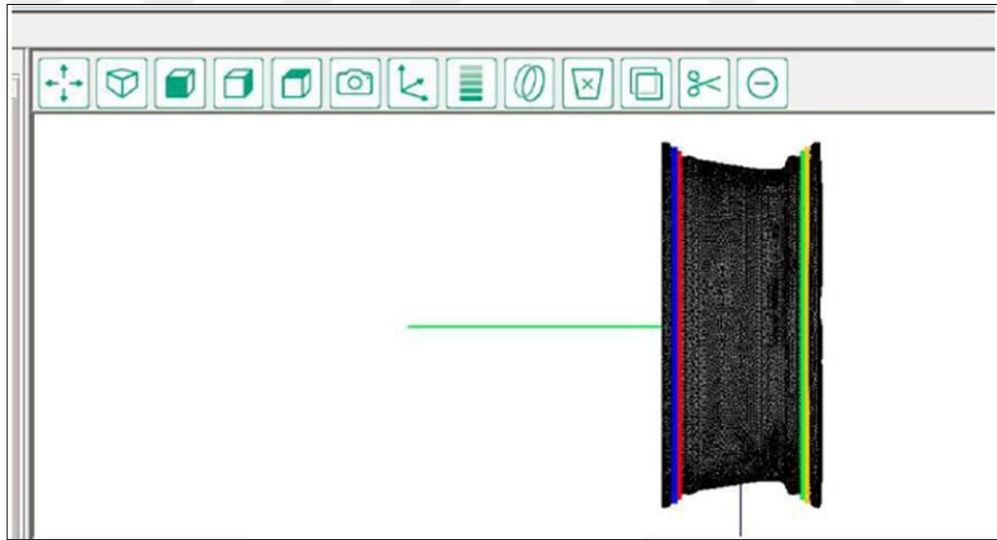
Çift eksen yorulma testinde tekrarlı ve farklı tur sayısına sahip yüklemeler altında oluşabilecek metal yorgunluğu incelenmektedir. Çift eksen yorulma testinin diğer yorulma testlerinden en önemli farkı, değişken genlikli yüklemelere olanak sağlayarak jantın gerçek yol koşullarına en yakın şartlar altında incelenmesidir. Çift eksen yorulma testi için Zwarp test tezgahı kullanılır. Farklı tipleri bulunan Zwarp test tezgahına ait bir örnek Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Farklı tezgah tiplerinin temelde çalışma prensipleri aynıdır. Tezgahın temel ekipmanlarında biri olan tambur parçası jantta dönme hareketi meydana getirirken, asıl işlevi yolu temsil etmektir. Test, kullanılacak janta uygun bir lastik ile gerçekleştirilmektedir (Kara ve Işık, 2019).



Şekil 3.7 Zwarp test tezgahı (Instron, 2021)

Servis yükü koşulları dikkate alınarak yapılan çift eksen yorulma testi yükleme, binek araç jantları için SAE J2562 standardına göre yapılmaktadır. Jant ve lastiğin montajlanması ile elde edilen tekerlek tertibatına kinematik bağlantılar aracılığı ile dikey ve eksenel kuvvetler uygulanmaktadır. Tekerlek tertibatı dönen tambura temas ettirilerek tekerlek üzerinde gerçek yol koşullarının oluşması sağlanır. Çift eksen yorulma testi, dikey ve eksenel yük dizilerinin tekrarlı olarak janta uygulanması ile gerçekleştirilir. Her bir yük çifti ve eğim açısı OEM firmalar tarafından belirtilen devir sayısı kadar uygulanmaktadır. Jantın testte başarılı olma şartı, OEM firmalar tarafından belirtilen yol mesafesini çatlaksız olarak tamamlamasıdır (SAE J2562).

LBF.WheelStrength analiz programı ile gerçekleştirilen çift eksen yorulma analizi, programa yüklerin uygulandığı bölgelerin ve uygulanması gereken yük miktarının tanıtılması aşamalarından oluşmaktadır. Jantın lastik ile temas ettiği bölgeye dairesel olarak uygulanan yüklerin WheelStrength programına tanıtıldığı örnek Şekil 3.8’de gösterilmiştir. WheelStrength tarafından jantın teker yüküne göre hesaplanan ve çalışmada kullanılan kuvvetler de Tablo 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Yüklerin uygulandığı dairesel bölgeler (Kara ve Işık, 2019)

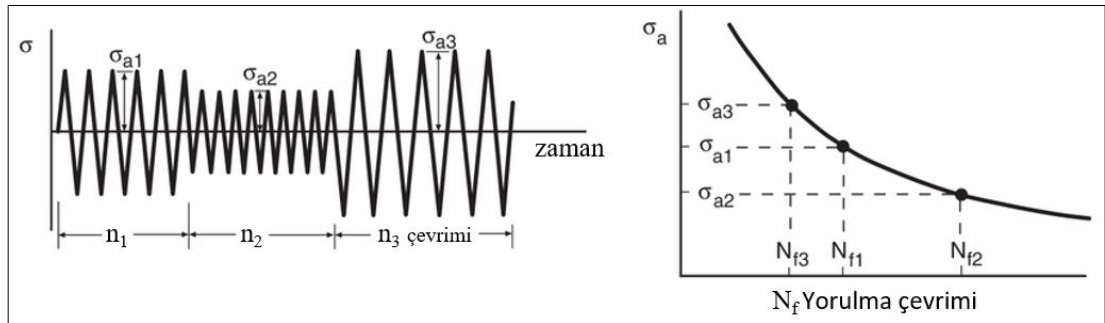
Tablo 3.6 Yükleme şartları

	Dikey kuvvet (kN)	Eksenel kuvvet (kN)	Bileşke kuvvet (kN)
Düz Yol Şartı	13,92	0	13,92
Virajlı Yol Şartı	12,02	9,96	15,61

Çift eksen yorulma testi değişken genlikli bir yorulma testi olduğu için WheelStrength programının analiz çözümünde kümülatif hasar hesabı yöntemi kullanılmaktadır. Jantın üzerindeki herhangi bir noktaya test esnasında zamana bağlı şekilde değişen farklı kuvvetler etki etmektedir. Etki eden yüklerin değişken genlikli olması nedeniyle hasar hesabı Palmgren-Miner gerilme-ömür yaklaşımı kullanılarak yapılmaktadır.

Palmgren-Miner kuralı karmaşık ve değişken yükleme koşulları altında çalışan parça üzerindeki hasar başlangıcını tahmin eder. Hesaplamalar, kullanılan malzemenin S-N eğrisi ve yüklerin uygulanma tekrarına bağlıdır. Çevrimsel yükleme koşullarındaki hasarı belirlemek için Formül 3.1 kullanılır. Burada $n_1, n_2, \dots, n_f$, geometrinin belirli bir gerilme altında maruz kaldığı gerçek yükleme döngüleri ve $N_1, N_2, \dots, N_f$, malzemenin belirli bir gerilme seviyesine dayanabileceği döngü sayısıdır. N_f , S-N eğrilerinden elde edilir (Şekil 3.9). Formül 3.1 sonucu 1 değerine ulaştığında hasar başlangıcı gerçekleşmektedir. Palmgren-Miner kuralı çoklu çevrimsel yüklemenin yorulma üzerindeki etkisini inceleyen standart bir yaklaşımdır.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_f}{N_f} = 1 \quad (3.1)$$



Şekil 3.9 Palmgren-Miner kuralı (Suresh, 1998)

Palmgren-Miner kuralının WheelStrength programında uygulanma yöntemi Şekil 3.10'daki örnek grafikte gösterildiği gibidir. Palmgren-Miner kuralında 1 olarak kabul edilen hasar başlangıcı WheelStrength programında güvenlik katsayısı da dahil edilerek 0,5 olarak kabul edilir. Hasar yığılması hesabı sonucunda 0,5 hasar başlangıç limitine göre, WheelStrength programı tarafından yapılan iterasyon ile jant üzerindeki

her nokta için RFS (Required Fatigue Strength – Gerekli Yorulma Dayanımı) adı verilen bir kritik gerilme değeri elde edilmektedir. Öncelikle WheelStrength programı tarafından her noktada oluşan gerilme değeri hesaplanır. Sonrasında her nokta üzerinde oluşan hasar değerinin hesabı yapılır (Formül 3.2). Ardından hasar 0,5 limit değerine gelecek şekilde yapılan iterasyonlar ile Formül 3.3’te gösterilen RFS değerine ulaşılır (LBF.WheelStrength User Manual, 2016).

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (3.2)$$

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_{a,i}}{RFS} \right)^{-k} \quad (3.3)$$

D: Hasar değeri

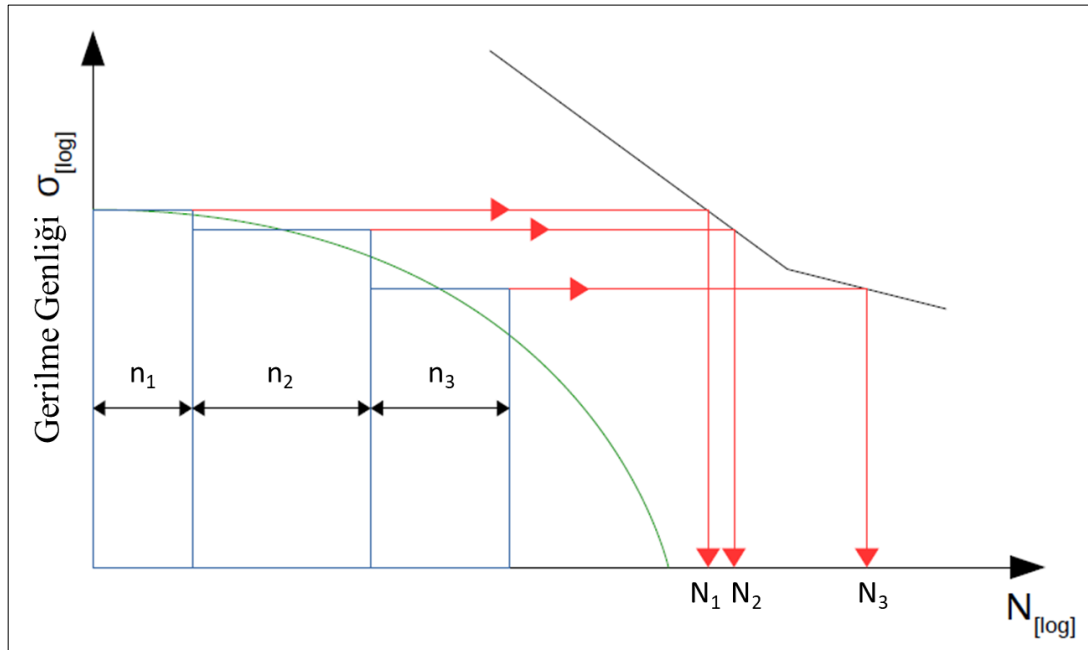
n_i : Kuvvet uygulanma tekrarı

N_i : Yorulma çevrimi

N_D : WheelStrength malzeme sabiti

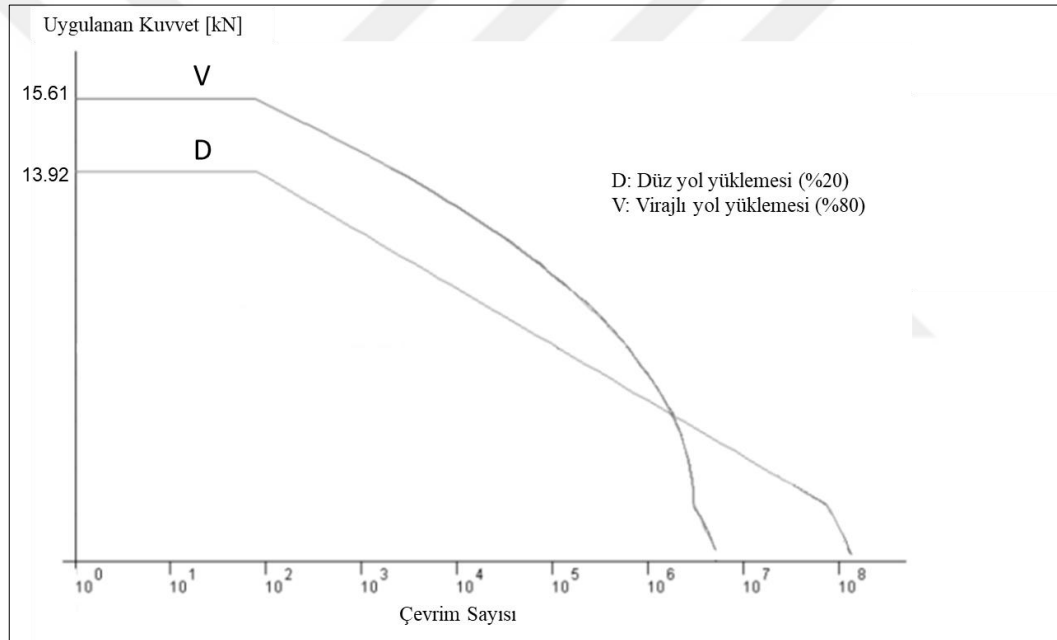
$\sigma_{a,i}$: Gerilme genliği

k: S-N eğrisinin eğimi



Şekil 3.10 Hasar hesaplama eğrisi (LBF.WheelStrength User Manual, 2016)

WheelStrength programının janta çift eksen yorulma testi yükleme şartlarına göre uyguladığı kuvvetler Şekil 3.11’de gösterildiği gibidir. Test temel olarak düz yol ve viraj yüklemelerinden oluşmaktadır. Düz yol yüklemesi testin %20’sini oluşturmaktadır ve grafikte D harfi ile gösterilmiştir. Virajlı yol yüklemesi testin %80’ini oluşturmaktadır ve grafikte V harfi ile gösterilmiştir. WheelStrength programı tarafından hesaplanan değerlere göre virajlı yol yüklemesinin maksimum değeri 15,61 kN, düz yol yüklemesinin maksimum değeri 13,92 kN’dur. WheelStrength yol verisine göre maksimum kuvvetler yaklaşık 10^2 tur uygulanmaktadır. Sonrasında çevrim sayısının artması ve kuvvet değerinin azalması ile değişken yükleme koşulları jant üzerine etkilimtedir.



Şekil 3.11 WheelStrength yük dağılım grafiği

BÖLÜM DÖRT

DENEY TASARIMI

Matematiksel istatistiğe dayalı deney tasarım çalışmaları 1920’lerde tarımsal deneylerle Sir Ronald Fisher, ardından 1950’lerde kimyasal deneylerle George Box tarafından başlatıldı. Günümüzde eğitim ve hizmet sistemleri gibi mühendislik alanlarının dışında da uygulanmaktadır. Deney tasarımı, uçak, otomobil ve televizyon gibi ürünlerin tasarımında, bilgisayar kodlarının artan kullanımı ile yazılım sektöründe popülerlik kazanmıştır. Boeing, General Motors ve Philips gibi şirketlerin bilgisayar destekli mühendislik (CAE) ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) çalışmalarında deneysel tasarımın kullanımı örnek teşkil etmektedir (Kleijnen, 2008).

Deney tasarımı, bir süreci ve bu sürecin çıktısını etkileyen faktörler arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Diğer bir ifade ile belirli bir süreç için sebep sonuç ilişkisi belirlemeye yarar. Elde edilen bilgiler sürecin çıktılarını optimize etmek için girdilerin yönetilmesi için kullanılır. Bir uygulamalı istatistik dalı olan deney tasarımı, kontrollü testlerden ve deneylerden elde edilen verileri planlamak, yürütmek, analiz etmek ve yorumlamak için bilimsel yöntemleri kullanmaya odaklanır. Bu yöntemin en büyük avantajı bir süreç veya tasarım için birden fazla değişkenin veya girdinin birbirleriyle etkileşimlerinin ve çıktı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlar.

Deney tasarımı bir deneyin amaçlarını belirlemek ve çalışma için süreç faktörlerini seçmekle başlar. Sonraki adımda deneyleri yapmadan önce ayrıntılı bir deney planının hazırlanması gelir. İyi seçilmiş deneysel tasarımlar, belirli bir çaba için elde edilebilecek bilgi miktarını maksimize eder. Deney tasarımı yöntemi yapılacak çalışmaya göre değişebilir. Bu yöntemlerden bazıları tam faktöriyel deney tasarımı, eleme deney tasarımı, Taguchi deney tasarımı ve yanıt yüzeyi deney tasarımıdır. Her bir yöntemin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tam faktöriyel deney tasarımı ile parametrelerin tüm etkileşimleri çok sayıda kombinasyon ile detaylı bir şekilde belirlenebilirken, bu yöntemde deney sayısı diğer yöntemlere göre fazladır. Bunun yerine eleme deney tasarımı yöntemi kullanılarak ana etkiler daha az sayıda test ile

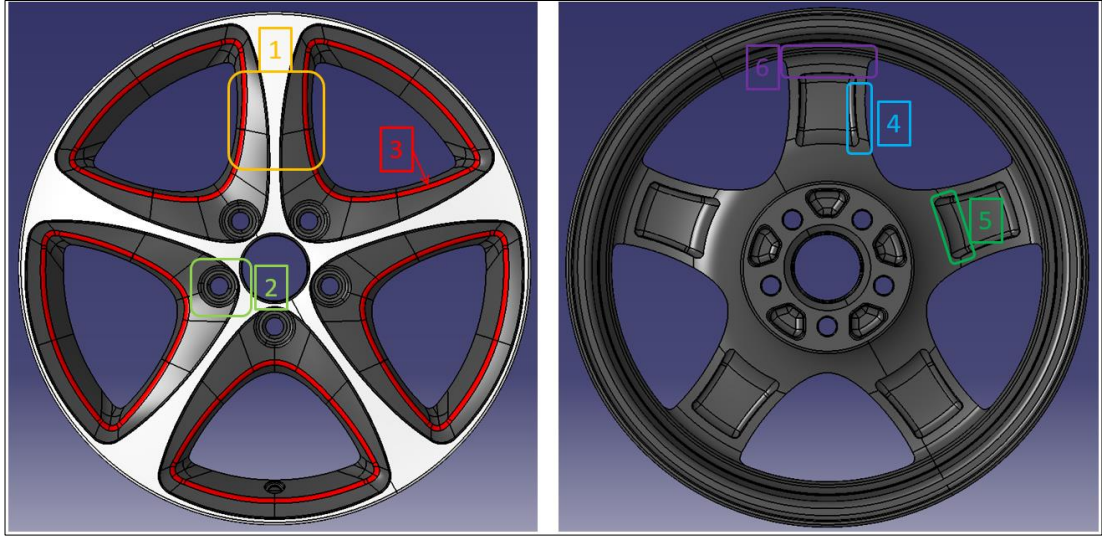
belirlenebilir. Girdilerin ana etkilerinin tespit edilmesinde çözünürlüğün fazla olduğu bu yöntemin dezavantajı ise, sayısı az olan deney kombinasyonları ile bileşik etkilerin tespit edilmesinde çözünürlüğün düşük olmasıdır (Moresteam, 2021).

4.1 Parametrelerin Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, jantın ön ve arka yüzeylerinde 3'er adet bölge ve her bir bölge için ayır ayrı değerlendirilecek 16 adet parametre incelenmiştir. Şekil 4.1'de gösterilen 6 adet bölge, çift eksen yorulma testlerinde genel olarak yaşanan problemlerden kazanılan tecrübeler referans alınarak belirlenmiştir. 6 adet bölge üzerinde etkisi olduğu düşünülen 16 adet ölçüsel tasarım parametresi, aynı şekilde elde edilen tecrübeye göre belirlenmiştir. Tablo 4.1'de listelenmiş olan ölçüsel tasarım parametreleri eleme deney tasarımının girdisi olarak kullanılmıştır.

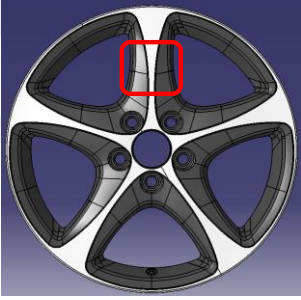
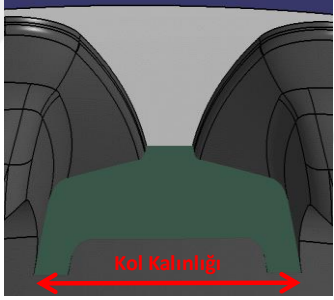
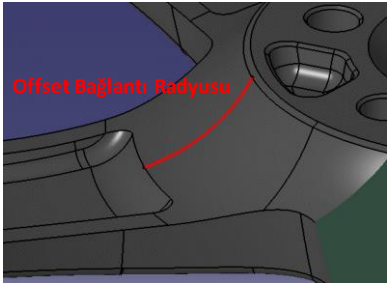
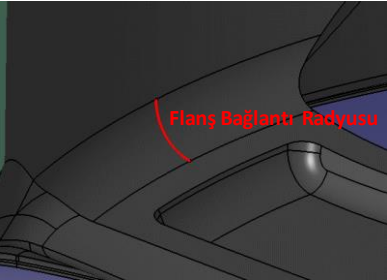
Çalışma kapsamında incelenen 6 adet bölge sırası ile; stil tarafında jantın kol üzeri olarak adlandırılan 1 numaralı bölge, 2 numaralı bijon bölgesi, 3 numaralı stil radyusu bölgesi, jantın arka tarafında her alüminyum alaşım jantta bulunan kol boşaltmaya bağlı bölgeler, 4 numaralı boşaltma yanı işleme yüzeyi bölgesi, 5 numaralı boşaltma için işlenmeyen brüt yüzey ve 6 numaralı kol ile lastik kesiti bağlantı radyusu bölgesi olarak tanımlanabilir.

Çalışma kapsamında belirlenen 16 adet parametre; kol kalınlığı (KK), offset bağlantı radyusu (OBR), flanş bağlantı radyusu (FBR), kol boşaltma genişliği (KBG), kol boşaltma uzunluğu (KBU), offset boşaltma derinliği (OBD), kol boşaltma derinliği (KBD), lastik kesiti orta açısı (LKO), hump genişliği (HG), lastik kesiti orta kalınlık (LKOK), lastik kesiti dış kalınlık (LKDK), stil radyusu (SR), bijon radyusu (BR), PCD, kol boşaltma konumu (KBK), anma genişliği (AG) parametreleridir.

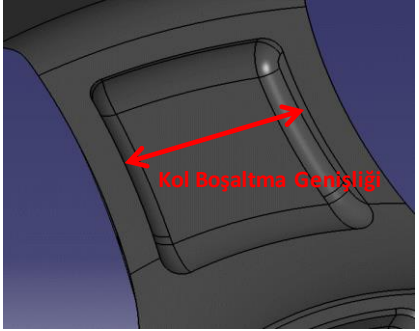
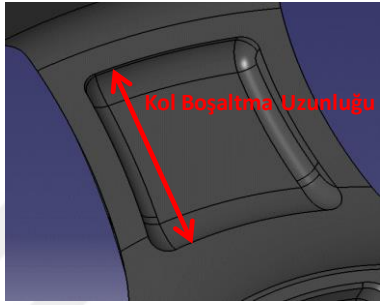
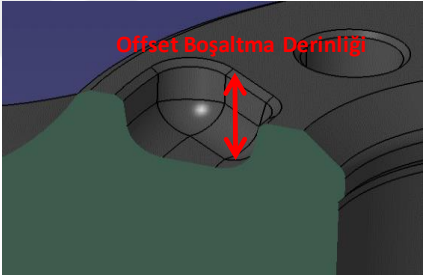
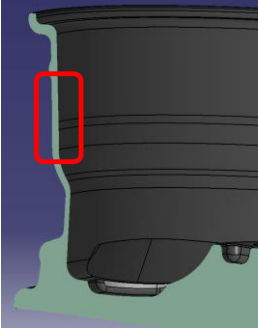


Şekil 4.1 İncelenen kritik bölgeler

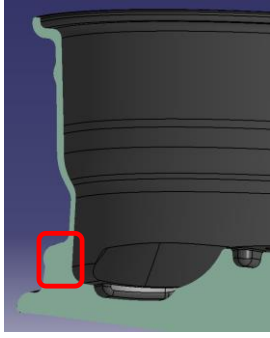
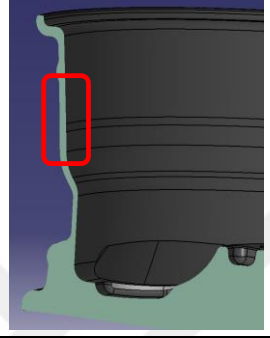
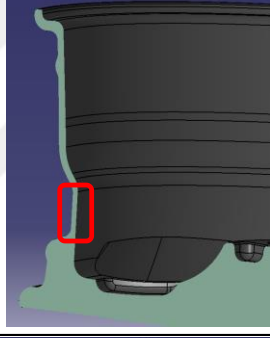
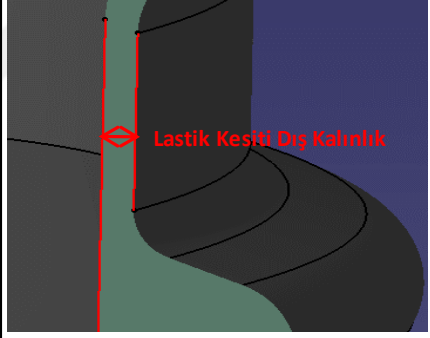
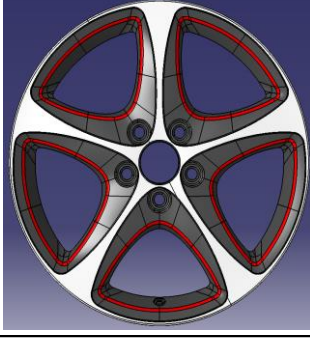
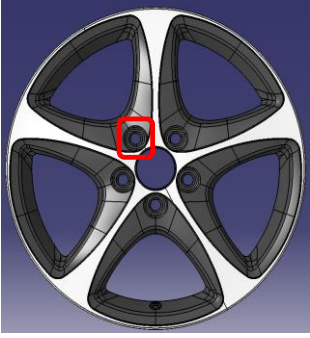
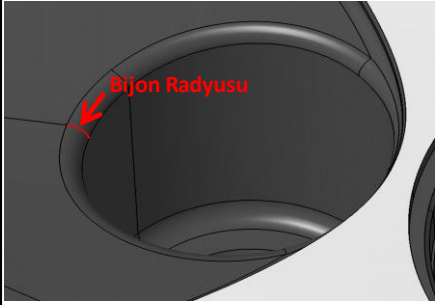
Tablo 4.1 İncelenen ölçüsel parametreler

Parametreler	Bölge	Detay Gösterim
Kol Kalınlığı		
Offset Bağlantı Radyusu		
Flanş Bağlantı Radyusu		

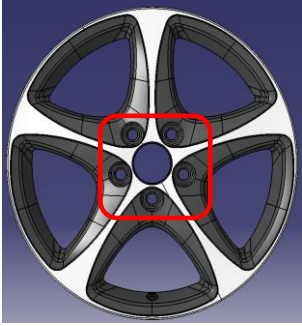
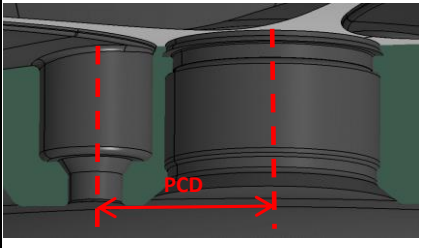
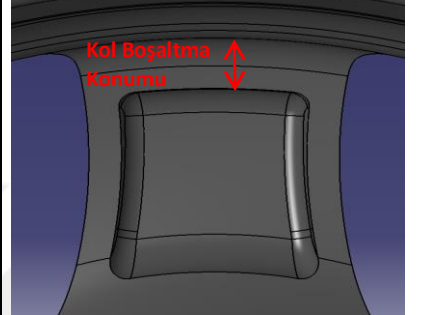
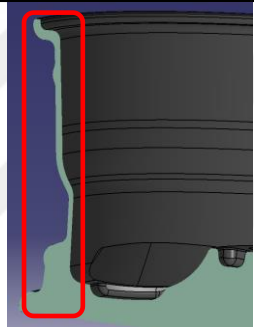
Tablo 4.1 devamı

Kol Boşaltma Genişliği		
Kol Boşaltma Uzunluğu		
Offset Boşaltma Derinliği		
Kol Boşaltma Derinliği		
Lastik Kesiti Orta Açı		

Tablo 4.1 devamı

Hump Genişliği		
Lastik Kesiti Orta Kalınlık		
Lastik Kesiti Dış Kalınlık		
Stil Radyusu		
Bijon Radyusu		

Tablo 4.1 devamı

PCD		
Kol Boşaltma Konumu		
Anma Genişliği		

4.2 Eleme Deney Tasarımı

Çalışmanın bu adımında parametrelerin jantın belirlenen bölgelerinin çift eksen yorulma ömrü üzerinde ana etkilerini tespit etmek amacıyla Minitab 18.0 istatistik programı ile eleme deney tasarımı oluşturulmuştur. Birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilen 16 adet parametre ile 16 faktörlü ve 2 düzeyli eleme deney tasarımı metodu kullanılmıştır. Öncelikle eleme deney tasarımı ile bölgeler üzerinde ana etkisi olan parametrelerin belirlenmesi, sonrasında elde edilen parametrelerin tam faktöriyel deney tasarımı ile etki derecelerinin daha detaylı incelenmesi planlanmıştır.

Hazırlanan eleme deney tasarımı için Minitab 18.0 istatistik programında 34 kombinasyonlu deney seti elde edilmiştir. Tablo 4.2’de gösterilen 34 adet modele ait

ölçüler Catia V5 R26 programında parametrik model oluşturmak için girdi olarak kullanılmıştır. Parametrik modelleme detayları jant modelleme bölümünde ve parametrelerin çift eksen yorulma üzerine etkisi sonuç bölümünde incelenmiştir.

Tablo 4.2 Eleme deney tasarımı

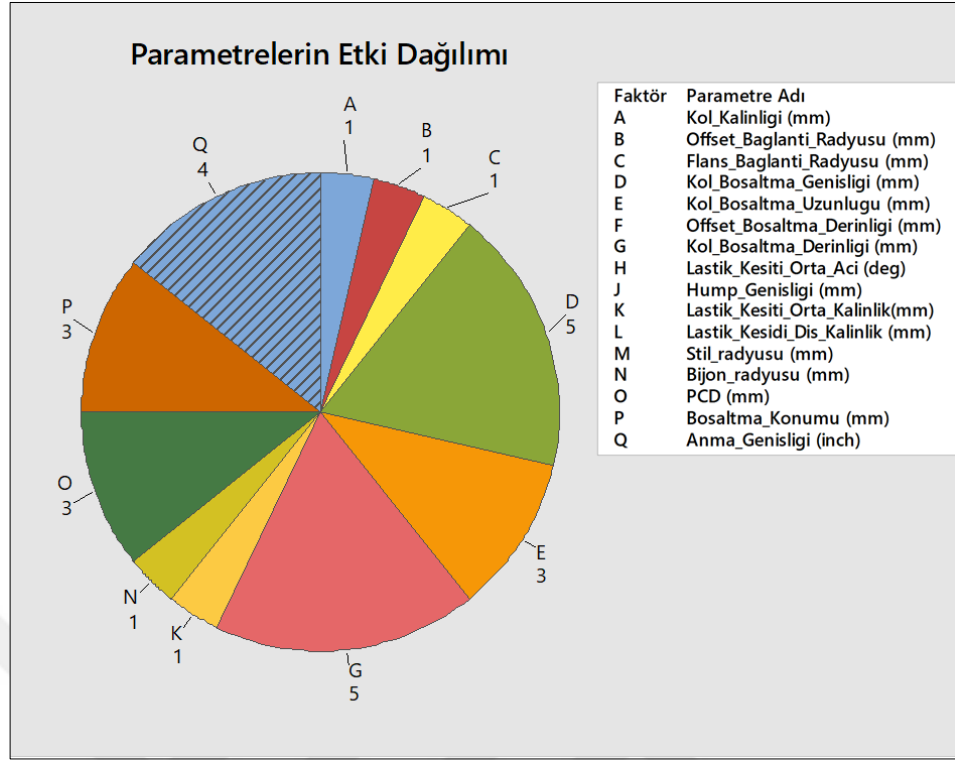
Analiz No	KK (mm)	OBR (mm)	FBR (mm)	KBG (mm)	KBU (mm)	OBD (mm)	KBD (mm)	LKOA (deg)	HG (mm)	LKOK (mm)	LKDK (mm)	SR (mm)	BR (mm)	PCD (mm)	BK (mm)
1	0	50	16	-8	40	30,05	4	1,5	21	4,25	3,5	2	3	50	10
2	3	40	10	-15	60	15,05	10	4	21	5	3,5	2	3	50	10
3	3	30	16	-15	60	30,05	4	1,5	23	5	3,5	6	2	50	7
4	0	50	16	-8	60	30,05	10	4	23	5	5	6	3	57,15	10
5	3	30	10	-8	40	30,05	10	2,75	21	3,5	3,5	6	2	57,15	10
6	0	40	16	-8	40	30,05	4	1,5	23	3,5	5	6	2	57,15	4
7	0	50	10	-8	40	15,05	7	4	23	5	3,5	6	2	50	4
8	4	50	10	-8	60	22,55	4	1,5	21	5	3,5	6	3	57,15	4
9	0	30	10	-15	40	15,05	4	1,5	22	5	5	6	3	57,15	10
10	0	30	16	-8	60	15,05	10	1,5	21	5	4,25	2	2	57,15	4
11	3	50	10	-8	60	15,05	4	1,5	23	3,5	5	2	2	50	10
12	0	30	10	-8	60	30,05	4	4	21	5	5	4	2	50	10
13	3	30	16	-15	60	30,05	7	1,5	21	3,5	5	2	3	57,15	10
14	0	40	13	-11,5	50	22,55	7	2,75	22	4,25	4,25	4	2,5	50	7
15	3	40	13	-11,5	50	22,55	7	2,75	22	4,25	4,25	4	2,5	57,15	7
16	3	50	13	-15	40	30,05	4	4	21	5	5	2	2	57,15	4
17	0	30	16	-15	40	30,05	10	4	21	5	3,5	6	3	57,15	4
18	0	50	16	-15	60	15,05	4	2,75	23	5	5	2	3	50	4
19	0	50	10	-15	60	30,05	10	1,5	21	3,5	5	6	2,5	50	4
20	3	50	16	-11,5	40	15,05	10	1,5	21	5	5	6	2	50	10
21	3	30	16	-8	50	15,05	4	4	21	3,5	5	6	3	50	4
22	3	30	10	-8	40	30,05	10	1,5	23	5	5	2	3	50	4
23	0	30	13	-8	60	15,05	10	1,5	23	3,5	3,5	6	3	50	10
24	0	50	10	-15	50	30,05	10	1,5	23	5	3,5	2	2	57,15	10
25	0	50	16	-15	60	15,05	4	4	21	3,5	3,5	6	2	57,15	10
26	3	30	10	-15	60	15,05	10	4	23	4,25	5	6	2	57,15	4
27	0	50	10	-8	40	15,05	10	4	21	3,5	5	2	3	57,15	7
28	0	30	10	-11,5	60	30,05	4	4	23	3,5	3,5	2	3	57,15	4
29	3	30	16	-8	40	15,05	4	4	23	5	3,5	3	2,5	57,15	10
30	3	30	10	-15	40	15,05	4	1,5	21	3,5	3,5	2	2	50	4
31	3	50	10	-15	40	30,05	4	4	23	3,5	4,25	6	3	50	10
32	3	50	16	-8	60	30,05	10	4	22	3,5	3,5	3	2	50	4
33	0	30	16	-15	40	22,55	10	4	23	3,5	5	2	2	50	10
34	3	50	16	-15	40	15,05	10	1,5	23	3,5	3,5	4	3	57,15	4

4.3 Faktöriyel Deney Tasarımı

Yapılan eleme deney tasarımı çalışması ile jantın 6 farklı bölgesi üzerinde ana etkisi olan parametreler belirlenmiştir. Kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği, boşaltma konumu, kol boşaltma uzunluğu, PCD ve anma genişliği parametreleri bölgeler üzerinde en çok etki derecesine sahip olan ortak parametrelerdir (Şekil 4.2). Bu nedenle bu parametrelerin uygun şekilde optimizasyonu ile jantın mekanik performansında etkili bir artış elde edilebilir.

Jantın çift eksen yorulmada oluşan gerilme değerleri üzerinde ana etkiye sahip parametrelerin etkilerinin daha detaylı incelemek ve tasarım optimizasyonu çalışması ile ağırlık-gerilme kriterlerine göre en iyi tasarıma ulaşmak amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Bu deney tasarımı için etkili bulunan parametreler tekrar değerlendirilmiştir. PCD ve anma çapı parametreleri her projenin başında müşteri tarafından belirlenen ve tedarikçi firma tarafından değiştirilmeye uygun olmayan parametrelerdir. Bu nedenle tasarım optimizasyonu çalışmasına dahil edilmemiştir. Tasarımı tedarikçi firmaya ait olan kol boşaltması ölçülerini belirleyen diğer 4 adet parametre kullanılarak tam faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuştur.

Deney tasarımının bu aşamasında, bahsedilen 4 adet parametre dışındaki tüm parametreler sabit tutulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı için 4 faktörlü 4 düzeyli tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. 4 adet parametrenin sonuç üzerindeki etkisinin daha detaylı tespiti ve minimum ağırlık-gerilme değerlerini sağlayacak şekilde optimize edilmesi için Catia programında 16 farklı model hazırlanmış ve WheelStrength programında analizleri yapılmıştır. Deney seti kombinasyonları Tablo 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Parametrelerin etkili olduğu bölgelere göre sayısal dağılımı

Tablo 4.3 Tam faktöriyel deney tasarımı

Analiz No	KBG (mm)	KBU (mm)	KBD (mm)	BK (mm)	Ağırlık (kg)
1	-15	40	4	4	9,478
2	-8	60	10	4	9,000
3	-8	60	4	10	9,260
4	-8	60	4	4	9,120
5	-15	40	4	10	9,353
6	-15	60	4	4	9,190
7	-15	60	10	4	9,193
8	-8	40	10	10	9,226
9	-15	60	4	10	9,156
10	-15	60	10	10	9,110
11	-8	40	4	4	9,134
12	-8	40	10	4	9,251
13	-15	40	10	10	9,341
14	-8	40	4	10	9,342
15	-8	60	10	10	8,953
16	-15	40	10	4	9,337

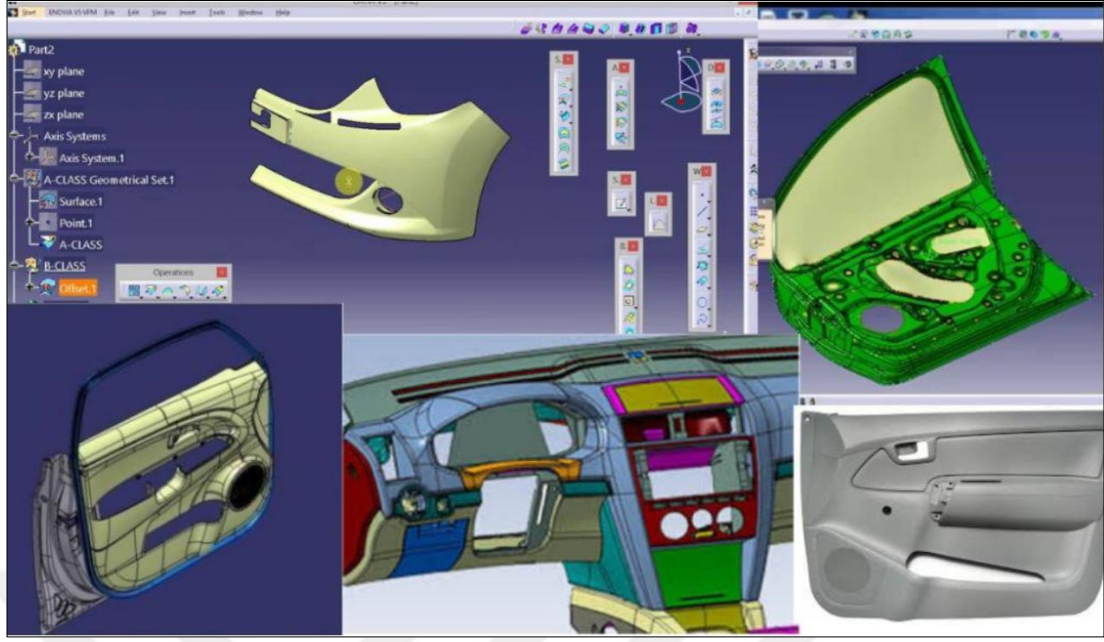
BÖLÜM BEŞ

MODELLERİN OLUŞTURULMASI

Günümüzde sektörlerin ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı kullanıcı türleri için birçok farklı türde üç boyutlu modelleme programı bulunmaktadır. Catia üç boyutlu modelleme programı bilgisayar destekli tasarım, üretim, mühendislik ve PLM için eksiksiz birçok platform çözümü sunmaktadır. Dassault Systemes üreticisine ait yazılım katı ve yüzey modelleme, montaj, iki boyutlu çizim, imalat ve analiz oluşturma amacıyla kullanılmaktadır.

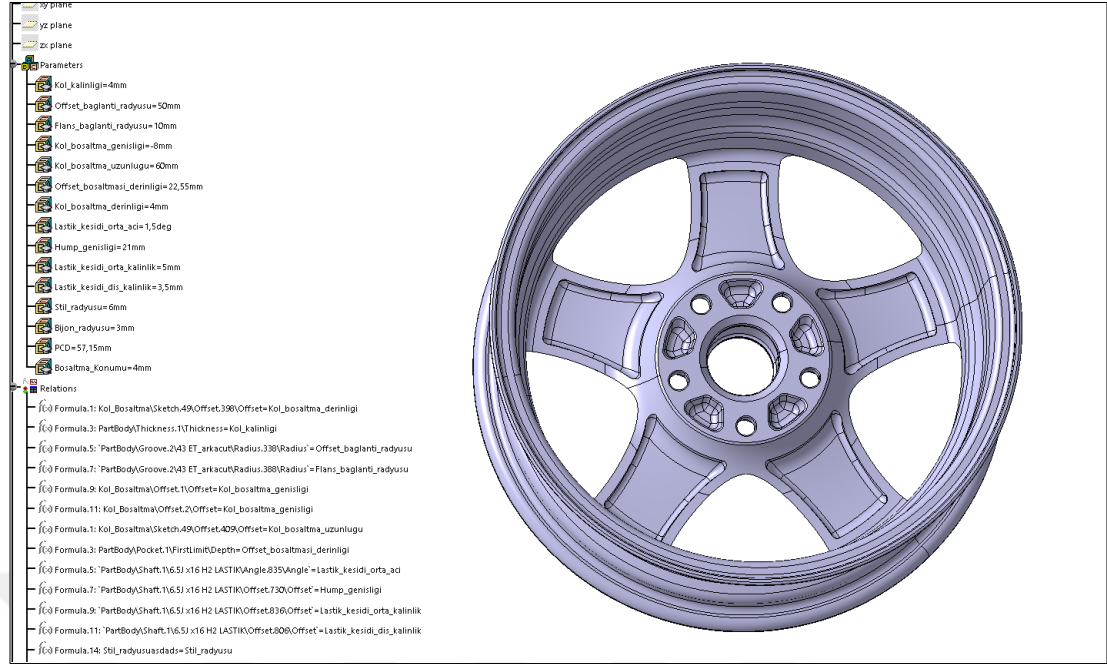
Catia, 1970’lerde Dassault Systemes tarafından özellikle Mirage savaş uçaklarının tasarım süreçleri için geliştirilmiştir. Daha sonra havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi farklı sektörlerdeki ulaşım araçlarının geliştirme çalışmaları için kullanılmıştır. Dassault Systemes ekibi kuruluşundan bugüne Catia programının en son sürümüne ulaşana kadar yazılımın işlevlerini yenilemeye ve iyileştirmeye devam etmiştir. Günümüzde önemi bir hayli artan üç boyutlu modelleme programlarının arasında Catia, en yaygın kullanılan yazılım programlarından biridir. Şekil 5.1’de bir aracın gövde ve iç yapısına ait bazı parçaların Catia programındaki tasarımı gösterilmiştir.

Yapılan çalışmada deney tasarımları ve parametrelerin optimizasyonu için kullanılmak amacıyla, değişmeyen ölçüleri ETRTO standardına uygun olacak şekilde ve değişen ölçüleri Minitab 18.0 programından alınmış olan 34 adet jantın modellemesi yapılmıştır. Çalışma için 5 kollu ve 5 bijonlu standart bir jant geometrisi kullanılmıştır. Jantların modellemesi Catia V5 R26 tasarım programı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1 Catia temsili çizim (Mcadsolution, 2021)

Minitab 18.0 programında deney tasarımı oluşturduktan sonra deney tasarımındaki ölçüler kullanılarak jantların modellenmesi gerekmektedir. Bunun için Catia V5 R26 programında ilgili ölçülere fonksiyon ataması yapılarak değişken parametre sistemi oluşturulmuştur. Sonrasında deney tasarımında elde edilen ölçü listesi excel formatında Catia programına girilerek tasarım tablosu oluşturulmuştur. Temel jant geometrisi ve ilgili parametreler Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekil 5.3’te ise Catia programında oluşturulan tasarım tablosu ve ölçüsel ilişkiler gösterilmiştir. Bu yöntem ile tasarım tablosundan herhangi bir model seçilip ölçülerin otomatik olarak güncellenmesi sağlanmıştır. Farklı ölçü kombinasyonlarına sahip iki model Şekil 5.4’te gösterilmiştir. İki model arasında kol boşaltma genişliği, kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma derinliği ve kol kalınlığı parametreleri farklılık göstermektedir. 34 adet model tasarımı oluşturulurken 4 adet değişken parametre dışındaki ölçülerin aynı kalması sağlanmıştır.



Şekil 5.2 Jant tasarım örneği

TEZ_Janti active, configuration row: 17

Design Table Properties
Name: TEZ_Janti
Comment: DesignTable created by KİTAR 14.05.2021

Configurations Associations

Filter:

Line	Kol_kalinligi	Offset_baglanti_radyusu	Flans_baglanti_radyusu	Kol_bosaltma_genisligi	Kol_bosaltma_uzunlugu	Offset_bosaltmasi_derinligi	Kol_bosaltma_derinligi	Lastik_kesidi_orta_aci	Hump_genisligi
1	0mm	50mm	10mm	-8mm	40mm	30,05mm	4mm	1,5deg	21mm
2	3mm	40mm	10mm	-15mm	60mm	15,05mm	10mm	4deg	21mm
3	3mm	30mm	10mm	-15mm	60mm	30,05mm	4mm	1,5deg	23mm
4	0mm	50mm	10mm	-8mm	60mm	30,05mm	10mm	4deg	23mm
5	3mm	30mm	10mm	-8mm	40mm	30,05mm	10mm	2,75deg	21mm
6	0mm	40mm	10mm	-8mm	40mm	30,05mm	4mm	1,5deg	23mm
7	0mm	50mm	10mm	-8mm	40mm	15,05mm	7mm	4deg	23mm
8	4mm	50mm	10mm	-8mm	60mm	22,55mm	4mm	1,5deg	21mm
9	0mm	30mm	10mm	-15mm	40mm	15,05mm	4mm	1,5deg	20mm
10	0mm	30mm	10mm	-8mm	60mm	15,05mm	10mm	1,5deg	21mm
11	3mm	50mm	10mm	-8mm	60mm	15,05mm	4mm	1,5deg	23mm
12	0mm	30mm	10mm	-8mm	60mm	30,05mm	4mm	4deg	21mm
13	3mm	30mm	10mm	-15mm	60mm	30,05mm	7mm	1,5deg	21mm
14	0mm	40mm	10mm	-11,5mm	50mm	22,55mm	7mm	2,75deg	20mm
15	3mm	50mm	13mm	-11,5mm	50mm	22,55mm	7mm	2,75deg	20mm
16	3mm	50mm	13mm	-15mm	40mm	30,05mm	4mm	4deg	21mm
17	3mm	50mm	10mm	-15mm	40mm	15,05mm	10mm	1,5deg	21mm
18	0mm	50mm	10mm	-15mm	60mm	15,05mm	4mm	2,75deg	23mm
19	0mm	50mm	10mm	-15mm	60mm	30,05mm	10mm	1,5deg	21mm
20	3mm	50mm	10mm	-11,5mm	40mm	15,05mm	10mm	1,5deg	21mm
21	3mm	30mm	10mm	-8mm	50mm	15,05mm	4mm	4deg	21mm
22	3mm	30mm	10mm	-8mm	40mm	30,05mm	10mm	1,5deg	23mm
23	0mm	30mm	13mm	-8mm	60mm	15,05mm	10mm	1,5deg	23mm
24	0mm	50mm	10mm	-15mm	50mm	30,05mm	10mm	1,5deg	23mm
25	0mm	50mm	10mm	-15mm	60mm	15,05mm	4mm	4deg	21mm
26	3mm	30mm	10mm	-15mm	60mm	15,05mm	10mm	4deg	23mm
27	0mm	50mm	10mm	-8mm	40mm	15,05mm	10mm	4deg	21mm
28	0mm	30mm	10mm	-11,5mm	60mm	30,05mm	4mm	4deg	23mm
29	3mm	30mm	10mm	-8mm	40mm	15,05mm	4mm	4deg	23mm
30	3mm	30mm	10mm	-15mm	40mm	15,05mm	4mm	1,5deg	21mm
31	3mm	50mm	10mm	-15mm	40mm	30,05mm	4mm	4deg	23mm
32	3mm	50mm	10mm	-8mm	60mm	30,05mm	10mm	4deg	23mm
33	0mm	30mm	10mm	-15mm	40mm	22,55mm	10mm	4deg	23mm
34	3mm	50mm	10mm	-15mm	40mm	15,05mm	10mm	1,5deg	23mm

Edit table...

OK Apply Cancel

Şekil 5.3 Catia V5 tasarım tablosu



Şekil 5.4 Farklı parametrelere sahip jant tasarım örneği

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Çalışmanın deney tasarımından sonra analiz ve testlerde kullanılacak veriler, projelerde genellikle kullanılan değer aralığında olmasına dikkat edilerek, Tablo 6.1'deki gibi belirlenmiştir. Analiz sonucu olarak MPa cinsinden RFS gerilme değerleri incelenmiştir. Elde edilen gerilme değerleri jantın çift eksen yorulma ömrü ile ters orantılı olarak bilgi vermektedir. Gerilme değerlerinin yüksek olması jantın belirtilen bölgedeki deformasyon miktarının yüksek olduğunu ve yorulma hasarı oluşma süresinin daha kısa olduğunu göstermektedir. Projede kullanılacak jantın en temel ölçüsü olan anma çapı ve anma genişliği ölçüsünü belirlemek için CMS Jant ve Makine Sanayi A. Ş. firmasında son yıllarda yapılan projelerdeki jant ölçülerinin pareto grafiği yapılmıştır. Anma genişliği ve anma çapı ölçülerine ait pareto grafiği Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Grafiğe göre binek araç sektöründe en çok talep edilen jant boyutlarının “6,5Jx16 inç” ve “7Jx17 inç” olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılacak jant 6,5Jx16 inç boyutlarında seçilmiştir. Bunun yanında jantın anma genişliği ölçüsü arttıkça çift eksen yorulma davranışına olan etkisini görmek amacıyla, 7,5Jx16 inç boyutlarında jant da çalışmada ayrıca incelenmiştir. Buna ek olarak, jantın flanş tipi, offset mesafesi, bijon sayısı, lastik ölçüleri, tur sayısı, lastik basıncı ve teker yükü özelliklerine genel olarak projelerde kullanılan jantlar incelenilerek karar verilmiştir. Çift eksen yorulma yükü hesabı, standart kuvvet hesabı olan formül 6.1 kullanılarak yapılmıştır.

$$F = mg \quad (6.1)$$

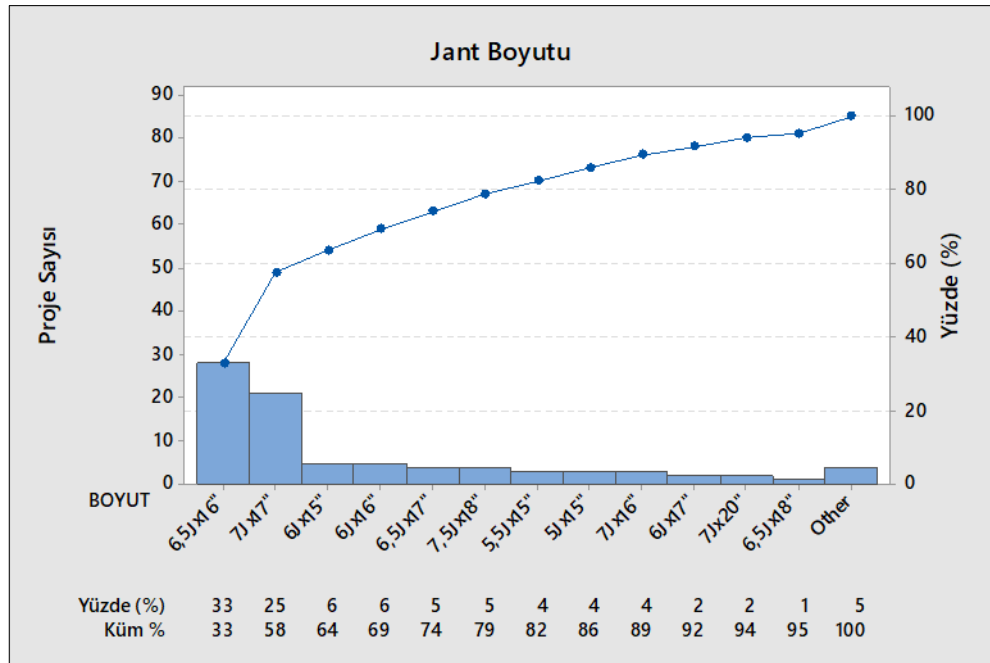
F = Çift eksen yorulma kuvveti (N)

m = Aracın teker yükü (kg)

g = yerçekimi ivmesi (m/s^2)

Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan jantın teknik özellikleri

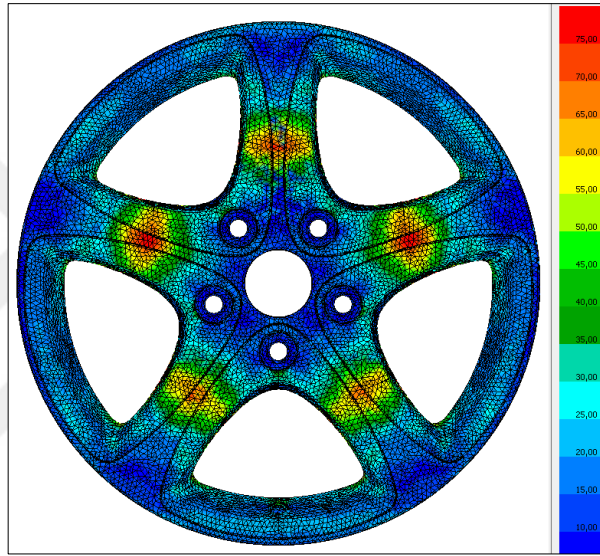
		
6,5 X 16 H2 ET43 5		
7,5 X 16 H2 ET43 5		
<i>Anma Genişliği (inç)</i>	6,5	7,5
<i>Anma Çapı (inç)</i>	16	
<i>Flanş Tipi</i>	H2	
<i>Offset Mesafesi (mm)</i>	43	
<i>Bijon Sayısı</i>	5	
<i>Teker Yüğü (kg)</i>	650	
<i>Çift Eksen Yorulma Yüğü (kN)</i>	6,37	
<i>Lastik Ölçüleri (mm)</i>	195/55 R16	
	205/55 R16	
<i>Tur Sayısı (km)</i>	300.000	
<i>Lastik Basıncı (kPa)</i>	400	



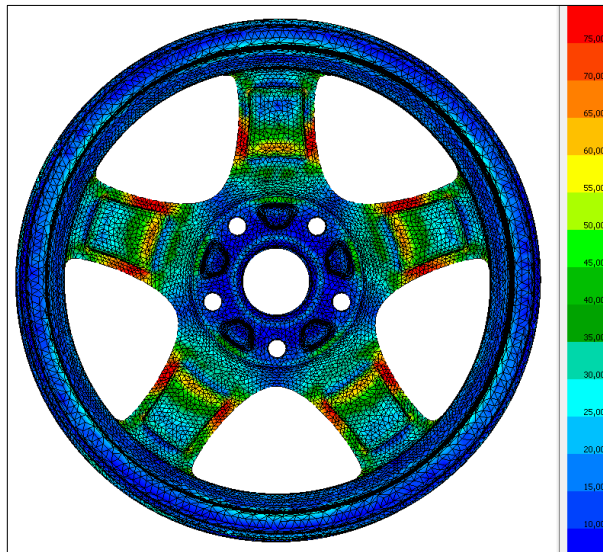
Şekil 6.1 Son yıllarda tasarlanan jantların ölçülerinin pareto grafiği

6.1 Eleme Deney Tasarımı Sonuçlarının İncelenmesi

Eleme deney tasarımı için gerekli olan 34 adet model Catia modelleme programında hazırlanarak Tablo 6.2 ile gösterilen analiz sonuçları elde edilmiştir. Analiz sonucu örnek görselleri Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 ile gösterilmiştir. Eleme deney tasarımında kullanılan model numaraları ve her bir model için değişen parametreler Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları model numaralarına göre Minitab 18.0 programına aktarılmıştır.



Şekil 6.2 WheelStrength analizinin ön yüzey örnek sonuç görseli



Şekil 6.3 WheelStrength analizinin arka yüzey örnek sonuç görseli

Tablo 6.2 Eleme deney tasarımı çift eksen yorulma analizi sonuçları

Analiz No.	Ön Yüzey			Arka Yüzey			Ağırlık (kg)
	1. Bölge (Mpa)	2. Bölge (Mpa)	3. Bölge (Mpa)	4. Bölge (Mpa)	5. Bölge (Mpa)	6. Bölge (Mpa)	
1	82	41	60	119	65	67	8,682
2	68	39	49	74	63	55	9,273
3	77	51	54	61	67	59	8,348
4	67	39	50	98	50	50	9,485
5	68	47	52	97	49	52	8,739
6	59	52	40	62	53	52	8,968
7	59	44	42	61	55	50	9,650
8	78	43	54	96	64	66	8,580
9	79	65	55	73	65	66	9,143
10	64	43	47	66	61	53	9,274
11	64	44	43	72	61	64	9,463
12	66	40	51	81	45	54	8,977
13	65	42	44	69	59	57	9,224
14	56	35	41	50	51	46	9,317
15	70	53	51	78	62	61	8,734
16	66	35	50	73	66	49	9,236
17	61	43	43	54	58	55	8,905
18	74	43	56	99	63	56	8,811
19	68	44	52	90	51	54	9,023
20	84	51	58	112	69	72	8,932
21	84	61	56	117	71	65	9,271
22	62	38	45	80	51	54	8,914
23	62	49	46	57	50	45	8,913
24	76	35	57	97	69	63	9,527
25	76	37	52	98	65	64	9,260
26	62	38	45	82	53	53	10,029
27	63	50	47	70	56	53	9,735
28	55	31	41	60	52	49	9,246
29	66	44	45	75	46	60	9,360
30	64	50	45	85	52	57	9,166
31	68	40	50	88	59	56	8,837
32	70	45	49	91	60	61	9,553
33	65	45	47	75	47	51	8,917
34	69	34	51	101	55	56	9,444

WheelStrength analiz programı ile elde edilmiş çift eksen yorulma analizi sonuçları Minitab 18.0 programı ile incelenerek Şekil 4.1’de gösterilen bölgeler üzerinde etkili olan ve olmayan parametreler belirlenmiştir.

Deney tasarımı çalışmaları ortaya atılan iki zıt hipotez ve bu hipotezlerin kabul edilmesi durumunda alınacak yüzdesel risklerin hesaplanması ile gerçekleştirilir. Deney tasarımının çözümünde Minitab 18.0 programı tarafından ortaya atılan ilk hipotez sıfır hipotezidir (H_0) ve parametrelerin sonuca etkisinin olmadığı kabulünü yapar. Çözümde önemli olan bir diğer terim ise P değeridir. P değeri, H_0 hipotezini reddettiğimiz zaman alacağımız risk değerinin yüzdesel ifadesidir. Bu yüzden P değerinin küçük olması incelediğimiz parametrenin sonuç üzerinde etkili olduğu anlamına gelir. Diğer bir ifade ile H_0 hipotezini reddetmenin, yani parametrenin etkili olduğunu kabul etmenin elde edeceğimiz sonuç üzerinde bir risk yaratmadığını gösterir. İstatistik bilimine göre H_0 hipotezini reddetmek için alınabilecek maksimum risk yüzdesi %5’tir. Bu nedenle bir parametrenin sonuç üzerinde etkili olduğu yorumunu yapabilmek için P değeri 0,05 değerinden küçük olmalıdır (Spac danışmanlık, 2021).

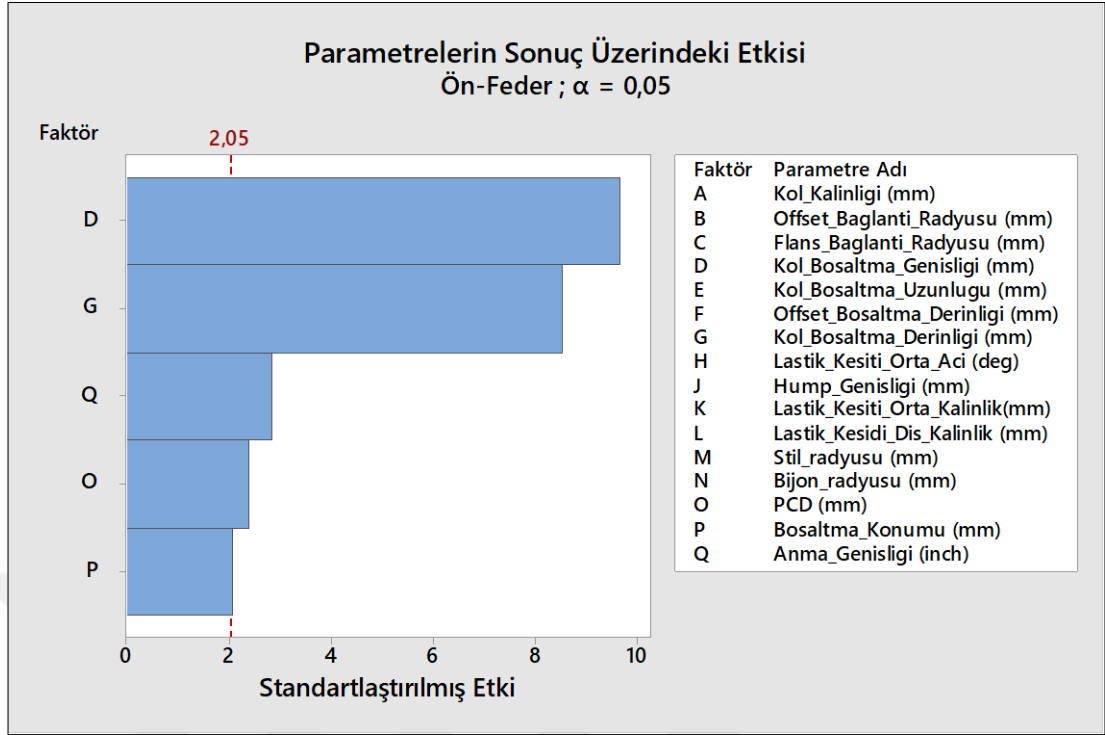
Daha önce bahsedilen 6 adet bölge için çift eksen yorulma analiz sonuçları kullanılarak, Minitab 18.0 programında 16 adet parametrenin eleme deney tasarımı analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunun çıktısı olarak da her parametre için ayrı ayrı P değerleri elde edilmiştir. Önceki paragrafta bahsedildiği gibi, P değeri 0.05’ten daha düşük olan parametreler için ilgili bölgenin analiz sonuçları üzerinde etkisi var yorumu yapabiliyorduk. Ön-Feder (1 numaralı) konumu üzerinde yapılan çalışmalarda kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği, anma genişliği, PCD ve boşaltma konumu parametrelerinin P değerleri 0,05 limit değerinin altında elde edilmiştir. Bu yüzden bu parametrelerin Ön-Feder bölgesinin çift eksen yorulma davranışı üzerinde etkili olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. İlgili parametrelerin P değerleri Tablo 6.3’te gösterilmiştir. P değeri 0,05 değerinin üzerinde olan diğer parametreler ilgili bölgede etkili olmadığı için tabloya dahil edilmemiştir.

Şekil 6.4'te Ön-Feder bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin birbirine göre oransal olarak standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile gösterilmiştir. Bu grafik P değeri ile paralel olacak şekilde her bir parametrenin etki derecesini göstermektedir. İstatistik bilimine göre P değeri 0,05 değerinden ne kadar küçük ise etkisi o kadar büyüktür. Örneğin 0,000 P değerine sahip kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliği parametrelerinin grafikte de en yüksek etki derecesine sahip olduğu görülmektedir. Grafikten hangi parametrenin etkisinin daha büyük veya hangi parametrenin etkisinin daha küçük olduğu sonucuna varılabilir. Ancak hangi parametrenin sonucu artırma veya azaltma yönünde etkilediği sonucu çıkartılamaz (Minitab, 2021).

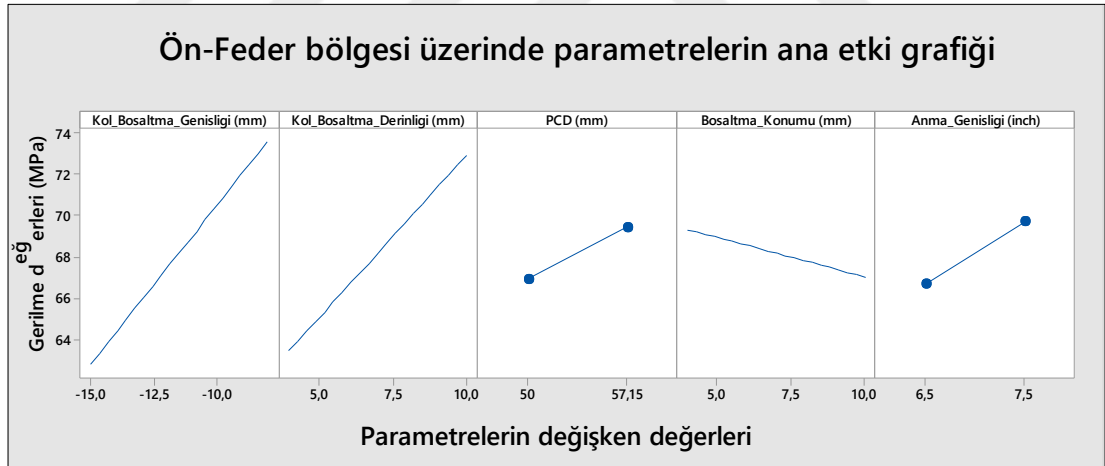
Şekil 6.5'te Ön-Feder bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin etki yönleri gösterilmiştir. Kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği, PCD ve anma genişliği parametrelerinin artışı çift eksen yorulmada jant üzerindeki gerilmeleri artırdığı görülmektedir. Diğer bir ifade ile bu parametrelerin artışı jantın yorulma ömrünün azalması yönünde etkisi olmaktadır. Boşaltma konumu değerinin artışı, yani kol boşaltmanın jantın göbek bölgesine yaklaşması çift eksen yorulmada jant üzerindeki gerilmeleri azaltmaktadır. Bu durum da jantın yorulma ömrünün artmasına sebep olacaktır.

Tablo 6.3 Ön-Feder üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

<i>Parametre</i>	<i>P değeri</i>
Kol Boşaltma Genişliği	0,000
Kol Boşaltma Derinliği	0,000
Anma Genişliği	0,008
PCD	0,023
Boşaltma Konumu	0,049



Şekil 6.4 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etkilerinin pareto grafiği



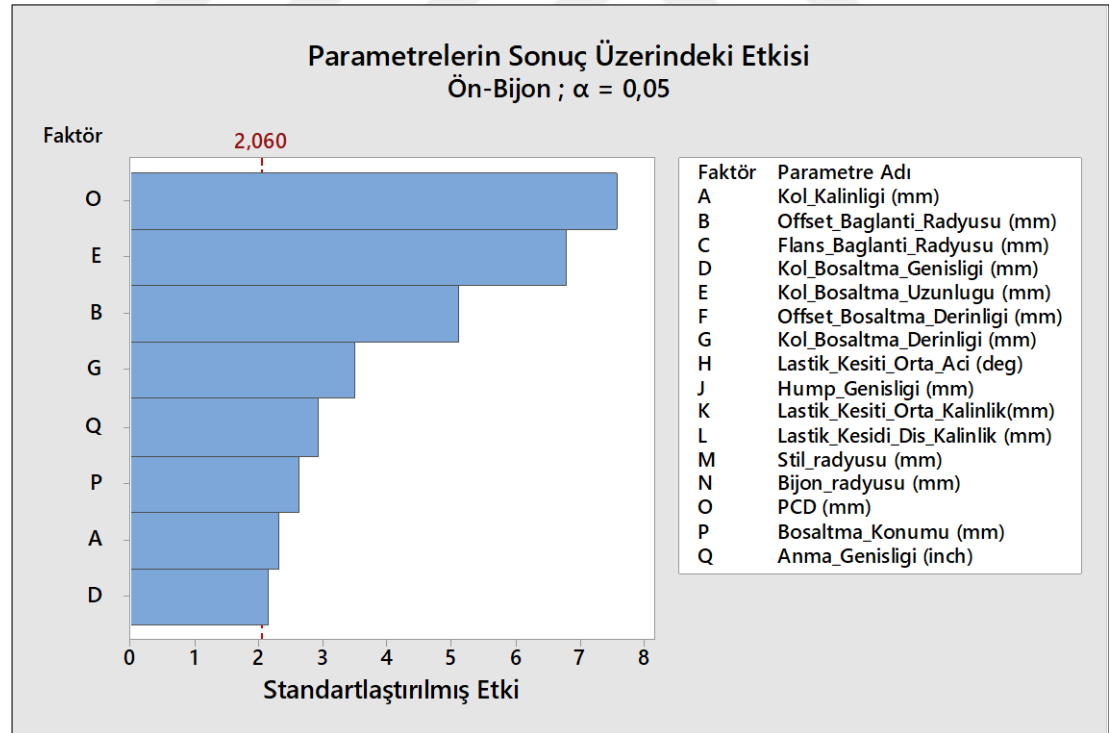
Şekil 6.5 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Tablo 6.4'te Ön-Bijon bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin elde edilen P değerleri gösterilmiştir. Bu bölgenin çift eksen yorulma davranışı üzerinde offset bağlantı radyusu, kol boşaltma uzunluğu, PCD, kol boşaltma derinliği, anma genişliği, boşaltma konumu, kol kalınlığı ve kol boşaltma genişliği parametreleri olmak üzere toplam 8 adet parametrenin etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.6'da Ön-Bijon bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile

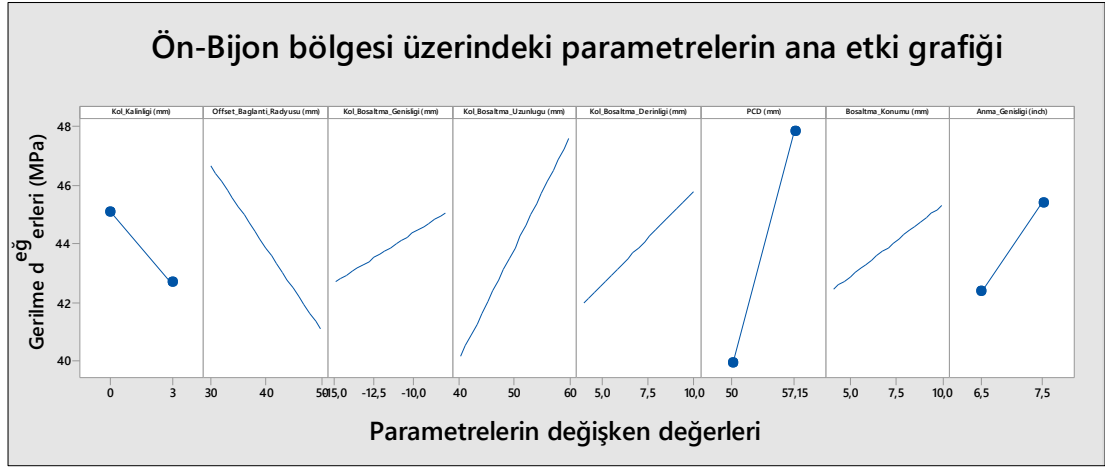
gösterilmiştir. Şekil 6.7'deki ana etki grafiğinde ise parametrelerin etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol kalınlığı ve offset bağlantı radyusu parametrelerinin artma yönündeki değişimi jantın yorulma ömrünün artmasına neden olduğu görülmüştür. Diğer parametrelerin artması jantın yorulma ömrünü azaltmaktadır.

Tablo 6.4 Ön-Bijon üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

Parametre	P değeri
Offset Bağlantı Radyusu	0,000
Kol Boşaltma Uzunluğu	0,000
PCD	0,000
Kol Boşaltma Derinliği	0,002
Anma Genişliği	0,007
Boşaltma Konumu	0,015
Kol Kalınlığı	0,029
Kol Boşaltma Genişliği	0,041



Şekil 6.6 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

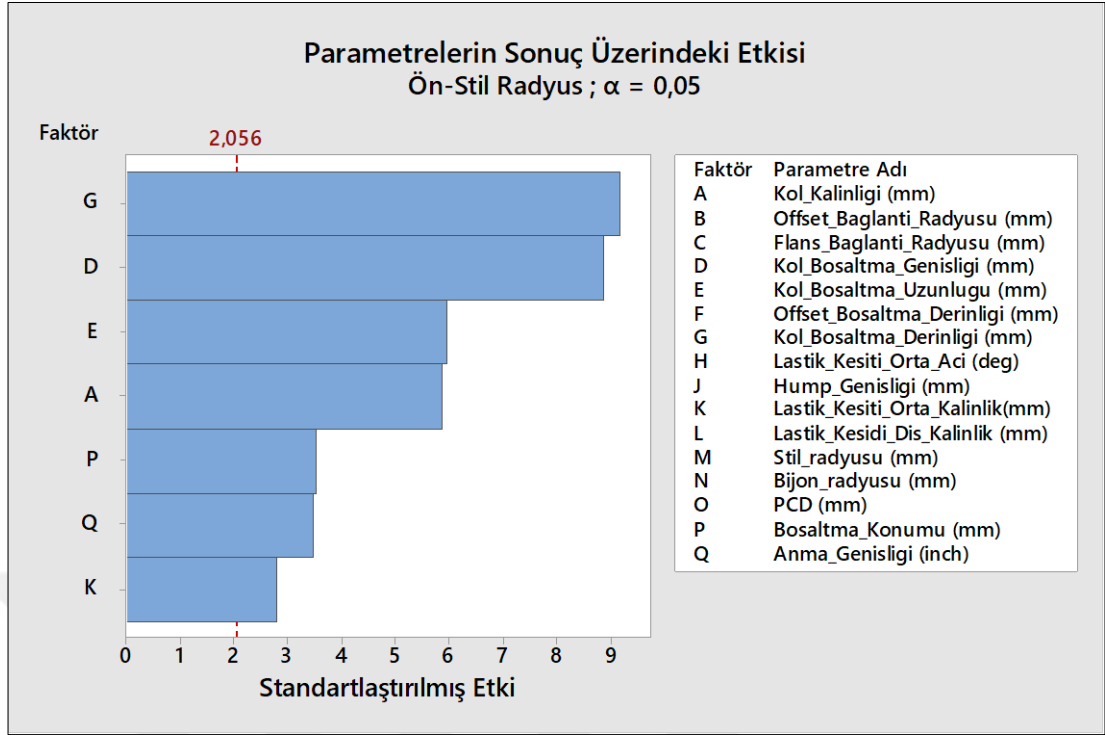


Şekil 6.7 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etki yönlerinin grafiği

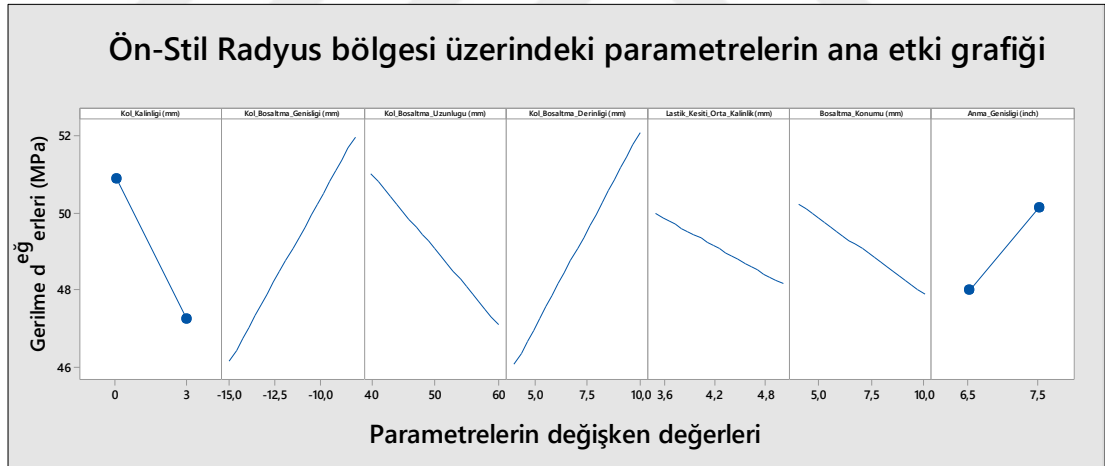
Tablo 6.5'te Ön-Stil Radyus bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin elde edilen P değerleri gösterilmiştir. Bu bölgenin çift eksen yorulma davranışı üzerinde kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği, kol kalınlığı, kol boşaltma uzunluğu, boşaltma konumu, anma genişliği ve lastik kesiti orta kalınlık parametreleri olmak üzere toplam 7 adet parametrenin etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.8'de Ön-Stil Radyus bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 6.9'daki ana etki grafiğinde ise parametrelerin etki yönü gösterilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği ve anma genişliği parametre değerlerinin artışı jantın yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Diğer parametre değerlerinin artması jantın yorulma ömrünü artırmaktadır.

Tablo 6.5 Ön-Stil Radyus üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

Parametre	P değeri
Kol Boşaltma Genişliği	0,000
Kol Boşaltma Derinliği	0,000
Kol Kalınlığı	0,000
Kol Boşaltma Uzunluğu	0,000
Boşaltma Konumu	0,002
Anma Genişliği	0,002
Lastik Kesiti Orta Kalınlık	0,010



Şekil 6.8 Parametrelerin Ön-Stil Radyusu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği



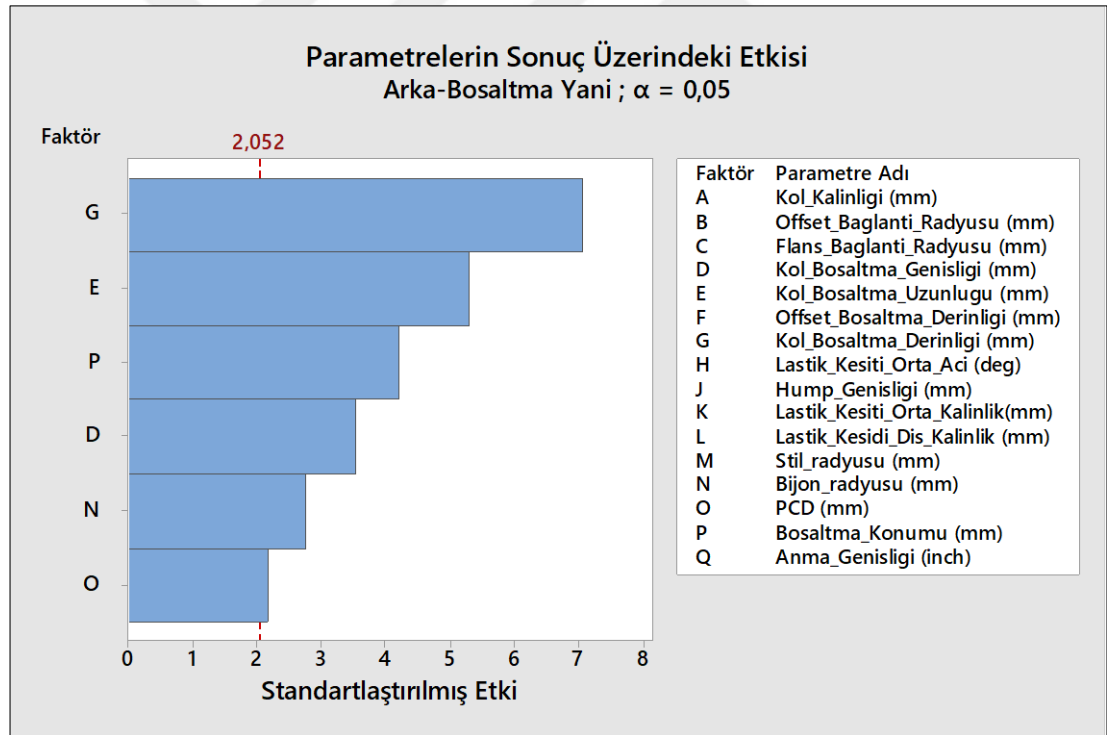
Şekil 6.9 Parametrelerin Ön-Stil Radyusu üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Tablo 6.6'da Arka-Boşaltma Yanı bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin elde edilen P değ'eri gösterilmiştir. Kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma derinliği, boşaltma konumu, kol boşaltma genişliği, bijon radyusu ve PCD olmak üzere toplam 6 adet parametrenin bu bölgenin çift eksen yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.10'da Arka-Boşaltma Yanı bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile gösterilmiştir. Şekil

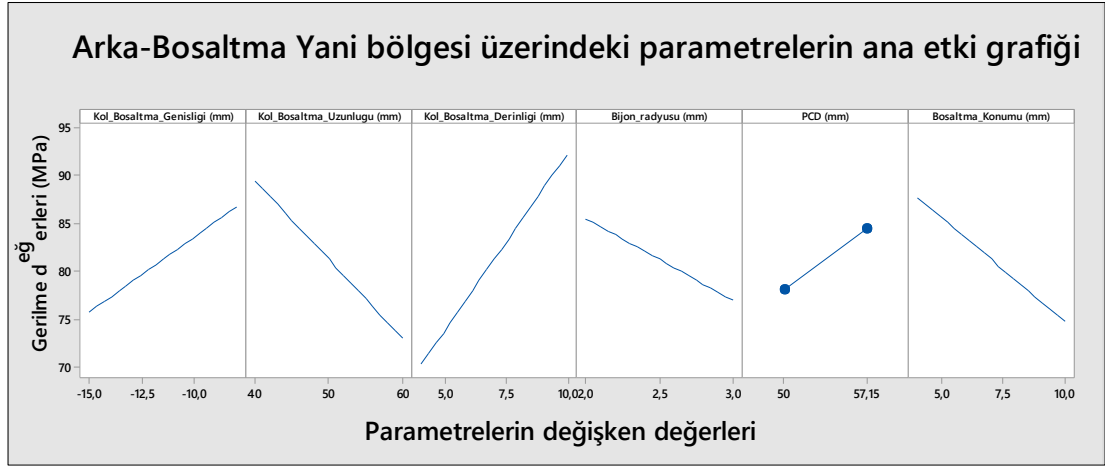
6.11'deki ana etki grafiğinde ise parametrelerin etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği ve PCD parametrelerinin artma yönündeki değişimi jantın yorulma ömrünün azalmasına neden olduğu görülmüştür. Diğer parametrelerin artması jantın yorulma ömrünü artırmaktadır.

Tablo 6.6 Arka-Boşaltma Yanı üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

Parametre	P değeri
Kol Boşaltma Uzunluğu	0,000
Kol Boşaltma Derinliği	0,000
Boşaltma Konumu	0,000
Kol Boşaltma Genişliği	0,001
Bijon Radyusu	0,010
PCD	0,039



Şekil 6.10 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

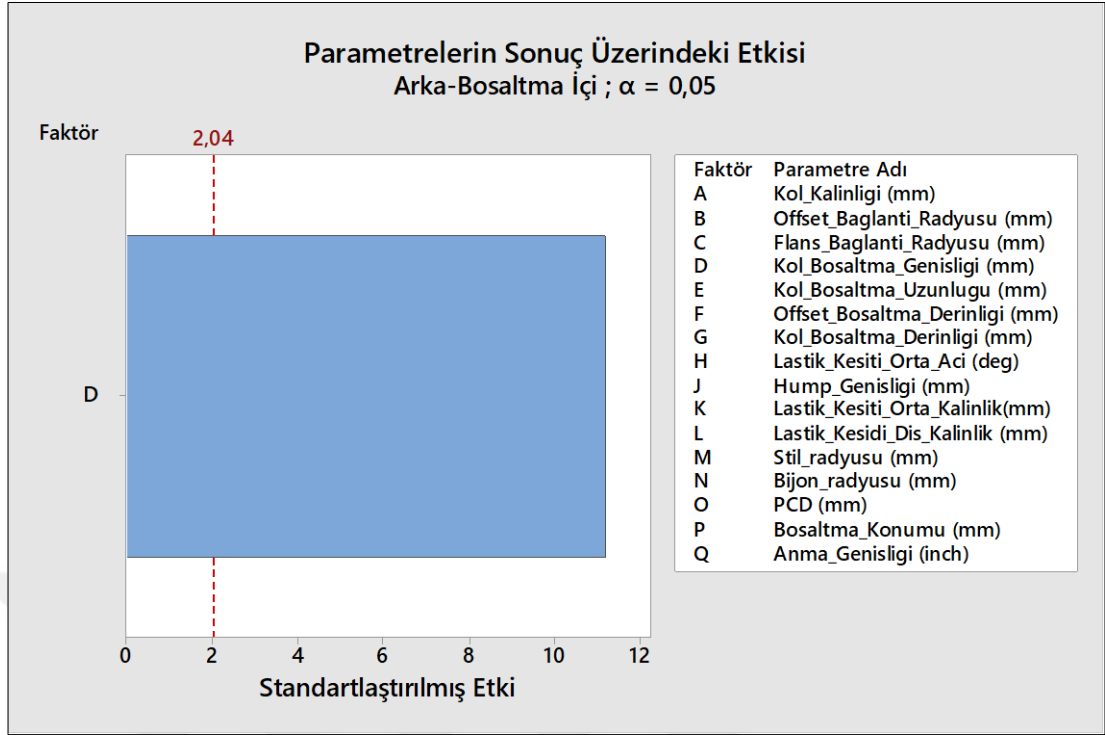


Şekil 6.11 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yani üzerindeki etki yönlerinin grafiği

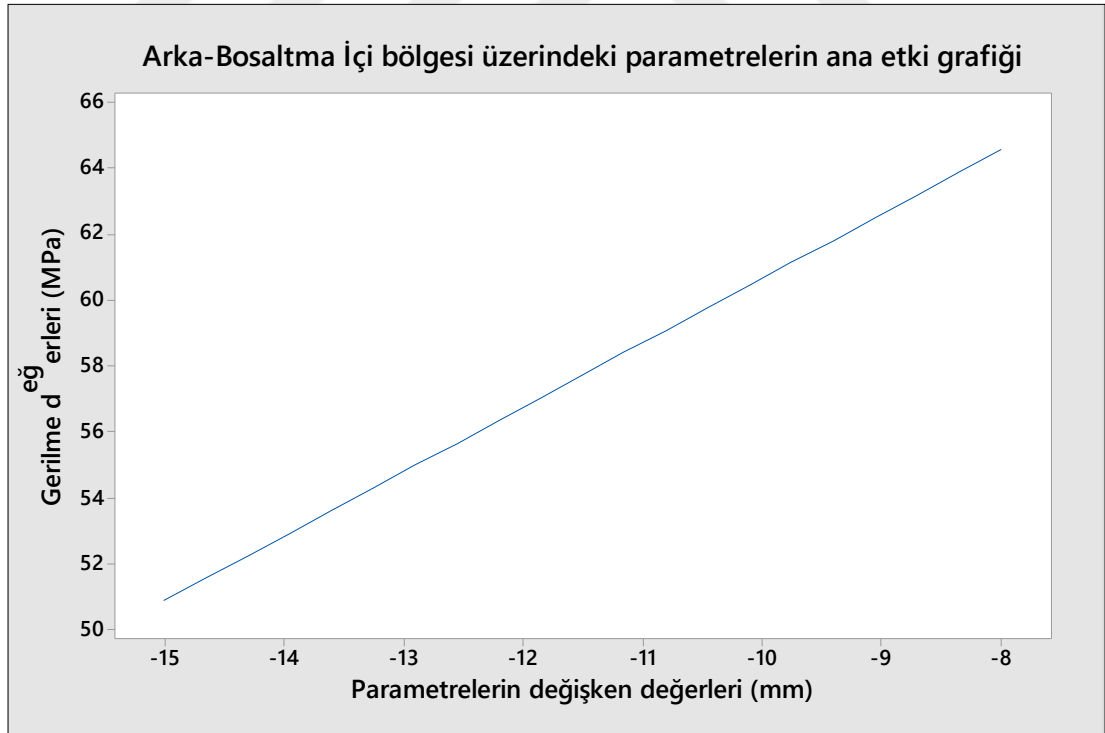
Tablo 6.7’de Arka-Boşaltma İçi bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin elde edilen P değeri gösterilmiştir. Sadece kol boşaltma genişliği parametresinin bu bölgenin çift eksen yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.12’de Arka-Boşaltma İçi bölgesi üzerinde etkili olan parametrenin standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 6.13’teki ana etki grafiğinde ise parametrenin etki yönü gösterilmiştir. Bu grafikte kol boşaltma genişliğinin artması jantın yorulma ömrünün azalmasına neden olduğu görülmüştür.

Tablo 6.7 Arka-Boşaltma İçi üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

Parametre	P değeri
Kol Boşaltma Genişliği	0,000



Şekil 6.12 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

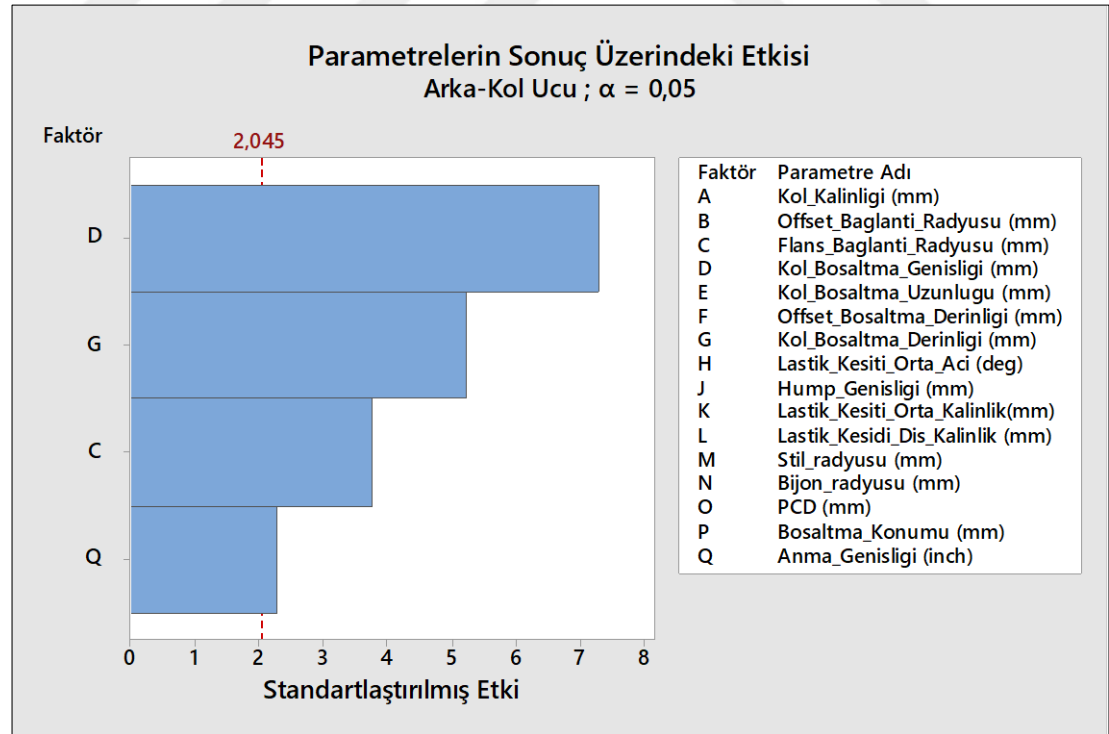


Şekil 6.13 Parametrelerin Arka-Boşaltma İçi üzerindeki etki yönlerinin grafiği

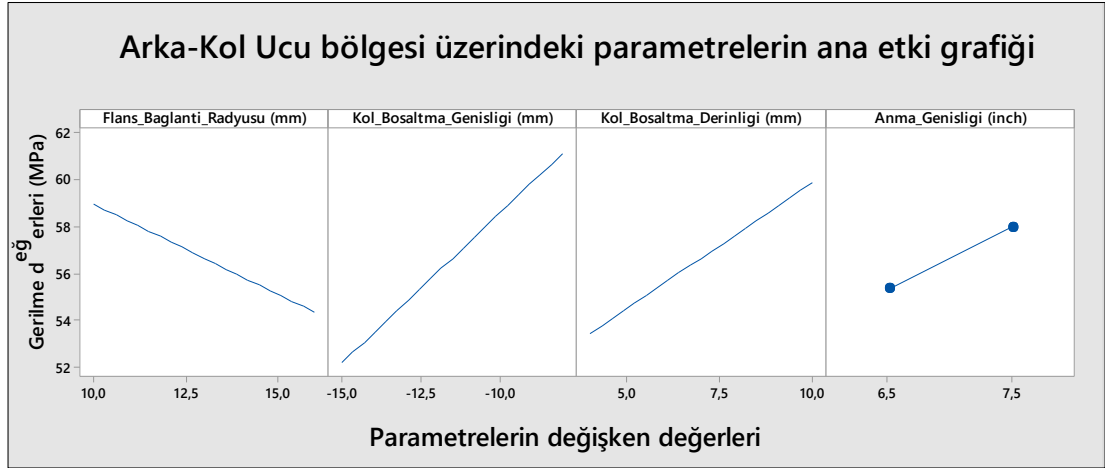
Tablo 6.8’de Arka-Kol Ucu bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin elde edilen P değerleri gösterilmiştir. Kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği, flanş bağlantı radyusu ve anma genişliği olmak üzere toplam 4 adet parametrenin bu bölgenin çift eksen yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.14’te Arka-Kol Ucu bölgesi üzerinde etkili olan parametrelerin standartlaştırılmış etkisi pareto grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 6.15’teki ana etki grafiğinde ise parametrelerin etki yönü gösterilmiştir. Flanş bağlantı radyusu değerinin artması jantın yorulma ömrünü artırırken, kol boşaltma genişliği, kol boşaltma derinliği ve anma genişliği değerinin artışı jant üzerindeki gerilme değerlerini artıracığı için yorulma ömrünü azaltacaktır.

Tablo 6.8 Arka-Kol Ucu üzerinde etkili olan parametrelerin P değeri tablosu

Parametre	P değeri
Kol Boşaltma Genişliği	0,000
Kol Boşaltma Derinliği	0,000
Flanş Bağlantı Radyusu	0,001
Anma Genişliği	0,030



Şekil 6.14 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği



Şekil 6.15 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etki yönlerinin grafiği

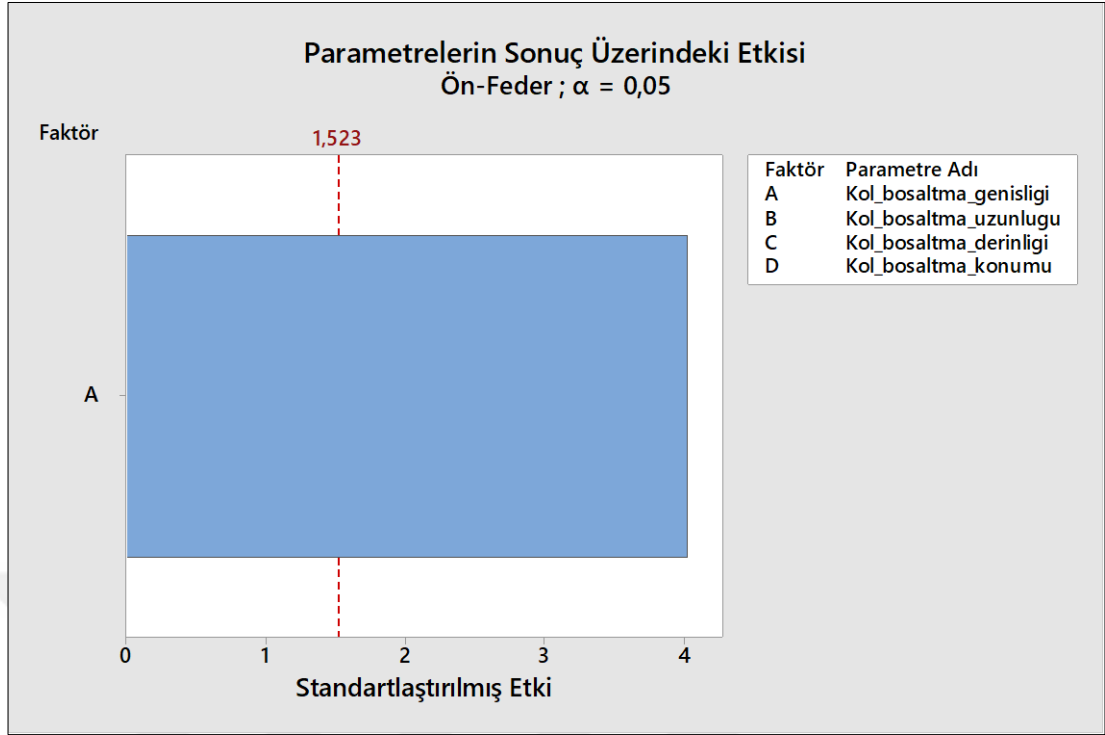
6.2 Faktöriyel Deney Tasarımı Sonuçlarının İncelenmesi

Faktöriyel deney tasarımı için kullanılması planlanan kol boşaltma genişliği, kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma derinliği ve boşaltma konumu parametreleri ile tam faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuştur. Tablo 4.3'te yer alan değişkenlere göre Catia programı ile hazırlanan 16 adet modelin çift eksen yorulma analizleri WheelStrength programı ile çözdürülmüş ve Tablo 6.9'da gösterilen gerilmeler elde edilmiştir. Gerilme sonuçları Minitab 18.0 programında girdi olarak kullanılıp tam faktöriyel deney tasarımı analizi gerçekleştirilmiştir. 4 adet parametre arasında 6 adet bölge üzerinde en çok etkili olan ve tasarım optimizasyonu için kullanılacak olan parametreler belirlenmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımının eleme deney tasarımına göre bir diğer farkı da, belirlenen 4 adet parametrenin ağırlık üzerindeki etkilerinin optimizasyon çalışması için incelenmesidir.

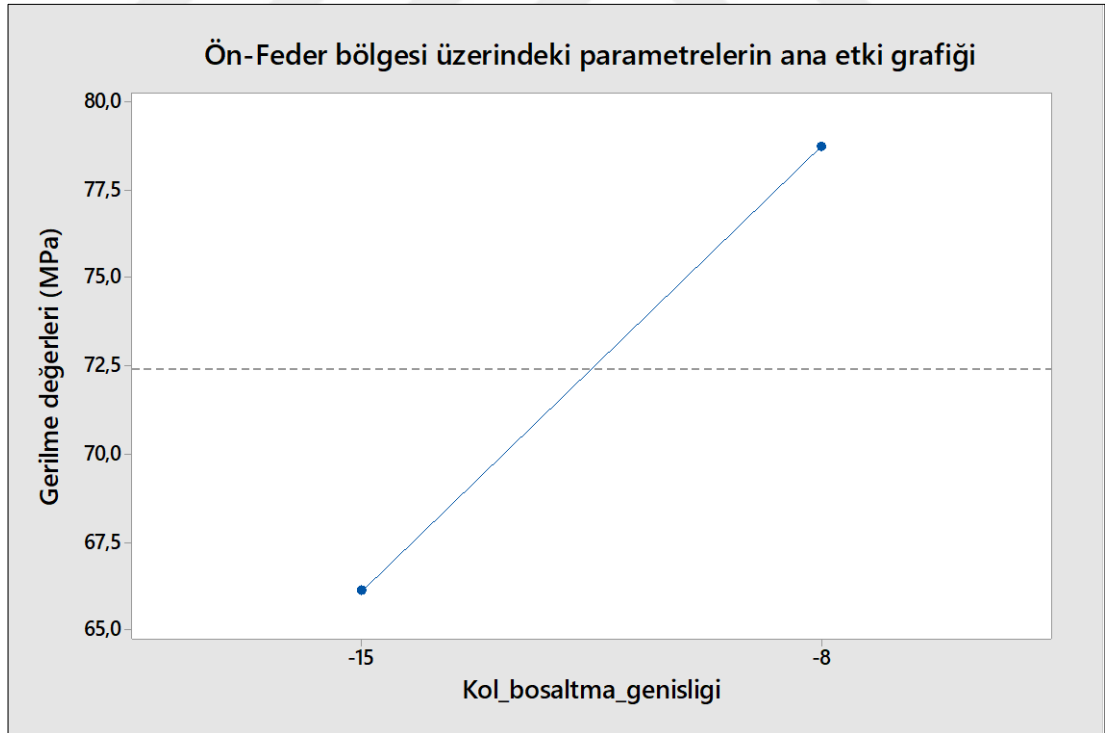
Tablo 6.9 Tam faktöriyel deney tasarımı çift eksen yorulma analizi sonuçları

	<i>Ön Yüzey</i>			<i>Arka Yüzey</i>			
<i>Analiz No.</i>	<i>1. Bölge (Mpa)</i>	<i>2. Bölge (Mpa)</i>	<i>3. Bölge (Mpa)</i>	<i>4. Bölge (Mpa)</i>	<i>5. Bölge (Mpa)</i>	<i>6. Bölge (Mpa)</i>	<i>Ağırlık (kg)</i>
1	59	42	40	64	58	45	9,478
2	83	55	51	104	65	65	9,000
3	64	52	40	66	59	51	9,260
4	76	51	47	89	65	61	9,120
5	68	44	46	90	52	51	9,353
6	67	50	44	78	46	54	9,190
7	66	50	44	77	45	54	9,193
8	82	46	54	110	68	61	9,226
9	61	57	42	62	44	53	9,156
10	66	58	48	65	42	54	9,110
11	92	45	67	149	65	64	9,134
12	82	61	44	118	69	60	9,251
13	68	52	43	99	51	52	9,341
14	73	55	45	90	70	55	9,342
15	78	54	64	74	63	64	8,953
16	70	53	44	104	50	51	9,337

Ön-Feder bölgesi tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.16'da görüldüğü gibi kol boşaltma genişliği parametresinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan diğer parametreler optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.17'deki grafikte kol boşaltma genişliğinin gerilme üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliğinin artması bölgedeki gerilme değerini artırmaktadır. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için sadece kol boşaltma genişliği parametresi kullanılacaktır.

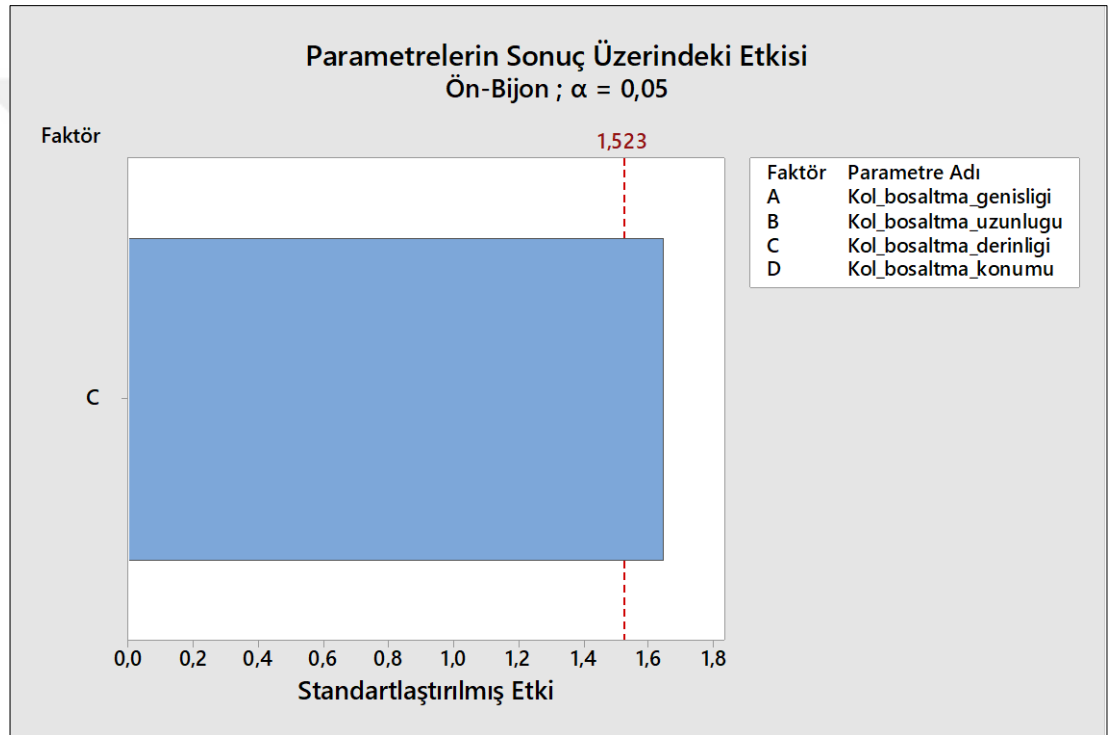


Şekil 6.16 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

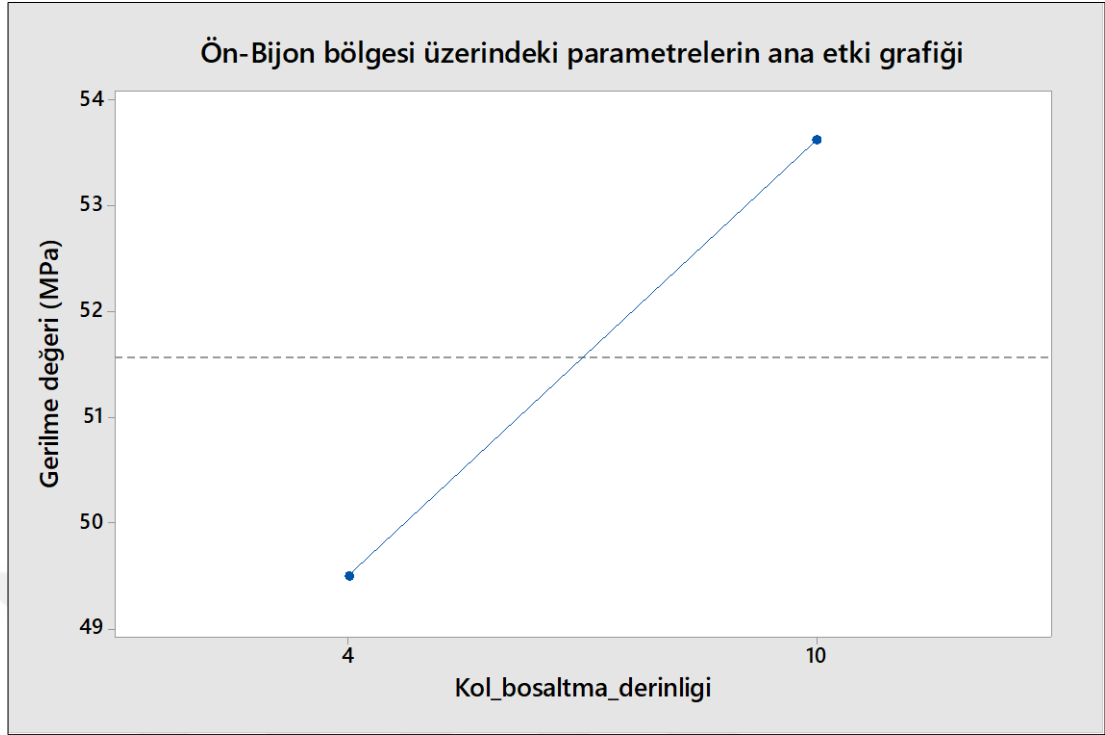


Şekil 6.17 Parametrelerin Ön-Feder üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Ön-Bijon bölgesi tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.18’de görüldüğü gibi kol boşaltma derinliği parametresinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan diğer parametreler optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.19’daki grafikte kol boşaltma derinliğinin gerilme üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma derinliğinin artması bölgedeki gerilme değerini artırmaktadır. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için sadece kol boşaltma derinliği parametresi kullanılacaktır.

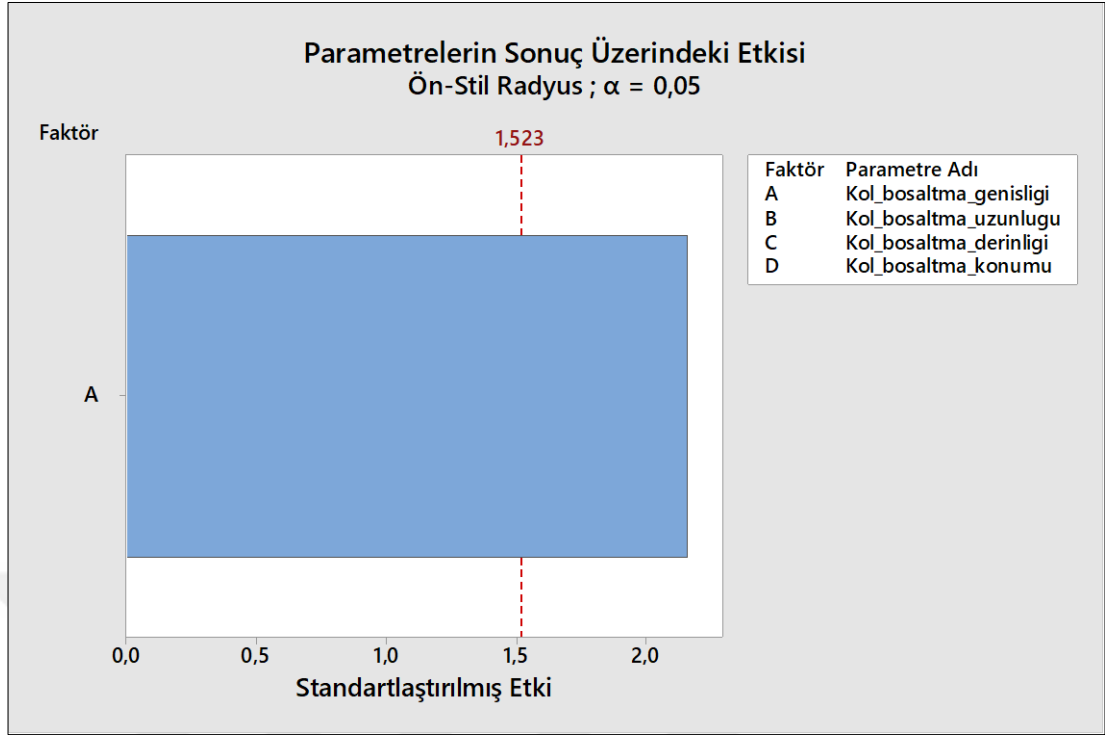


Şekil 6.18 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

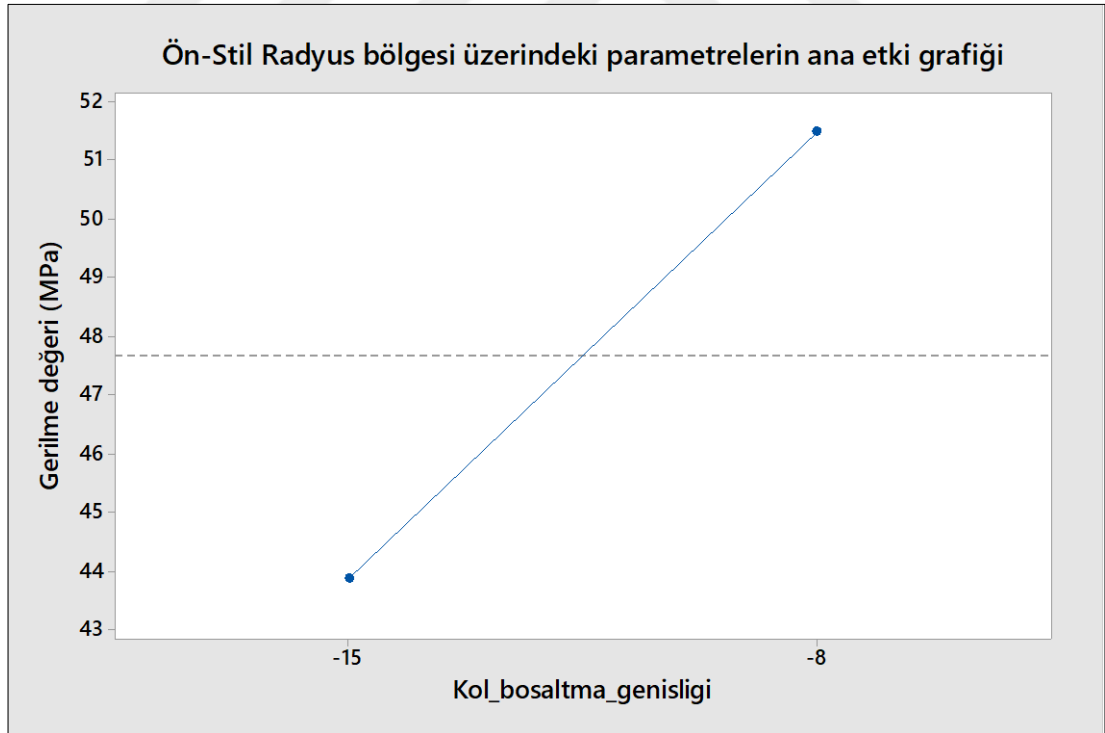


Şekil 6.19 Parametrelerin Ön-Bijon üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Ön-Stil Radyus bölgesinin tam faktöriyel deney tasarımı ile incelenmesi sonucunda, Şekil 6.20’de görüldüğü gibi kol boşaltma genişliği parametresinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan diğer parametreler optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.21’deki grafikte kol boşaltma genişliğinin gerilme üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliğinin artması bölgedeki gerilme değerini artırmaktadır. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için sadece kol boşaltma genişliği parametresi kullanılacaktır.

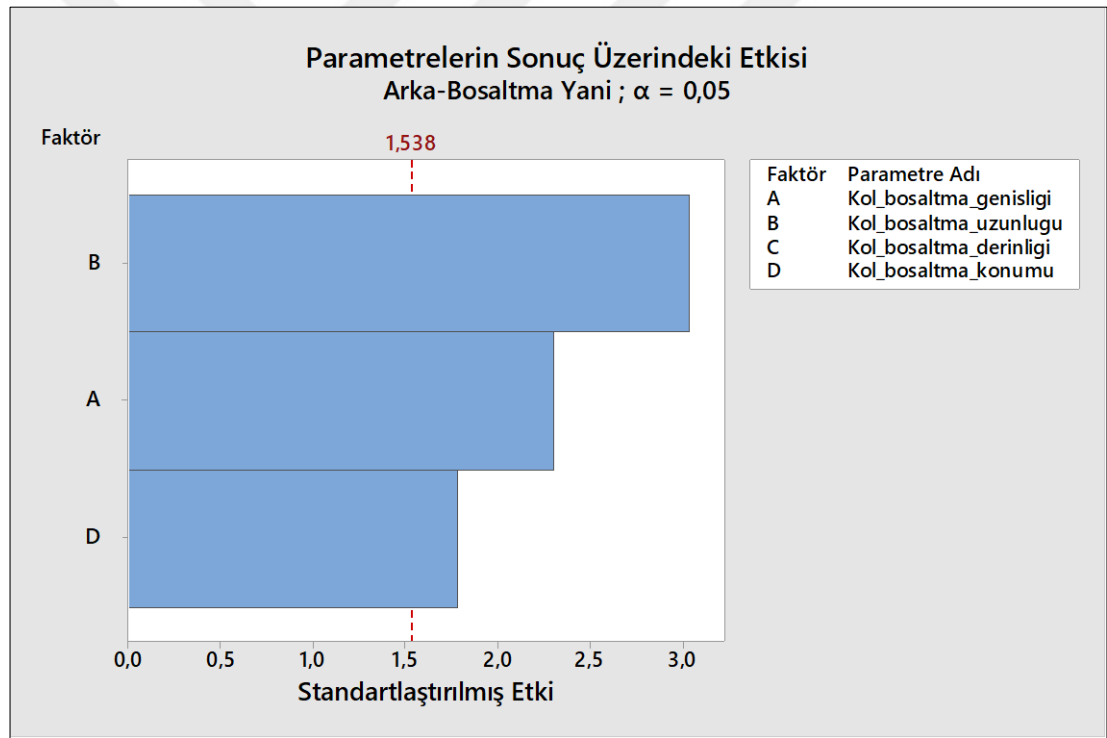


Şekil 6.20 Parametrelerin Ön-Stil Radyus üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

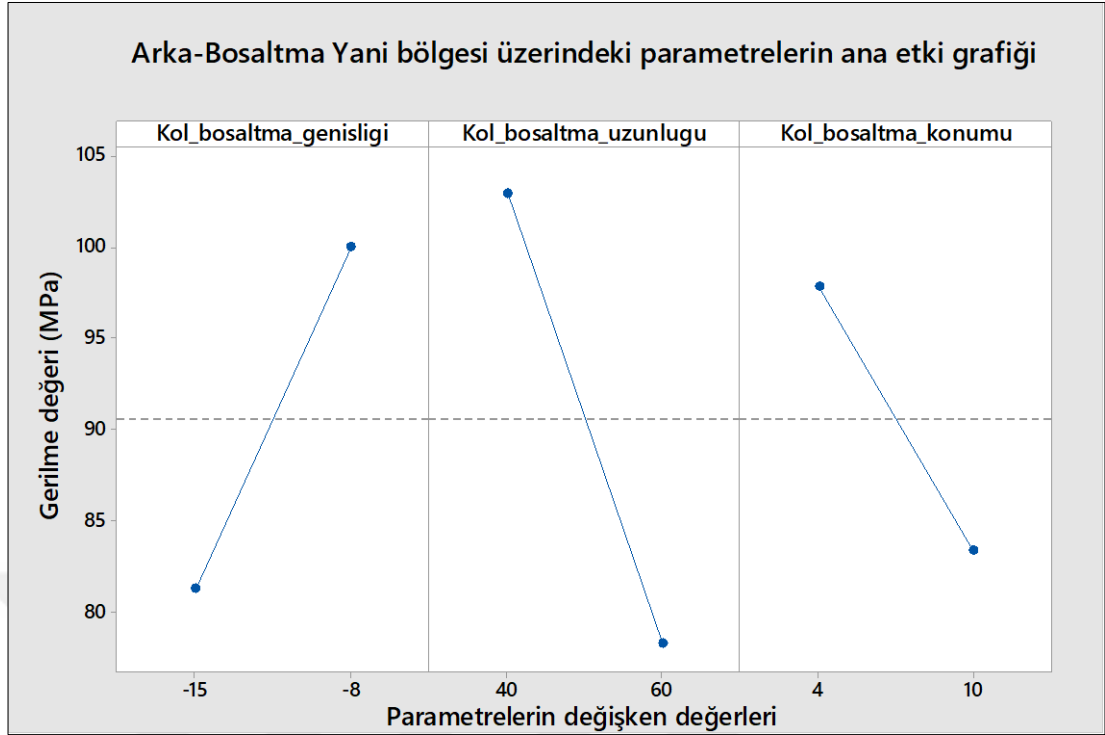


Şekil 6.21 Parametrelerin Ön-Stil Radyus üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Arka-Boşaltma Yanı bölgesi tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.22’de görüldüğü gibi kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma genişliği ve boşaltma konumu parametrelerinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan kol boşaltma derinliği parametresi optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.23’teki grafikte etkili parametrelerin gerilme üzerindeki etki yönleri gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliğinin artması bölgedeki gerilme değerini artırmakta, kol boşaltma uzunluğu ve boşaltma konumu parametre değerlerinin artması da bölgedeki gerilme değerini düşürmektedir. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için kol boşaltma genişliği, kol boşaltma uzunluğu ve boşaltma konumu parametreleri kullanılacaktır.

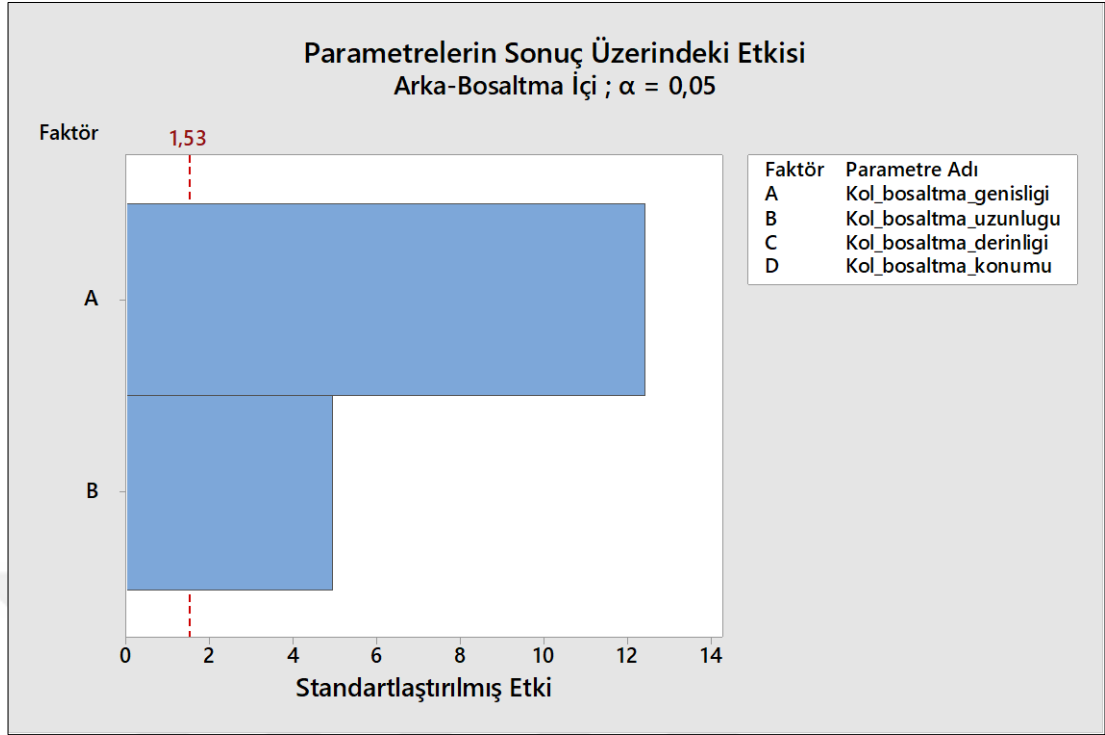


Şekil 6.22 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yanı üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

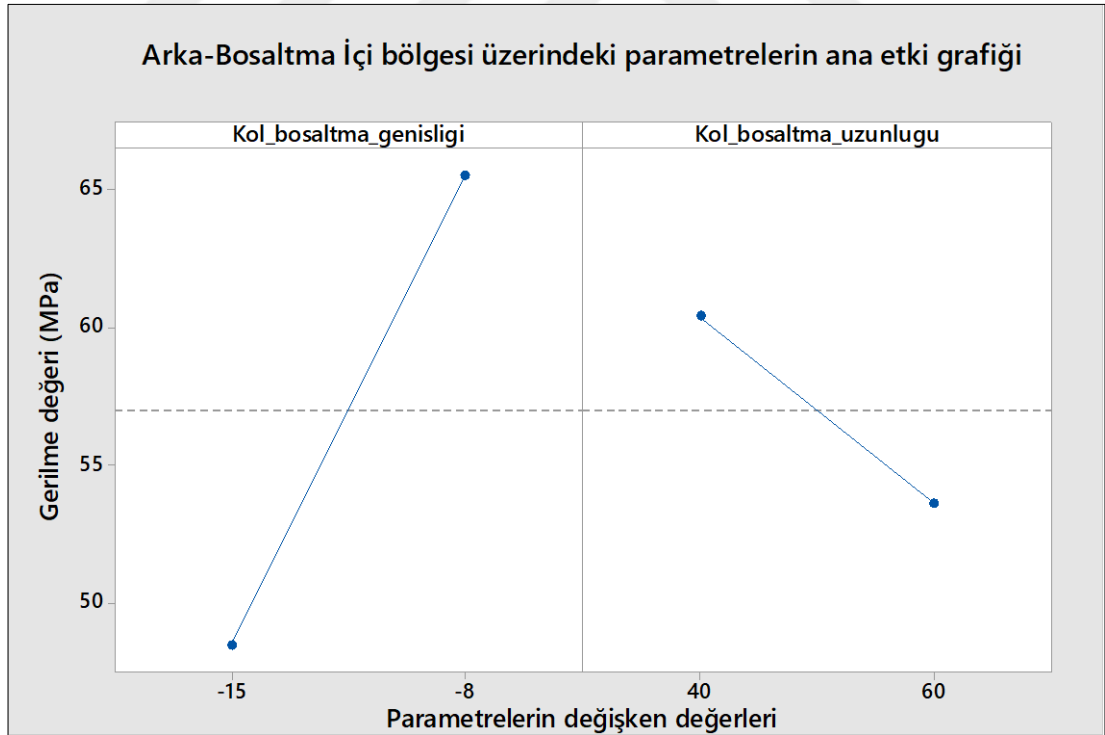


Şekil 6.23 Parametrelerin Arka-Boşaltma Yani üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Arka-Boşaltma İçi bölgesi tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.24'te görüldüğü gibi kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma uzunluğu parametrelerinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan diğer parametreler optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.25'teki grafikte kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma uzunluğunun gerilme üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliğinin artması bölgedeki gerilme değerini artırmakta, kol boşaltma uzunluğunun artması da bölgedeki gerilme değerini düşürmektedir. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için sadece kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma uzunluğu parametreleri kullanılacaktır.

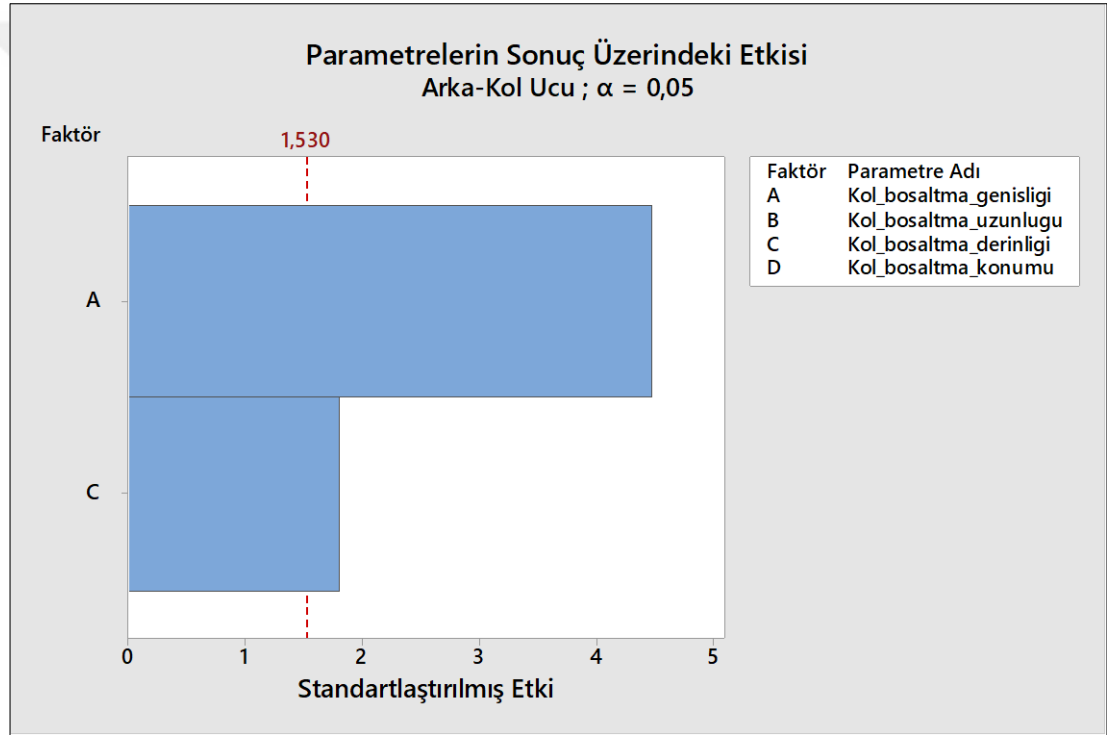


Şekil 6.24 Parametrelerin Arka-Bosaltma İçi üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

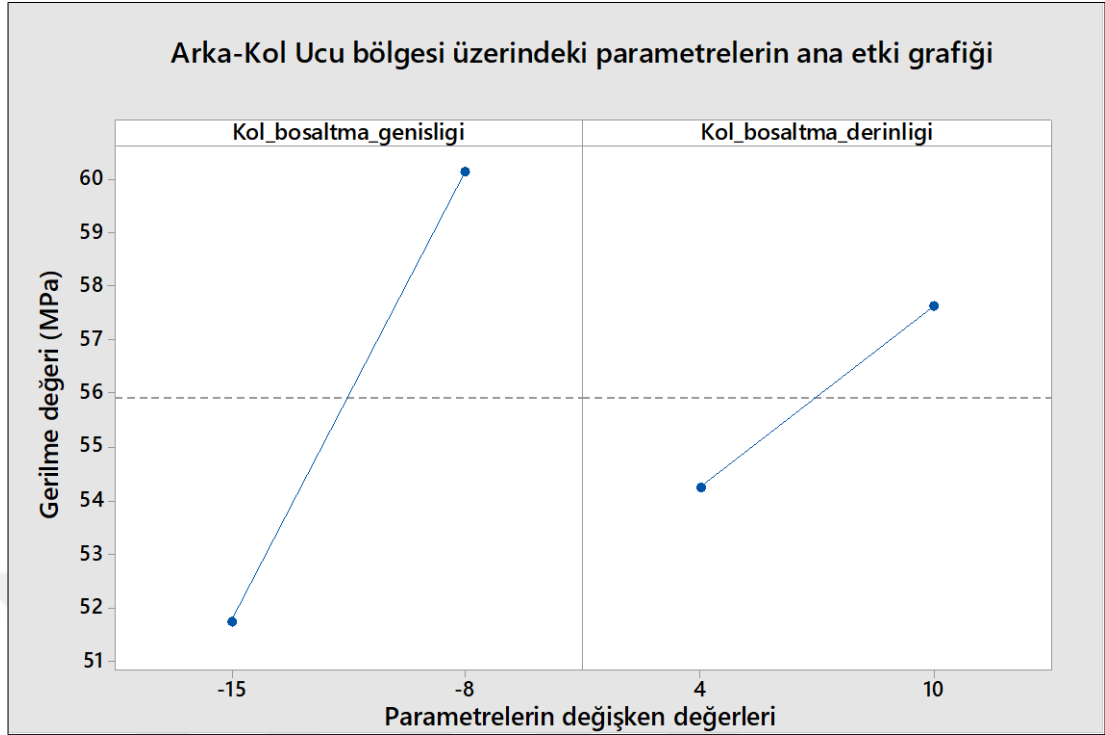


Şekil 6.25 Parametrelerin Arka-Bosaltma İçi üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Arka-Kol Ucu bölgesi tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.26'da görüldüğü gibi kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliği parametrelerinin bu bölgenin gerilme değerleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan diğer parametreler optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.27'deki grafikte kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliğinin gerilme üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre her iki parametrenin de artması bölgedeki gerilme değerini artırmaktadır. Bu bölgenin optimizasyon çalışması için sadece kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliği parametreleri kullanılacaktır.

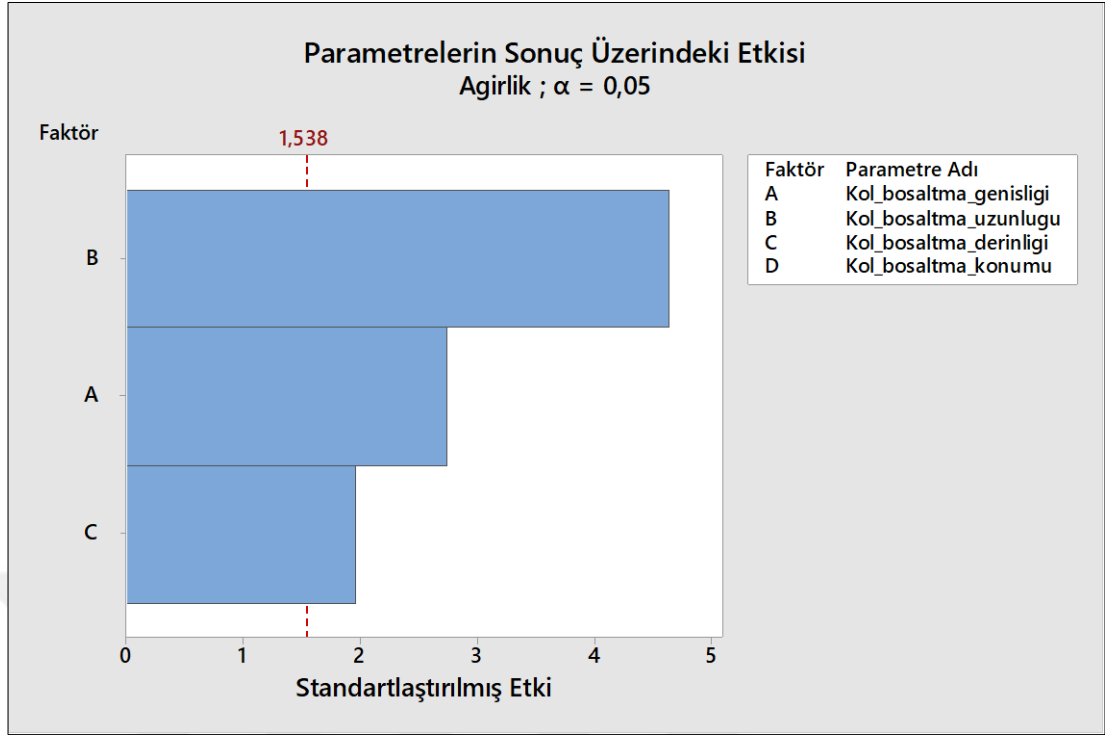


Şekil 6.26 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

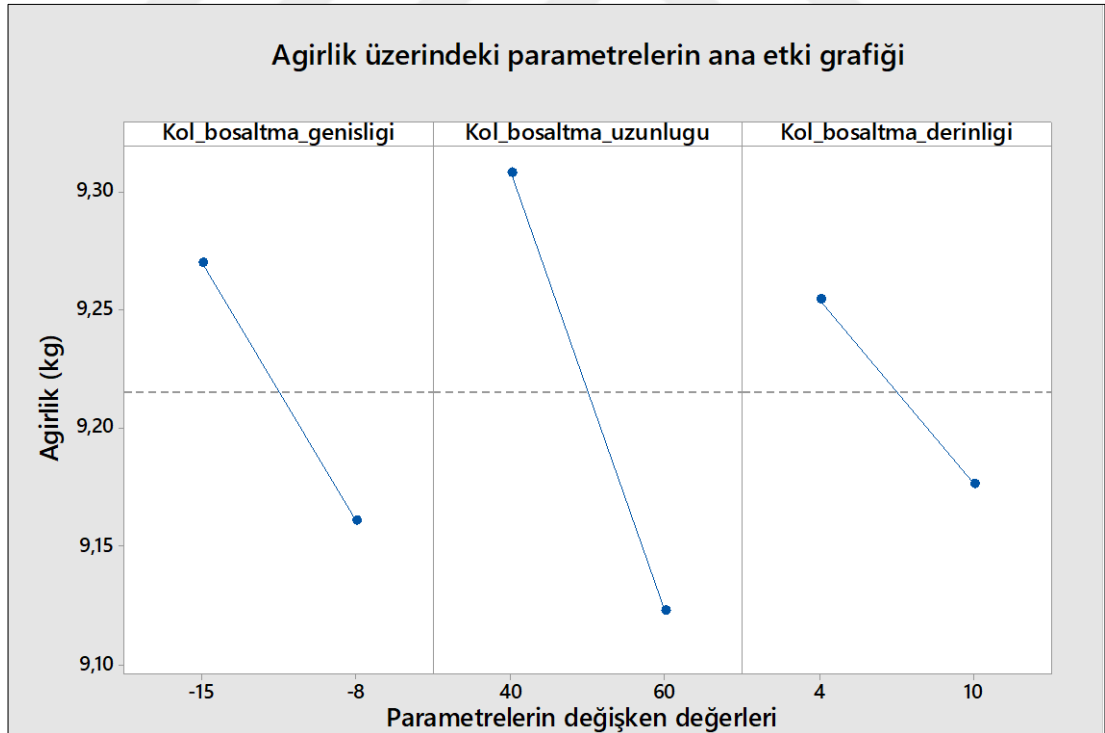


Şekil 6.27 Parametrelerin Arka-Kol Ucu üzerindeki etki yönlerinin grafiği

Jantın ağırlığı tam faktöriyel deney tasarımı ile incelendiğinde, Şekil 6.28’de görüldüğü gibi kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliği parametrelerinin ağırlık üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkisi daha az olan boşaltma konumu parametresi optimizasyon sonucunu değiştirmeyeceği için Minitab programı tarafından ihmal edilmiştir. Şekil 6.29’daki grafikte ilgili parametrelerin ağırlık üzerindeki etki yönü gösterilmiştir. Bu grafiğe göre kol boşaltma genişliği, kol boşaltma uzunluğu ve kol boşaltma derinliği değerlerinin artması jantın ağırlığı üzerinde azalma yönünde bir etki bırakmaktadır. Ağırlık değerinin optimizasyon çalışması için etkili olarak görülen parametreler kullanılacaktır.



Şekil 6.28 Parametrelerin Ağırlık üzerindeki etkilerinin pareto grafiği

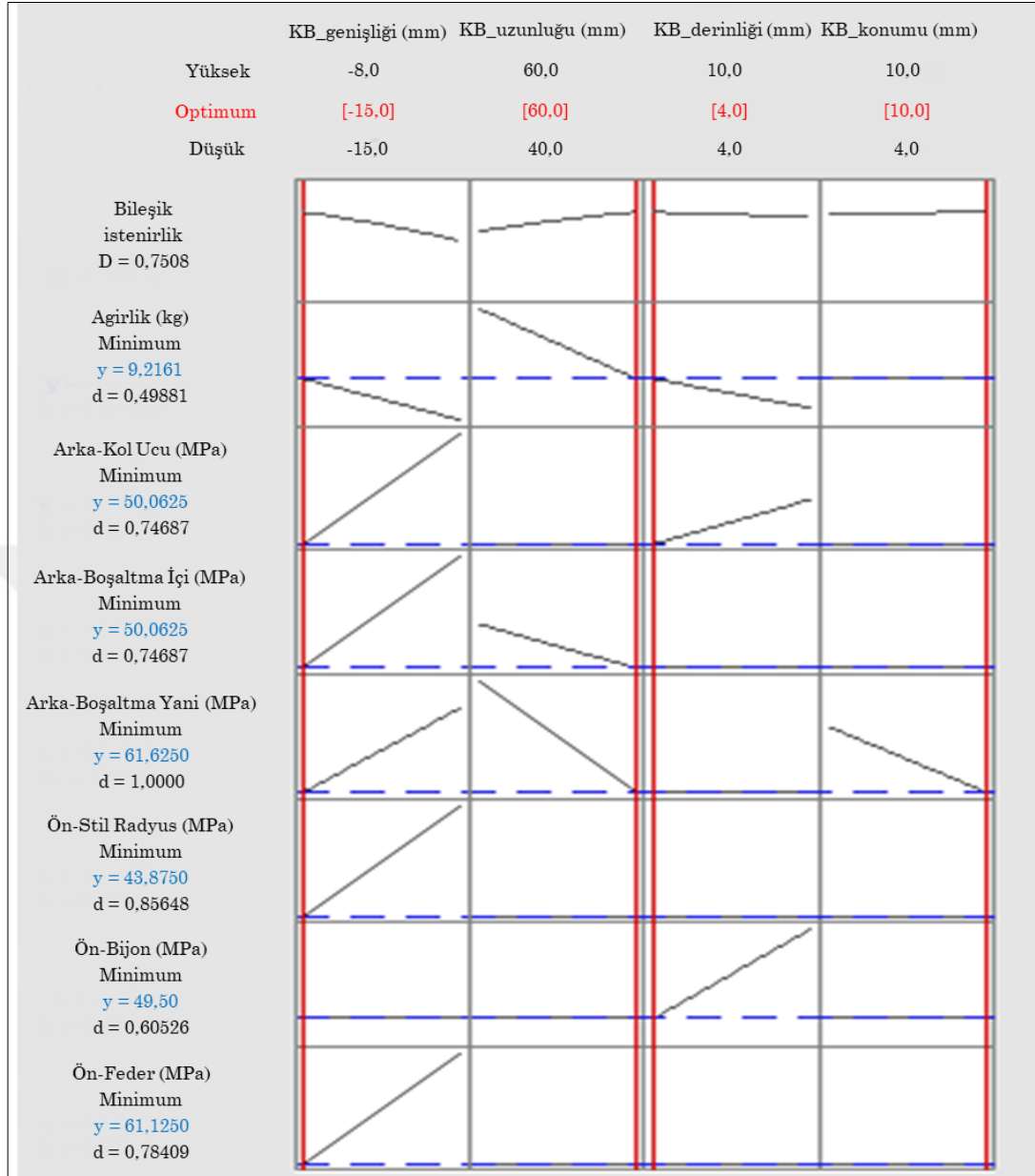


Şekil 6.29 Parametrelerin Ağırlık üzerindeki etki yönlerinin grafiği

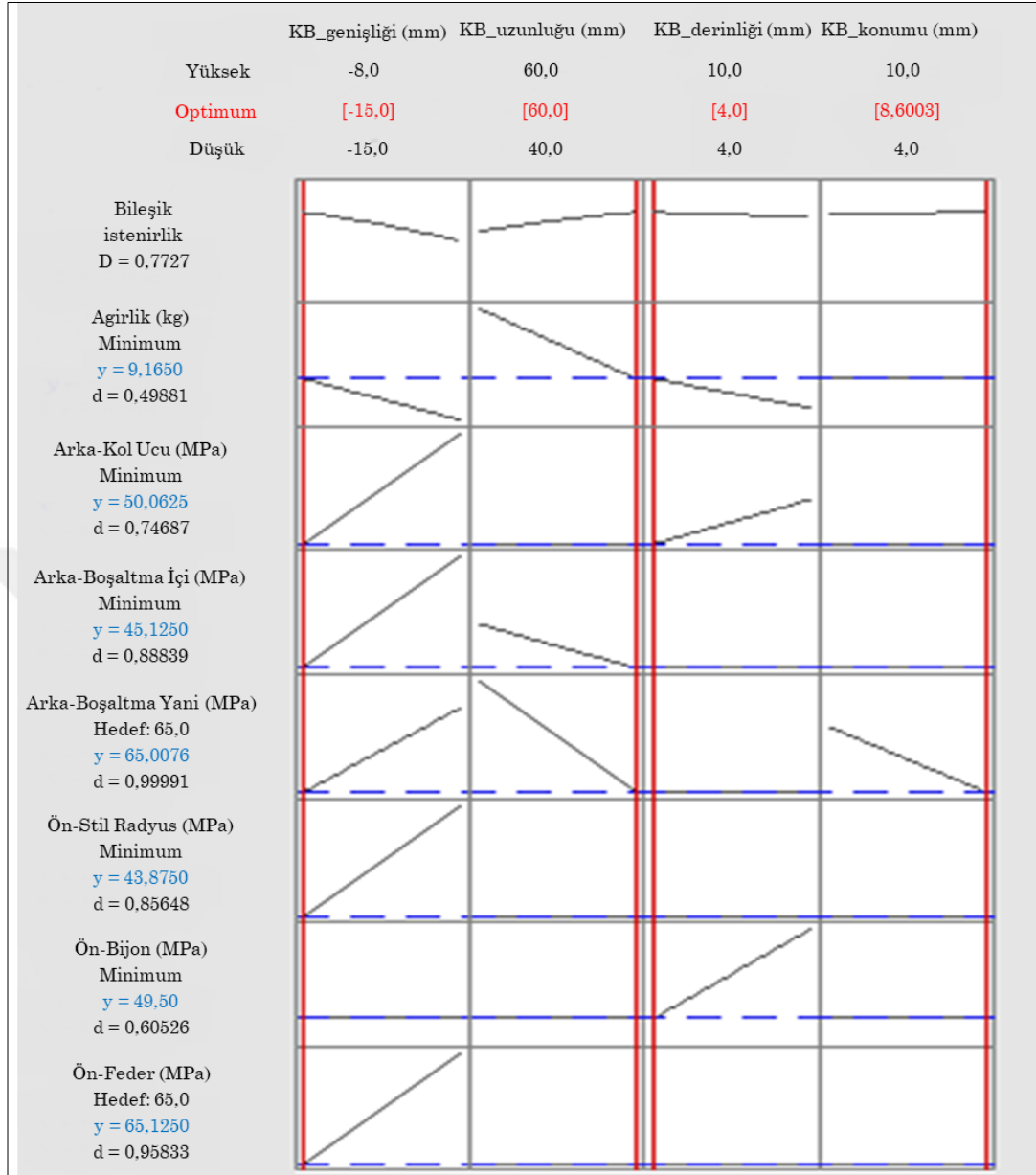
6.3 Jantın Çift Eksen Yorulma Davranışı Optimizasyonu

Yapılan deney tasarımı çalışmaları ile jantın farklı bölgeleri üzerinde çift eksen yorulma davranışına ve jantın ağırlığına etkisi olan parametreler belirlenerek, optimizasyon çalışması için gerekli olan girdiler elde edilmiştir. Minitab programının optimizasyon aracı kullanılarak en uygun gerilme ve kütle değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere ulaşmak için etkili parametreler optimize edilmiş ve minimum ağırlıkta jantın çift eksen yorulma testini çatlaksız olarak tamamlaması için gerekli mekanik performans elde edilmiştir. Optimizasyon çalışması öncelikle minimum gerilme ve minimum ağırlık değerleri hedeflenerek yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda Şekil 6.30'da gösterildiği gibi ölçüsel parametreler, kol boşaltma genişliği -15 mm, kol boşaltma uzunluğu 60 mm, kol boşaltma derinliği 4 mm, boşaltma konumu 10 mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda jant üzerinde meydana gelen maksimum gerilme, en kritik bölgeler Ön-Feder ve Arka-Boşaltma Yanı bölgelerinde yaklaşık 61 MPa ve jant ağırlığı da 9,2161 kg'dır.

Jant üzerindeki maksimum gerilme CMS Jant firması tarafından korelasyon çalışması ile belirlenen limit değerinin altında kaldığı için, aşırı güvenli tarafta kalan bir tasarım elde edilmiş oldu. Ancak artan rekabet koşullarında tasarım sürecine daha uygun bir mühendislik çalışması yapmak amacıyla, maksimum gerilme değeri limit değerinde olacak şekilde tekrar bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. En kritik bölge olan Arka-Boşaltma İçi ve Ön-Feder bölgelerinin hedef değerleri için limit değer hedefi belirtilerek tekrar edilen optimizasyon çalışmasının sonucu kritik bölgeler limit değerlerde elde edilmiştir. Bu modele ait ölçüsel parametreler Şekil 6.31'de gösterildiği gibi, kol boşaltma genişliği -15 mm, kol boşaltma uzunluğu 60 mm, kol boşaltma derinliği 4 mm, boşaltma konumu 8,6 mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda jant üzerinde meydana gelen maksimum gerilme %99 doğruluk payı ile 65 MPa ve jant ağırlığı da %50 doğruluk payı ile 9,165 kg olarak tespit edilmiştir. Gerilmelerin limit değerinde hedeflenmesi ile yapılan optimizasyon sonucunda en ağır tasarıma göre yaklaşık 310 gr hafifleme sağlanmıştır.



Şekil 6.30 Minimum değerlere göre yapılan optimizasyon sonucu



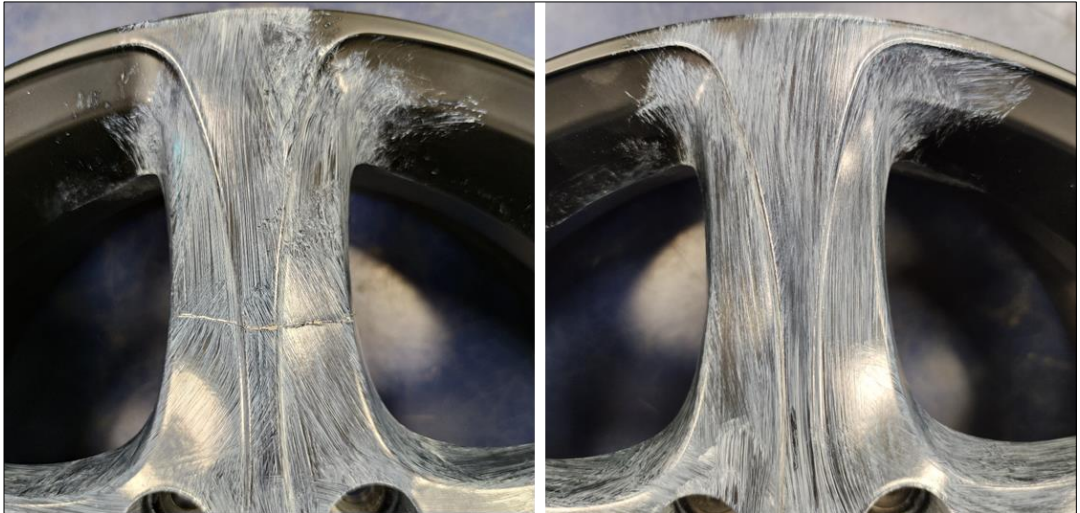
Şekil 6.31 Limit değerlere göre yapılan optimizasyon sonucu

6.4 Çift Eksen Yorulma Testi

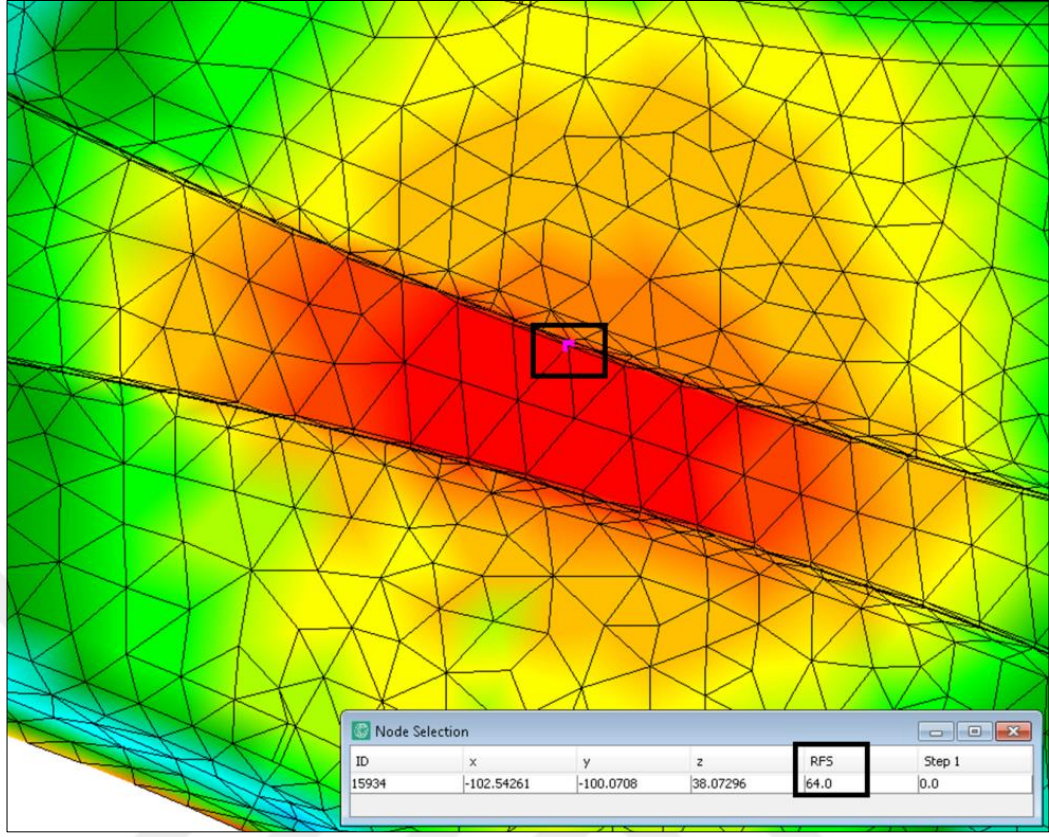
Analiz ve deney tasarımı ile elde edilen sonuçları gerçek hayat koşulları ile karşılaştırmak ve tasarım iyileştirmesi ile çift eksen yorulma testinde yeterli dayanımı sağlamak amacıyla, çalışma kapsamında ele alınan modelin çift eksen yorulma testi yapılmıştır. Testte kullanılan girdilerin Tablo 6.1’de belirtilen analiz girdileri ile aynı olması sağlanmıştır. Öncelikle optimizasyon sonucunda elde edilen ölçüsel değerlere tam ters olacak şekilde, testte yeterli dayanımı göstermemesi beklenen model

belirlenmiştir. Tablo 4.3'te belirtilen Analiz No 12 modelinin parametreleri olan kol boşaltma genişliği -8 mm, kol boşaltma uzunluğu 40 mm, kol boşaltma derinliği 10 mm ve boşaltma konumu 4 mm olan modelin test sonucunda, Şekil 6.32'de görüldüğü gibi jantın kol üzeri bölgesinde 41.000 turda yorulma çatlakları oluşmuştur. Tam faktöriyel deney tasarımında çalışılan 12 numaralı modele ait çift eksen yorulma analiz sonuçlarında Tablo 6.9'da belirtildiği gibi, çatlak meydana gelen bölge ile ilişkili olan Ön-Feder ve Arka-Boşaltma Yanı bölgelerinde oldukça yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu durumda, yapılan testin elde edilen analiz verileri ile tutarlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

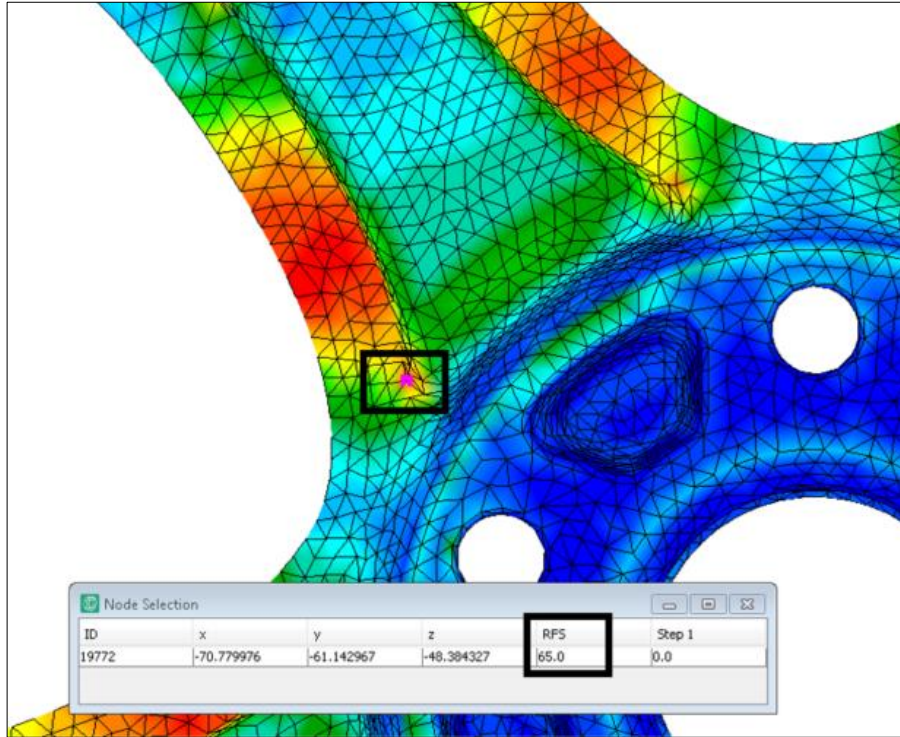
Çift eksen yorulma testini çatlaksız olarak tamamlayacak modelin ölçüsel parametreleri bir önceki bölümde optimizasyon çalışması ile elde edilmiştir. Modelin bu parametrelere göre revizyonu sonrasında, Şekil 6.32'de görüldüğü gibi jantın kritik olan kol üzeri bölgesinin 300.000 turda çatlaksız bir şekilde testi tamamladığı görülmüştür. Optimize edilen modelin çift eksen yorulma analiz sonuçları, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te gösterildiği gibi optimizasyon verileri ile paralel olacak şekilde limit değerlerde elde edilmiştir. Böylelikle optimizasyon çalışmasında elde edilen değerlerin gerçek test koşulları ile tutarlı sonuç vermesinin yanında, çift eksen analizi ve testi arasında da korelasyon olduğu kanıtlanmış olmaktadır.



Şekil 6.32 12 numaralı (sol) ve optimize edilmiş (sağ) modellerin test sonuçları (Kişisel Arşiv, 2021)



Şekil 6.33 Optimize edilmiş model stil yüzeyi analiz sonucu



Şekil 6.34 Optimize edilmiş model arka yüzeyi analiz sonucu

6.5 Değerlendirme

Otomotiv sektöründe yapılan tasarımlarda parçaların yeterli mekanik dayanıma ve minimum ağırlığa sahip olması göz önünde bulundurulmaktadır. Zorlu şartlar altında ve uzun süreli kullanılan otomotiv parçalarının tasarım aşamasında, maddi avantaja sahip olan sonlu elemanlar yöntemi ve optimizasyon çalışmaları önem kazanmıştır. 2018 yılı sonrasında yürürlüğe giren wltp (Worldwide harmonized light vehicle test procedure – Dünya çapında uyumlaştırılmış hafif araç test prosedürü) standardı ile araç üreticilerinin uyması gereken karbon emisyonu kriterleri daha zorlu hale gelmiştir. Wltp standardındaki zorlu şartlar nedeni ile araç üreticileri araçların tüm parçalarında ağırlık optimizasyonuna önem vermek zorunda kalmıştır. Diğer otomotiv parçaları gibi jantlar da yakıt tasarrufu, dolayısı ile karbon emisyonu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yakıt tasarrufunun sağlanmasının en temel yöntemi hafif tasarım elde edilmesidir.

Yapılan çalışma ile jantların çift eksen yorulma davranışı 16 adet parametre ile iki ayrı deney tasarımı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile jantın kritik bölgeleri üzerinde ana etkiye sahip parametreler belirlenmiştir. Parametrelerin kritik bölgeler üzerindeki etki dereceleri kullanılarak jantın tasarım aşamasında yaşanan problemlere daha etkin çözümler üretilmiştir.

Eleme deney tasarımında 16 adet parametre arasından kritik bölgeler üzerinde en yüksek etkiye sahip 4 adet parametre belirlenmiştir. Deney tasarımı için toplam 34 farklı model oluşturulup, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Belirlenen parametreler kol boşaltma genişliği, kol boşaltma uzunluğu, kol boşaltma derinliği ve boşaltma konumu parametreleridir. Kol boşaltma genişliği ve kol boşaltma derinliği parametrelerinin malzeme verme yönündeki değişimi, kol boşaltma uzunluğu ve boşaltma konumunun jantın göbek bölgesine doğru yaklaşması jantın çift eksen yorulma davranışı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Malzeme verme yönündeki değişiklik jantın kol bölgesindeki kesit kalınlığını artırarak kesit atalet momentini iyileştirmektedir. Kol boşaltmanın göbek kısmına doğru yaklaşması ise gerilmenin kol üzerine homojen bir şekilde dağılmasına olanak sağlamaktadır.

Ardından 4 adet parametrenin kritik bölgeler üzerindeki etkilerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesi, en hafif ve uygun dayanıma sahip tasarımın elde edilmesi için tam faktöriyel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Limit gerilme değerlerine ve minimum ağırlık kriterine göre yapılan optimizasyon çalışmasında, çift eksen yorulma testini çatlaksız olarak tamamlayacak model elde edilmiştir. Ek olarak, yapılan optimizasyon çalışması ile uygun mekanik dayanıma sahip olan jantta maksimum tasarım ağırlığına göre yaklaşık 310 gram hafifleştirme sağlanmıştır. Son olarak, elde edilen optimum modele uygulanan çift eksen yorulma analizi ve testi ile optimizasyon çalışması doğrulanmıştır.

Genel olarak jantın mekanik dayanımı üzerinde kol boşaltmaya bağlı parametrelerin büyük ölçüde etkili olduğu tespit edilmiştir. Tasarım aşamasında kol boşaltma ölçüleri üzerinde yapılacak tasarım optimizasyonu ile yaşanacak problemlerin önüne geçilecektir. Yapılan çalışma ile tasarım sürecinde çift eksen yorulma analizinde harcanan süre kısılacaktır.

KAYNAKLAR

- Ballo, F., Mastinu, G., Previati, G. ve Gobbi, M. (2020). Numerical modelling of the biaxial fatigue test of aluminium wheels. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 4 (4), 1-18.
- Bićek, M., Connes, R., Omerović, S., Gündüz, A., Kunc, R. ve Zupan, S. (2020). The bearing stiffness effect on in-wheel motors. *Sustainability*, 12 (10), 40-58.
- CMS Jant (b.t.). *Ürün kataloğu*. 12 Temmuz 2021, <https://www.cms.com.tr/tr/urunler/urun-katalogu>
- Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. *Alloying: Understanding the Basics* (1. Baskı) içinde (351-416). Ohio: ASM international.
- Guofa, M., Xiangyu, L., Kuangfei, W. ve Hengzhi, F. (2009). Numerical simulation of low pressure die-casting aluminum wheel. *Department of Mechanical Engineering, Chengde Petroleum College*, 6 (1), 48-52.
- Güven, O. (2005). *Alüminyum silisyum magnezyum döküm alaşımlarının yapı incelemesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Instron (b.t.). *Biaxial Test System*. 21 Mayıs 2021, <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/structural-durability/structural-durability-solutions/wheel-test-system>
- Işık, M. (2019). *Alüminyum alaşımlı binek araç jantlarının dinamik viraj yorulması davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

- Kaba, M., Dönmez, A., Çukur, A., Kurban, A. F., Çubuklusu, H. E. ve Birol, Y. (2018). AlSi5Mg0.3 Alloy for the manufacture of automotive wheels. *International Journal of Metalcasting*, 12 (3), 614-624.
- Kara, A. ve Işık, M. (2019). Simulation and design optimization of al alloy wheels subjected to biaxial fatigue loading. *6th Int. Conf. Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (THERMAM)*. 22-24 Ekim 2019, <https://thermam.org/upload/abstract-book-thermam2019.pdf>
- Kara, A., Çubuklusu, H. E., Topçuoğlu, Ö. Y., Çe, Ö. B., Aybarç, U. ve Kalender, C. (2017). Alüminyum alaşımlı jantların tasarım ve ağırlık optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (8), 957-962.
- Karakaş, E. (2020). *Binek araç jantlarının yorulma ömrü test süresinin optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kleijnen, J. P. (2008). Design of experiments: Overview. *Winter Simulation Conference*, 6 (8), 479-488.
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, A. ve Vieregge, A. J. M. S. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering*, 280 (1), 37-49.
- Minitab (b.t.). *Effects plots for analyze factorial design*. 10 Temmuz 2021, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>
- Moresteam (b.t.). *Experiment Design Guidelines*. 08 Temmuz 2021, <https://www.moresteam.com/toolbox/design-of-experiments.cfm#designguidelines>

- Santiciolli, F. M., Möller, R., Krause, I. ve Dedini, F. G. (2017). Simulation of the scenario of the biaxial wheel fatigue test. *Advances in Engineering Software*, (114), 337-347.
- Spac danışmanlık (b.t.). *Deney tasarımı*. 15 Haziran 2021, <https://spac.com.tr/kaynaklar/s-p-a-c-verimlilik-akademisi/>
- Standart el kitabı (2016). *LBF.WheelStrength user manual*, 01 Temmuz 2021, <http://wheelstrength.de/en/downloads.html>.
- Standart el kitabı (2016). *Society of Automotive Engineers Biaxial Wheel Fatigue Test: SAE J2562*, 12 Mayıs 2021, https://www.sae.org/standards/content/j2562_200511/.
- Standart el kitabı (2021). *Rims, European Tyre and Rim Technical Organization*, 12 Temmuz 2021, <https://www.etrto.org/Publications/Available/Standards-Manual>.
- Stojanovic, B. ve Epler, I. (2018). Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3 (2), 52-62.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials* (2. Baskı). Cambridge: Cambridge University Press.
- Tar, B. K. ve Özdemir, O. (2021). Alüminyum alaşımlı jantların mekanik test performanslarının incelenmesi ve optimizasyonu. 3. *International New York Cultural Interaction and Academic Studies Congress*. 29-30 Mayıs 2021, <http://iconsos.org/files/3rd-New-York-Congress-Fulltext-May-2021.pdf>.
- Tarkun, D. (2015). *AlSi7Mg T6, AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının binek araç jant malzemesi olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Topaç, M. M., Ercan, S. ve Kuralay, N. S. (2012). Fatigue life prediction of a heavy vehicle steel wheel under radial loads by using finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, (20), 67-79.

Topçuoğlu, . Y., e, . B., Aybarç, U. ve Keski, M. (2014). Alçak basınç döküm prosesinde kullanılan kalıp kaplama malzemesinin metal akışkanlığına etkisi. 7. *Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi*. 11 Eylül 2014, <https://ankirosfoundrycongresstr.files.wordpress.com/2014/09/manuscript14.pdf>.

Wan, X., Shan, Y., Liu, X., Wang, H. ve Wang, J. (2016). Simulation of biaxial wheel test and fatigue life estimation considering the influence of tire and wheel camber. *Advances in Engineering Software*, (92), 57-64.