

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOBİL TORK KOLUNUN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA  
AĞIRLIK ENİYİLEMESİ VE GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nahide TÜTEN**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erdem ACAR**

**AĞUSTOS 2016**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141511023 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Nahide TÜTEN** 'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**OTOMOBİL TORK KOLUNUN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA AĞIRLIK ENİYİLEMESİ VE GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ**" başlıklı tezi **05,08,2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Erdem ACAR** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Prof.Dr. Mehmet Ali GÜLER** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Melin ŞAHİN (Başkan)** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Teyfik DEMİR** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Nahide Tüten

## ÖZET

Yüksek Lisans

### OTOMOBİL TORK KOLUNUN ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDA AĞIRLIK ENİYİLEMESİ VE GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ

Nahide TÜTEN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Ağustos 2016

Bu tez kapsamında, otomobil süspansiyon sisteminin bir parçası olan tork kolunun çevrimsel yükleme altında ağırlığının deterministik yöntemlerle eniyilenmesi ve ardından elde edilen optimum tasarımın güvenilirlik tahmini yapılmıştır.

Gerek ağırlık eniyilenmesinde gerekse güvenilirlik tahminlerinde yüksek doğruluk derecesine sahip sonlu elemanlar analizleri kullanılmıştır. Yorulma ömrü birden çok parametreye (malzeme özellikleri, yükleme koşulları vb.) karşı oldukça duyarlı olduğu için kullanılan sonlu elemanlar analizlerinin yorulma testleri ile doğrulanması gerekmektedir.

Tezin ilk aşamasında; hazırlanan sonlu elemanlar modeli TOBB ETÜ Teknoloji Merkezinde yapılan yorulma testleri ile doğrulanmıştır. Yapılan yorulma testi sonuçları düşük çevrim yorulması ile yüksek çevrim yorulması kabullerinin arasında bir değerde çıkmıştır. Dolayısıyla yorulma analizleri yapılırken çözüm yöntemi olarak hem gerilme-ömür hem de gerinim-ömür yöntemi sonuçları incelenmiştir. Analizler sonucunda gerinim-ömür yönteminin sonuçları yorulma testleri ile daha tutarlı olduğu için çözüm yöntemi için bu yöntem seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında ANSYS Workbench'in yorulma modülü kullanılarak gerçekleştirilen sonlu

elemanlar analizleri ile tork koluna yapılan yorulma testlerinin oldukça tutarlı olduğu söylenebilir.

Sonlu elemanlar modelinin doğrulaması yapıldıktan sonra, tork kolunun ağırlık eniyilenmesi yapılan yorulma testlerinden farklı olan çalışma sınır koşulları altında yapılmıştır. Eniyileme yapılırken yüksek hesapsal maliyetlerden kurtulmak adına vekil modeller kullanılmıştır. Vekil model olarak ise yanıt yüzey ve Kriging yöntemleri incelenmiştir. Eniyileme işlemleri yapılırken iki vekil modelle de sonuçlar alınmıştır. Yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan vekil modelle ağırlığı daha fazla azaltmak mümkün olmuştur. Eniyileme işlemi sonucunda 0,1966 kg olan tork kolunun kütlesi %28,6 oranında azaltılarak 0,1401 kg'a düşürülmüştür.

Eniyileme işleminden sonra Monte Carlo benzetimi ve kuyruk olasılığı modelleme yöntemi kullanılarak, elde edilen optimum tasarımın güvenilirlik tahmini yapılmıştır. Genelleştirilmiş Pareto dağılımını kullanarak güvenilirlik hesabı yapan kuyruk olasılığı modelleme yöntemiyle güvenilirlik tahmini için gerekli Pareto dağılımı parametrelerinin elde edilmesinde en büyük olabirlik kestirimi ve en küçük kareler regresyonu yöntemi kullanılmıştır. Monte Carlo benzetimi ile güvenilirlik 0,9991 olarak hesaplanırken; kuyruk olasılığı modelleme yönteminde en büyük olabirlik kestirimi kullanılarak elde edilen sonuç 0,9995 olarak hesaplanmıştır. Genelleştirilmiş Pareto dağılımının parametrelerini bulmak için en küçük kareler regresyonu yöntemi kullanıldığında ise güvenilirlik 0,9990 olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elemanlar analizleri ile yorulma tahmini, Vekil modellerle eniyileme, yapısal güvenilirlik.

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **WEIGHT OPTIMIZATION AND RELIABILITY PREDICTION OF AN AUTOMOBILE TORQUE ARM SUBJECTED TO CYCLIC LOADING**

Nahide TÜTEN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Erdem ACAR

Date: August 2016

The goal of this thesis is to obtain the optimum shape of an automobile torque arm and predict its reliability. Torque arm, part of the rear suspension, is subjected to cyclic loading.

For optimization and reliability prediction, finite element analyses which have high accuracy level are used. Fatigue life is quite sensitive some parameters such as material properties, loadings etc. Therefore finite element analyses utilized for this study need to be verified by fatigue tests. First of all this verification is carried out by fatigue tests performed in TOBB ETU Technology Centre. Results of these tests show that the fatigue life of torque arm is between the low cycle and high cycle assumptions. Therefore for the solution method of finite element analysis both strain-life and stress-life method are investigated. Fatigue analyses show that the strain-life method gives better solution to torque arm problem. In light of the results of fatigue analyses which are performed by using ANSYS Workbench Fatigue Module, it can be said that fatigue test results and finite element analyses are consistent.

Second part of this thesis is the weight optimization of the torque arm. Operating conditions and fatigue test conditions of torque arm are not same in this study.

Optimization is performed under operating conditions. Surrogate models are used for optimization to reduce computational cost. Response surface method and Kriging model are investigated. Optimum design of Response Surface model is lighter than Kriging model. Therefore optimum design is obtained by using response surface model. At the end of optimization, torque arm weight is reduced by 28.6 percent.

The last part of this study is the reliability prediction of optimum design. Reliability prediction is performed by using Monte Carlo simulations and tail modelling. Tail modeling uses generalized Pareto distribution for reliability prediction. The parameters of this distribution are found by using maximum likelihood estimation and least square regression. With Monte Carlo simulation reliability of optimum design is calculated as 0.9991. The reliability prediction of tail modeling with maximum likelihood estimation is 0.9995 and with least square regression is 0.9990.

**Keywords:** Fatigue lifetime prediction with finite element analysis, Surrogate model optimization, structural reliability.

## TEŐEKKÜR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaőan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam; Doç. Dr. Erdem Acar'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım eş danıőmanım Prof. Dr. Mehmet Ali Güler'e, destekleriyle her zaman yanımda olan kardeőlerime, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan annem Sultan Serpil Tüten ve babam Recep Tüten'e, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen arkadaőlarım Sercan Keskintaş ve Barıő Bingöl'e, tez çalıőmalarımı 214M205 no.lu proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a, ayrıca burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne çok teőekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xi
<b>KISALTMALAR</b> .....	xiv
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Tez İçeriği .....	2
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	3
2.1 Yorulma Ömrü Tahmini.....	3
2.1.1 Gerilme-ömür yaklaşımı (S-N) .....	4
2.1.2 Gerinim-ömür yaklaşımı ( $\epsilon$ -N) .....	5
2.2 Vekil Modellerle Eniyileme.....	7
2.2.1 Giriş.....	7
2.2.2 Vekil model oluşturma.....	8
2.2.3 Deney tasarımı .....	9
2.2.4 Vekil model seçimi .....	9
2.2.5 Yanıt yüzey yöntemi .....	10
2.2.6 Kriging yöntemi .....	11
2.2.7 Radyal tabanlı fonksiyonlar .....	11
2.2.8 Vekil modelin doğrulanması.....	12
2.2.9 Oluşturulan vekil modelle eniyileme .....	12
2.3 Kuyruk Olasılığı Modelleme Yöntemiyle Güvenilirlik Tahmini .....	14
2.3.1 Giriş.....	14
2.3.2 Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi.....	15
2.3.3 Genelleştirilmiş Pareto dağılımı.....	16
<b>3 OTOMOBİL TORK KOLU YORULMA ÖMRÜNÜN SONLU</b> <b>ELEMANLAR ANALİZLERİ İLE TAHMİN EDİLMESİ</b> .....	<b>20</b>
3.1 Giriş.....	20
3.2 Tork Kolu Katı Modeli.....	22
3.3 Sınır Koşulları ve Çözüm Yöntemi.....	23
3.4 Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları.....	25
<b>4 OTOMOBİL TORK KOLUNUN KÜTLESİNİN VEKİL MODEL</b> <b>TABANLI ENİYİLEMESİ</b> .....	<b>36</b>
<b>5 OPTİMUM TASARIMIN GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ</b> .....	<b>60</b>
<b>6 SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>70</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>72</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>78</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>100</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Tork kolunun arka süspansiyon sistemindeki yeri (2011 Ford Focus) .....	1
Şekil 2.1: Gerilme-zaman grafiği (çevrimsel yükleme) [7] .....	4
Şekil 2.2: 120 Brinell sertliğine sahip çeliğe ait S-N eğrisi [8].....	5
Şekil 2.3: Örnek çevrimsel gerilme-gerinim eğrisi [9] .....	6
Şekil 2.4: SAE 120 çeliği gerinim genliği-ömür grafiği [10] .....	6
Şekil 2.5: Vekil model oluşturma adımları .....	9
Şekil 2.6: Lineer eğilime sahip Kriging vekil model ile tahmin [23] .....	11
Şekil 2.7: Sabit eğilimli Kriging vekil model ile tahmin [23].....	11
Şekil 2.8: Genetik algoritmanın çalışma prensibi [28].....	13
Şekil 2.9: Yapısal güvenilirlik analizinin aşamaları.....	14
Şekil 2.10: Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi [42].....	17
Şekil 2.11: Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruk GPD'leri [43] .....	17
Şekil 3.1: Test cihazı ve tork kolu.....	20
Şekil 3.2: Tork kolu yükleme durumu (geometrik ölçüler mm cinsindedir). .....	21
Şekil 3.3: Yorulma testi yapılan numune S1.....	21
Şekil 3.4: Yorulma testi düzeneğinin katı modeli .....	22
Şekil 3.5: Yorulma analizleri için oluşturulan katı model .....	23
Şekil 3.6: Eşdeğer gerilme dağılımı (a) bütün geometri (b) kritik bölge .....	26
Şekil 3.7: Çözüm ağ yapıları (mesh structure) eleman boyutu büyükten küçüğe a,b,c,d,e.....	35
Şekil 4.1: Tork kolu başlangıç geometrisi ve yükleme koşulu ( geometrik ölçüler mm cinsindedir.) .....	36
Şekil 4.2: Tasarım değişkenleri .....	36
Şekil 4.3: Eşdeğer gerilme dağılımı a) başlangıç tasarım b) optimum tasarım.....	58
Şekil 4.4: Yorulma ömrü dağılımı a) başlangıç tasarım b) optimum tasarım .....	58
Şekil 5.1: Yüz örneklemin yorulma ömrü değerlerinin histogramı. ....	62
Şekil 5.2: Yüz örneklemin yorulma ömrü değerlerinin grafiksel gösterimi. ....	64

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1: Yük kontrollü yorulma testleri sonuçları. ....	21
Çizelge 3.2: Maksimum gerilme değerleri. ....	27
Çizelge 3.3: Maksimum normal gerilme değerleri. ....	27
Çizelge 3.4: Yorulma analizleri ile elde edilen yorulma ömrü değerleri. ....	28
Çizelge 3.5: Durum 1, 2,3,4 için hesaplanan maksimum eşdeğer gerilmeler. ....	28
Çizelge 3.6: Durum 1, 2,3,4 için hesaplanan maksimum normal gerilmeler. ....	29
Çizelge 3.7: Durum 1, 2,3,4 için maksimum eşdeğer gerilme kullanılarak hesaplanan yorulma ömrü değerleri. ....	29
Çizelge 3.8: Durum 1, 2,3,4 için maksimum normal gerilme kullanılarak hesaplanan yorulma ömrü değerleri. ....	29
Çizelge 3.9: Durum 1 için hesaplanan ortalama eşdeğer gerilme değerleri. ....	30
Çizelge 3.10: Durum 1 için hesaplanan ortalama normal gerilme değerleri. ....	30
Çizelge 3.11: Durum 1 için hesaplanan ortalama yorulma ömrü değerleri. ....	31
Çizelge 3.12: Sürtünmesiz temas ve $\mu=0,7$ sürtünme katsayısına sahip temas için maksimum eşdeğer gerilme sonuçları. ....	32
Çizelge 3.13: Ortalama Eşdeğer Gerilme Değerleri ( $\mu=0,5$ ) ....	32
Çizelge 3.14: Ortalama Normal Gerilme Değerleri ( $\mu=0,5$ ). ....	32
Çizelge 3.15: Ortalama Ömür Değerleri ( $\mu=0,5$ ) ....	33
Çizelge 3.16: Ortalama Eşdeğer Gerilme Değerleri ( $\mu=0,3$ ) ....	33
Çizelge 3.17: Ortalama Normal Gerilme Değerleri ( $\mu=0,3$ ). ....	33
Çizelge 3.18: Ortalama Ömür Değerleri ( $\mu=0,3$ ). ....	33
Çizelge 3.19: Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$ alınarak yapılan analizlerin tamamlanma süresi. ....	34
Çizelge 4.1: Tasarım değişkenlerinin başlangıç değerleri. ....	37
Çizelge 4.2: Tasarım değişkenlerinin başlangıç aşamada belirlenen geniş alt sınır ve üst sınır değerleri. ....	39
Çizelge 4.3: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan karekök ortalama hata karesi (KOHK) ve ortalama mutlak hata (OMH) değerleri. ....	39
Çizelge 4.4: Örneklem noktalarında hesaplanan amaç ve kısıt fonksiyonlarının ortalama ve aralık değerleri. ....	39
Çizelge 4.5: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali. ....	40
Çizelge 4.6: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali. ....	40
Çizelge 4.7: 100 örneklem kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali. ....	41
Çizelge 4.8: 100 örneklem kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali. ....	41
Çizelge 4.9: Örneklem noktalarında hesaplanan amaç ve kısıt fonksiyonlarının ortalama ve aralık değerleri. ....	42
Çizelge 4.10: 100 örneklem ve logaritmik kısıt fonksiyonları kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali. ....	42
Çizelge 4.11: 100 örneklem ve logaritmik kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali. ....	42

Çizelge 4.12: Tasarım değişkenlerinin başlangıçtaki ve YYY vekil modeli kullanılarak elde edilen en iyi çözümdeki değerleri.....	44
Çizelge 4.13: YYY kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.....	44
Çizelge 4.14: Tasarım değişkenlerinin başlangıçtaki ve Kriging vekil modeli kullanılarak elde edilen en iyi çözümdeki değerleri.....	45
Çizelge 4.15: Kriging yöntemi kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	45
Çizelge 4.16: Birinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları. ....	46
Çizelge 4.17: Birinci aşama YYY eniyileme sonuçları. ....	46
Çizelge 4.18: Birinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	47
Çizelge 4.19: Birinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları. ....	47
Çizelge 4.20: Birinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	47
Çizelge 4.21: İkinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları. ....	48
Çizelge 4.22: İkinci aşama YYY eniyileme sonuçları. ....	48
Çizelge 4.23: İkinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	49
Çizelge 4.24: İkinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları. ....	49
Çizelge 4.25: İkinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	49
Çizelge 4.26: Üçüncü aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.....	50
Çizelge 4.27: Üçüncü aşama YYY eniyileme sonuçları. ....	50
Çizelge 4.28: Üçüncü aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	50
Çizelge 4.29: Üçüncü aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.....	51
Çizelge 4.30: Üçüncü aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	51
Çizelge 4.31: Dördüncü aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları. ....	51
Çizelge 4.32: Dördüncü aşama YYY eniyileme sonuçları. ....	52
Çizelge 4.33: Dördüncü aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	52
Çizelge 4.34: Dördüncü aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.....	52
Çizelge 4.35: Dördüncü aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	53
Çizelge 4.36: Beşinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları. ....	53
Çizelge 4.37: Beşinci aşama YYY eniyileme sonuçları.....	54
Çizelge 4.38: Beşinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	54
Çizelge 4.39: Beşinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.....	54
Çizelge 4.40: Beşinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları. ....	54
Çizelge 4.41: Başlangıç tasarım ve optimum tasarımın karşılaştırılması. ....	55
Çizelge 4.42: Bütün aşamalara ait tasarım değişkenleri sınırları ve eniyileme sonuçları. ....	56
Çizelge 4.43: Bütün aşamalara ait tasarım değişkenleri sınırları ve eniyileme sonuçları (devamı). ....	57
Çizelge 5.1: Rastgele değişkenlerin ortalamaları, standart sapmaları ve dağılım tipleri. ....	60

Çizelge 5.2: Vekil modellerin yorulma ömrü tahminlerindeki çapraz doğrulama hataları.....	65
Çizelge 5.3: Kriging vekil modelin yorulma ömrü tahminindeki çapraz doğrulama hataları.....	66
Çizelge 5.4: Tork kolu optimum tasarımın güvenilirlik tahminleri.....	68
Çizelge Ek 1 Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 50 örneklem.....	78
Çizelge Ek 2 Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 100 örneklem.....	80
Çizelge Ek 3 Tasarım değişkenleri için birinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.....	82
Çizelge Ek 4 Tasarım değişkenleri için ikinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.....	83
Çizelge Ek 5 Tasarım değişkenleri için üçüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.....	84
Çizelge Ek 6 Tasarım değişkenleri için dördüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.....	85
Çizelge Ek 7 Tasarım değişkenleri için beşinci aşamada oluşturulmuş 30 örneklem.....	86
Çizelge Ek 8 Güvenilirlik tahmini için kullanılan 700 örneklem.....	87
Çizelge Ek 9 Tork kolunun yapıldığı malzemenin (1040 Karbon Çeliği) özellikleri.....	98

## KISALTMALAR

<b>AN</b>	: Aralıkla Normalize
<b>GPD</b>	: Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı
<b>IQR</b>	: Çeyrek Değerler Genişliği
<b>KOHK</b>	: Karesel Ortalama Hatası Karekökü
<b>MC</b>	: Monte Carlo
<b>MCS</b>	: Monte Carlo Simülasyonları
<b>NKOHK</b>	: Normalize Edilmiş Karesel Ortalama Hata Karekökü
<b>NOMH</b>	: Normalize Edilmiş Ortalama Mutlak Hata
<b>OMH</b>	: Ortalama Mutlak Hata
<b>ON</b>	: Ortalama ile Normalize
<b>YYY</b>	: Yanıt Yüzey Yöntemi

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$b$	Yorulma mukavemeti üssü
$c$	Yorulma sünekliği üssü
$c^{(j)}$	Radyal tabanlı fonksiyon temel fonksiyon merkezi
$F_b$	Bileşke kuvvet
$F_n$	Negatif yük
$F_p$	Pozitif yük
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$F_x$	Yatay eksenindeki kuvvet
$F_y$	Düşey eksenindeki kuvvet
$F_Z(z)$	Koşullu aşım dağılımı
$g$	Sınır durum fonksiyonu
$g_k(x)$	Eşitsizlik kısıtları
$h_j(x)$	Eşitlik kısıtları
$k$	Tasarım değişkeni sayısı
$L_r$	Yükleme oranı
$N$	Toplam veri sayısı
$2N_f$	Hasara kadar geçen çevrim sayısı
$(2N_f)_{bt}$	Başlangıç tasarımın yorulma ömrü
$N_g$	Güvenli tasarım sayısı
$N_h$	Hasara uğrayan tasarım sayısı
$N_k$	Kritik ömür
$N_t$	Kuyruk bölümünde bulunan veri sayısı
$P_f$	Hasar olasılığı
$p^T(x)\beta$	Eğilim modeli
$R$	Güvenilirlik
$S$	Gerilme
$s$	Serbestlik değişkeni
$U_{x,y,z}$	X,Y,Z yönündeki deplasmanlar
$x$	Tasarım değişkenleri
$\hat{y}$	Vekil model tahmini
$Z(x)$	Sistematik sapma
$\beta$	Güvenilirlik indisi
$\beta_i$	Lineer fonksiyonun parametreleri
$\beta_0$	Sabit terim
$\varepsilon$	Gerinim
$\varepsilon_a$	Gerinim genliği
$\varepsilon'_f$	Yorulma sünekliği katsayısı
$\Delta\varepsilon$	Gerinim aralığı
$\Delta\varepsilon_e$	Elastik gerinim aralığı
$\Delta\varepsilon_p$	Plastik gerinim aralığı
$\lambda$	Radyal tabanlı fonksiyon model parametreleri
$\mu$	Sürtünme katsayısı

$\xi$	Genelleştirilmiş Pareto dağılımı şekil parametresi
$\sigma$	Genelleştirilmiş Pareto dağılımı ölçek parametresi
$\sigma_{bt}$	Başlangıç tasarıma ait maksimum eşdeğer gerilme
$\sigma_{\max}$	Üst sınır gerilme değeri
$\sigma_{\min}$	Alt sınır gerilme değeri
$\Delta\sigma$	Gerilme aralığı
$\sigma_m$	Ortalama gerilme
$\sigma_a$	Gerilme genliği
$\sigma'_f$	Yorulma mukavemeti katsayısı
$\Phi$	Kümülatif standart normal dağılım





## 1. GİRİŞ

Gün geçtikçe değişen ve gelişen teknoloji, otomotiv sektöründeki araştırma ve geliştirme çalışmalarını da oldukça artırmıştır. Üretici firmalar yakıt tasarrufu, konfor, maksimum verim, güvenlik sistemlerinin iyileştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmaları bu gelişmeler ışığında ilerletme çabasındadırlar.

Özellikle ülkemiz açısından bakılacak olursa, ulaşım ve taşımacılık büyük ölçüde karayolları üzerinden yapılmaktadır [1]. Dolayısıyla güvenlik ve konfora duyulan ihtiyaç da sürekli artmaktadır. Daha güvenli ve konforlu bir yolculuktan bahsetmek için ise ani fren, hızlanma, viraj alma gibi her türlü sürüş durumunu göz önünde bulundurmak gerekir. Bu şartlarda güvenilir ve konforlu bir seyahat için gelişmiş bir süspansiyon sistemi şarttır.

Otomobildeki süspansiyon sisteminin amacını; her türlü sürüş durumunda, sürüş stabilitesini optimum seviyeye çıkarmak olarak kısaca açıklamak mümkündür. Bu tezin temel örnek problemi olan otomobil tork kolu arka süspansiyon sisteminin bir parçasıdır. Genellikle alüminyum veya çelikten yapılan tork kolu Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Sağ taraftan tekerleklere, sol taraftan ise şasiye bağlı olan tork kolu hızlanırken tekerleklerin dönmesini engellerken, fren anında ise ekstra kuvvet uygulayarak frenleme sistemine yardımcı olur.



Şekil 1.1: Tork kolunun arka süspansiyon sistemindeki yeri (2011 Ford Focus)

## 1.1 Tez İçeriği

Bu tez çalışmasının temel amacı, çevrimsel yikleme altında çalışan otomobil tork kolunun ağırlığının deterministik yöntemlerle eniyilenmesi ve ardından elde edilen optimum tasarımın güvenilirlik tahmininin yapılmasıdır.

Bu alışma sırasında takip edilecek prosedür ise şu şekilde özetlenebilir: Öncelikle çevrimsel yikleme altındaki otomobil tork kolunun yorulma ömrü, sonlu elamanlar analizi kullanılarak tahmin edilmiştir. Tezin ilk aşaması olan yorulma ömrünün doğru tahmin edilmesi, diğer aşamalarda kullanılacak sonlu elemanlar analizlerinin güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla sonlu elemanlar modeli, TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi'nde yapılan yorulma testleri ile doğrulanmıştır.

Yorulma test koşulları modellenip, sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen yorulma ömrünün doğrulaması yapıldıktan sonra, tork kolunun ağırlığının eniyilenmesi, çalışma koşulları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Eniyileme probleminin zm için çok fazla sayıda sonlu elamanlar analizleri yapılması gerekebilir ve kabul edilebilir doğruluk derecesine sahip sonuçlar elde etmek için saatler süren sonlu elemanlar analizleri gerekebilir. Bu problemde kurtulmak adına eniyileme probleminin zm için vekil modeller (yanıt yüzey, kriging, yapay sinir ağları vb.) kullanılmıştır.

Özellikle uçak, otomobil gibi sektörlerdeki mühendislik sistemlerinin tasarımında, yüksek güvenilirlik seviyeleri beklenmektedir. Dolayısıyla bir sistemin kendinden beklenen performansı başarıyla gerçekleştirme olasılığı olarak tanımlanan güvenilirliğin tahmini bu çalışmanın son aşamasıdır. Tork kolunun optimum tasarımının güvenilirlik analizi ise, hasar yorulmadan kaynaklandığı için yorulma ömrü üzerinden modellenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde üç ana başlık halinde literatür bilgisi anlatılmıştır. nc blmde sonlu elemanlar analizlerinin yorulma testleri ile doğrulaması ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Dördüncü blmde ağırlık eniyilemesi sonuçları verilmiştir. Beşinci blmde, elde edilen optimum tasarımın güvenilirlik analizlerine yer verilmiştir. Son olarak ise genel sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışmalara dair öneriler sunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Yorulma Ömrü Tahmini

Mühendislik sistemlerindeki hasarlar incelendiğinde büyük çoğunluğunun aslında malzemenin akma mukavemetinin altındaki değerlerde meydana geldiği görülür [3]. Özellikle çevrimsel değişken yüklemelere maruz kalan dönen parçalar, motor şaftları, köprülerdeki hasarlar malzeme akma mukavemetinin oldukça altında değerlerdedir [3]. Değişken yüklemeler altındaki malzemelerdeki bu hasara yorulma hasarı denir [4]. Yorulma hasarlarının tehlikeli tarafı aniden olması yani önceden uyarı vermemesidir.

Değişken yükleme altındaki mühendislik sistemlerinin tasarımı yapılırken, klasik tasarım yöntemlerinden olan akma mukavemetine göre tasarımdan ziyade yorulma hasarına karşı tasarım yapmak daha doğrudur. Yorulma hasarına göre tasarım yapılırken yorulma ömrünün hesabı oldukça önemlidir. Çünkü sonsuz ömüre sahip tasarımlar yapmak fazlaca korunumlu bir yaklaşım olur ve tasarıma fazladan ağırlık, maliyet vb. getirir. Dolayısıyla genelde mühendislik sistemleri belirli bir yorulma ömrüne sahip olacak şekilde tasarlanır [5].

Yorulma ömrü hesabı yapılırken temelde üç tür yaklaşım uygulanır; gerilme tabanlı yaklaşım (S-N), gerinim tabanlı yaklaşım ( $\epsilon$ -N), kırılma mekaniği yaklaşımı [4]. Bu üç yaklaşım belirli yüklemeler altında hasara kadar geçen ömrü ( $N_f$ ) çevrim cinsinden tahmin etmeye dayalıdır. Yorulma ömrü ise düşük çevrimli ve yüksek çevrimli ömür şeklinde sınıflandırılır. Bu ayırım çevrim bazında çok net olmamakla birlikte  $N > 10^5$  ömre yüksek çevrimli ömür demek mümkündür [6].

Gerilme tabanlı ömür hesabında (S-N), adından da anlaşılacağı üzere sadece gerilmeler göz önünde bulundurulur. En geleneksel yöntem olmasına rağmen, doğruluğu özellikle düşük çevrimli yorulma için yeterli değildir [4], çünkü sadece elastik deformasyonu hesaba katarak hesaplamalar yapar.

Gerinim tabanlı ömür hesabında ( $\epsilon$ -N) ise plastik deformasyon da göz önünde bulundurulur. Özellikle düşük çevrimli yorulma ömrü hesabı için oldukça uygundur [4].

Kırılma mekaniği yaklaşımında ise, malzemede çatlak (veya çatlaklar) zaten bulunduğu varsayımı yapılır ve gerilme şiddetini temel alarak çatlak ilerlemesi hesaplanır. İzin verilebilecek çatlak ilerlemesine kadar geçen ömür tahmin edilir. Bu tez kapsamında detaylı olarak incelenecek yaklaşım gerilme ve gerinim tabanlı ömür hesabıdır. Bu yöntemleri detaylıca anlatmadan önce yorulma hasarına sebep olan çevrimsel yüklemenin doğasını anlamak önemlidir.

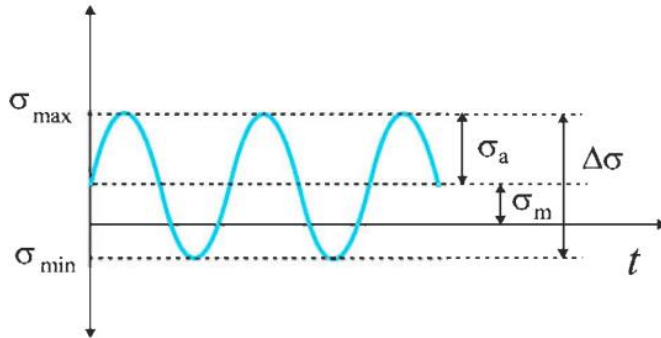
Çevrimsel bir yükleme durumunda oluşan gerilmelere ait örnek bir grafik Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Gerilme-zaman grafiğini anlayabilmek için grafikteki temel parametreleri tanımlamak önemlidir. Burada  $\sigma_{max}$  ve  $\sigma_{min}$  sırasıyla üst ve alt sınır gerilme değerleridir.  $\Delta\sigma$  gerilme aralığı olup üst sınır gerilmesi ile alt sınır gerilmesinin arasındaki farktır.  $\sigma_m$  malzemede oluşan alt sınır ve üst sınır gerilmesinin ortalamasıdır.  $\sigma_a$  ise gerilme aralığının yarısıdır [7].

$$\text{Gerilme aralığı (stress range):} \quad \Delta\sigma = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (2.1)$$

$$\text{Gerilme genliği (stress amplitude):} \quad \sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (2.2)$$

$$\text{Ortalama gerilme (mean stress):} \quad \sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{max} + \sigma_{min}) \quad (2.3)$$

$$\text{Yükleme oranı (loading ratio):} \quad L_r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

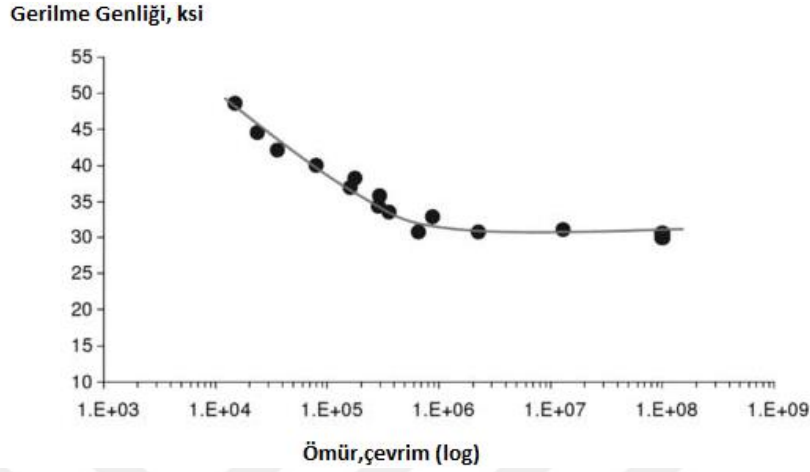


Şekil 2.1: Gerilme-zaman grafiği (çevrimsel yükleme) [7]

### 2.1.1 Gerilme-ömür yaklaşımı (S-N)

Yorulma testleri yapılırken, malzeme hasara uğrayana kadar değişken yüklemeler yapılır. Numuneye uygulanan kuvvetler, ya sabit aralığa ya da sabit genliğe sahip gerilmeler oluşturacak şekilde seçilir. Genelde yorulma testlerinde, çekme gerilmeleri pozitif olarak kabul edilir [8]. Yapılan testlerde gerilme aralığı ( $\Delta\sigma$ ), ya da gerilme genliği ( $\sigma_a$ ) kontrollü (bağımsız) değişkenken, hasara kadar geçen çevrim sayısı ( $N_f$ ) ise bağımlı değişkendir ve her çevrim iki tersinimdem (*reversal*) ( $2N_f$ ) oluşur.

Gerilme-ömür testleri birçok numune için yapılır ve yükleme oranı olarak ise  $L_r = -1$  alınır (*fully reversed*). Testler sonucunda gerilme-ömür eğrileri (S-N) elde edilir. Bu eğriler genellikle yarı logaritmik ya da log-log koordinatlarda gösterilir. 120 Brinell sertliğine sahip çeliğe ait S-N eğrisi örnek olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: 120 Brinell sertliğine sahip çeliğe ait S-N eğrisi [8]

Bu S-N eğrilerinden gerilme-ömür yönteminde kullanılan Basquin eşitliği olarak bilinen denklem elde edilir.

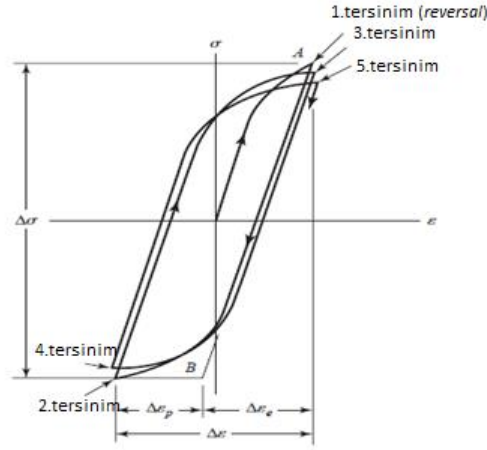
$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'teki  $\sigma'_f$  ve  $b$  malzeme özellikleri olup sırasıyla yorulma mukavemeti katsayısı (*fatigue strength coefficient*), yorulma mukavemeti üssüdür (*fatigue strength exponent*).

### 2.1.2 Gerinim-ömür yaklaşımı ( $\epsilon$ -N)

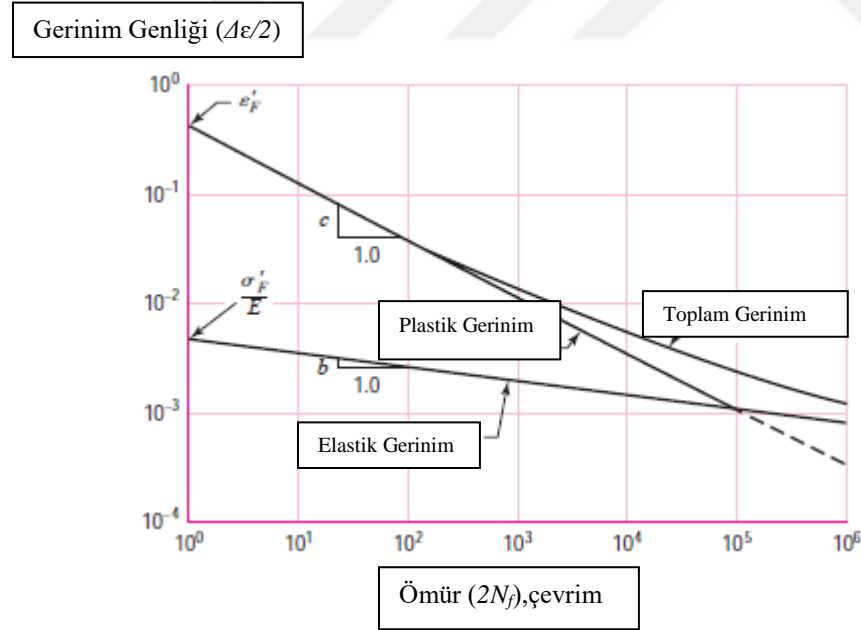
Yorulma ömrü hesaplanırken kullanılan yöntemlerden en iyisi olarak gerinim-ömür yaklaşımı görülür [4]. Yorulma hasarı genellikle gerilme konsantrasyonların olduğu kısımlarda (delikler, çentikler vb.) başlar. Bu noktalardaki gerilmeler elastik limiti aştığı zaman plastik deformasyonlar oluşur. Dolayısıyla çevrimsel deformasyonların incelenmesi gerekir.

Landgraf (1968), çeliklerde düşük çevrimli ömür üzerinde çalışmalar yapmıştır ve çalışmalarını sırasında çevrimsel gerilme-gerinim grafikleri elde etmiştir [9]. Çalışmalarından elde edilen tipik bir çevrimsel gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Örnek çevrimsel gerilme-gerinim eğrisi [9]

Burada toplam gerinim elastik ve plastik gerinimin toplamıdır. 1975 yılında ise Otomotiv Mühendisleri Birliği Yorulma Tasarım ve Değerlendirme Yönetim Kurulu (*The SAE Fatigue Design and Evaluation Steering Committee*), hasara neden olacak çevrim sayısının (yorulma ömrü), gerinim genliğiyle ( $\Delta\epsilon/2$ ) ilişkili olduğunu açıklayan bir rapor açıklamıştır. Bu rapordaki SAE 120 çeliğine ait gerinim genliği-ömür grafiği Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: SAE 120 çeliği gerinim genliği-ömür grafiği [10]

Grafiği açıklamak için önce bazı malzeme özelliklerini açıklamak gerekir. Gerilme-ömür yöntemi açıklanırken gösterilenlerin malzeme özelliklerinin yanında  $\epsilon'_f$  yorulma sünekliği katsayısı,  $c$  ise yorulma sünekliği üssüdür.

Şekil 2.4'ten anlaşılacağı üzere toplam gerinim aralığı  $\Delta\varepsilon$ ;

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (2.6)$$

Şekil 2.4'teki elastik ve plastik gerinim eğrilerinden ise elastik ve plastik gerinim aralıkları;

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir. Denklem (2.6), (2.7), (2.8) beraberce kullanılarak, toplam gerinim aralığı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) gerinim-ömür yaklaşımında kullanılan Coffin-Manson eşitliği olarak bilinir [11].

## 2.2 Vekil Modellerle Eniyileme

### 2.2.1 Giriş

Eniyileme, bir problemin belirli kısıtlar altında en iyi çözümünü bulma işlemi olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, tasarım değişkenlerini uyarlayarak belirli kısıtlar altında belirli bir amaç fonksiyonunu en küçükleme veya en büyükleme için kullanılan sistematik bir yöntemdir [12].

Bir mühendislik sisteminde; tasarım değişkenleri kalınlık, çap, kesit alanı gibi geometrik özellikler, ya da malzeme özellikleri olabilir. Amaç fonksiyonu da sistemin optimize edilecek yani en küçüklenecek ya da en büyüklenecek yanıtıdır (maliyet, ağırlık, verim vb.) ve her mühendislik problemi belirli kısıtlar altında tasarlanır. Bazen tasarım değişkenleri geometriden kaynaklanan sınırlara sahip olurken, bazen de malzeme özellikleri probleme bazı sınırlamalar getirir. Örneğin; bir mühendislik tasarımı yaparken malzemenin akma mukavemetini geçmemesi beklenir; bu bir tasarım kısıtıdır [12].

Uçak veya otomobil yapılarının minimum ağırlık için tasarımı, pompa, türbin gibi ekipmanların maksimum verim için tasarımı, üretim maliyetinin minimum değeri

için proses koşullarının belirlenmesi gibi problemler mühendislikteki eniyileme problemlerine örnektir [13].

Bir eniyileme probleminin matematiksel olarak ifade edilme şekli ise Denklem (2.10)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{öyle ki} \quad & h_j(x) = 0 \quad j=1, \dots, n_e \\ & g_k(x) \leq 0 \quad j=1, \dots, n_g \\ & x^L \leq x \leq x^U \end{aligned} \quad (2.10)$$

Burada  $x$  tasarım değişkenleri,  $f$  amaç fonksiyonu,  $h$  eşitlik kısıtları,  $g$  ise eşitsizlik kısıtlarıdır.

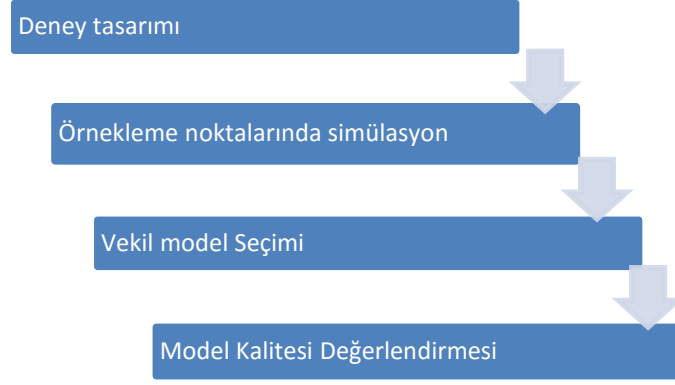
Günlük problemler düşünüldüğünde, mühendislik sistemlerinin cevaplarını (amaç ve kısıt fonksiyonlarını) tasarım değişkenleri cinsinden kapalı bir fonksiyon halinde yazmak her zaman mümkün olmayabilir. Genelde bir yapının belirli tasarım değişkenlerine verdiği cevapları elde etmek için yüksek doğruluk derecelerine sahip analizler kullanılır (sonlu elemanlar analizleri vb.). Teknolojideki gelişmelere rağmen kabul edilebilir doğruluğa sahip analiz modellerinin çözümü ise 6-8 saat arasında sürmektedir [14] ve bir eniyileme probleminin çözümü için bu analiz modellerinin defalarca çağırılması gerekir. Dolayısıyla bu çok yüksek miktarda hesapsal maliyet demektir. Bu problemi çözenin bir yolu ise *vekil modeller* kullanmaktır [15].

### 2.2.2 Vekil model oluşturma

Vekil modeller, tasarım değişkenleri ile sistem yanıtları arasında matematiksel bir ilişki kurmak amacıyla kullanılır. Bir vekil model, eniyileme probleminin çözümü için gerekli olan analiz sayısından çok daha azı kullanılarak oluşturulabilir [12]. Böylece hesapsal maliyeti oldukça düşürürken, tasarım değişkenleri ile analiz çıktıları arasında türevlenebilir fonksiyonlar elde edilmesini sağlar.

Vekil model oluştururken izlenmesi gereken prosedür Şekil 2.5'te gösterilmiştir.





Şekil 2.5: Vekil model oluşturma adımları

### 2.2.3 Deney tasarımı

Deney tasarımında amaç, tasarım uzayında mümkün olduğunca az nokta kullanarak gerekli bilgileri elde etmektir [16,17]. Bazı deney tasarımlarında yeterli miktarda bilgi elde etmek için çok fazla örneklem oluşturmak gerekebilir ve bu her zaman mümkün olmayabilir. Yani örneklem yapılırken, örneklem noktalarından elde edilen bilgi ile kullanılan örneklem sayısı arasında bir ödünleşim (*trade-off*) vardır.

Faktöriyel tasarımlar (*factorial designs*) [16], klasik deney tasarımlarındandır. Olabilecek bütün kombinasyonların kullanıldığı tasarımlara tam faktöriyel tasarım (*full factorial design*) denir. Ancak bu deney tasarımlarında tasarım değişken sayısı arttıkça gereken örneklem sayısı oldukça fazladır (tasarım değişkeni sayısını göre üssel olarak artar). Alternatif faktöriyel tasarımlara örnek olarak; merkezi birleşik tasarım (central composite design, CCD) ve Box-Behnken tasarımı gösterilebilir [18].

Klasik yöntemler diyebileceğimiz bu yöntemlerin yanında modern deney tasarımı yöntemleri denilen daha çok bilgisayar destekli simülasyonlar için geliştirilen yöntemler de mevcuttur. Rastgele örnekleme, Monte Carlo benzetimi, latin hiperküp örnekleme, dikey sıralar gibi deney tasarımları modern yöntemlere örnek olarak gösterilen uzay doldurma tekniklerindedir [19].

### 2.2.4 Vekil model seçimi

Daha önceki bölümde açıklandığı üzere, vekil modeller tasarım değişkenleri ile amaç ve kısıt fonksiyonları arasında matematiksel ilişki kurarak, az sayıda simülasyonla eniyileme problemini çözmemizi sağlarlar. Dolayısıyla yüksek hesapsal maliyetlerden kurtulmak mümkün olur. Yanıt yüzeyler [Myers vd., 2009], Kriging [Sacks vd., 1989; MacKay, 1998; Simpson vd., 2001b; Lophaven vd., 2002; Martin

ve Simpson,2005; Wang vd.,2005], radyal tabanlı fonksiyonlar [Hardy, 1971; Mullur ve Messac, 2005], yapay sinir ağları [Smith, 1993], popüler vekil modeller arasındadır [20]. Bir sonraki bölümde popüler olan yöntemlerden birkaçı daha detaylı açıklanmıştır.

### 2.2.5 Yanıt yüzey yöntemi

Yanıt yüzey yönteminin (YYY) temeli, deney tasarımı yöntemleri ile elde edilen verilere polinom uydurmaya dayanır [21]. Bu yöntemde genellikle ikinci dereceden polinomlar kullanılsa da, yüksek dereceli polinomlar da yeterli deney tasarımı yapılmış ise kullanılabilir.

YYY'de kullanılan en basit model Denklem (2.11)'deki gibi lineer bir fonksiyon kullanarak model oluşturmaya dayanır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.11)$$

Burada  $k$  tasarım değişkeni sayısı,  $\beta_0$  denklemin sabit terimi,  $\beta_i$  lineer fonksiyonun parametreleri,  $x_i$  tasarım değişkenleri,  $\varepsilon$  ise deneysel hataları gösterir.

Daha doğru model elde etmek adına, Denklem (2.12)'deki gibi ikinci derecede yanıt yüzeyler kullanılabilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.12)$$

Burada  $\beta_{ij}$  etkileşim çarpanlarının katsayısıdır.

Maksimum, minimum gibi kritik noktaların hesaplanması gerekiyorsa, Denklem (2.13)'te gösterildiği gibi karesel terimin de eklenmesi gerekir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.13)$$

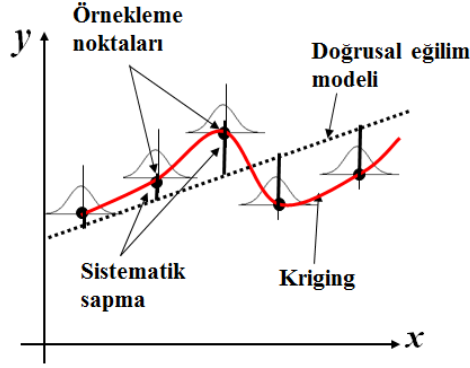
Kullanılan polinomun derecesi arttıkça, hesaplanması gereken katsayı sayısı da artmaktadır. Bu katsayıları doğru hesaplamak için kullanılması gereken örneklem sayısı da artmaktadır. Dolayısıyla kabul edilebilir doğruluğa sahip model oluşturmak adına kaçınıcı dereceden bir polinom kullanmak gerektiği ayrı bir araştırma konusudur. Yapılan çalışmalarda ise problemin doğasıyla değişmekle birlikte genellikle ikinci derecede polinom seçmenin yeterli olduğu görülmüştür [22].

### 2.2.6 Kriging yöntemi

Kriging yöntemindeki temel fikir, yanıt fonksiyonunun tasarım değişkeni  $x$  cinsinden Denklem (2.14)'teki gibi ifade edilmesidir.

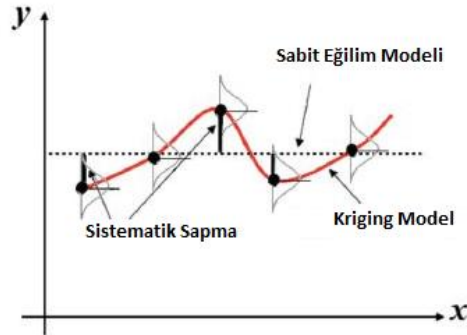
$$\hat{y}(x) = p^T(x)\beta + Z(x) \quad (2.14)$$

Burada  $p^T(x)\beta$  eğilim modelidir ve yanıtı yaklaşık olarak tahmin etmekten sorumludur.  $Z(x)$  ise sistematik sapmadır (bkz. Şekil 2.6) [23].



Şekil 2.6: Lineer eğilime sahip Kriging vekil model ile tahmin [23]

Eğilim modelleri arasında en sık kullanılan sıfırıncı derecede (sabit) ve birinci derecede (lineer) eğilim modelleridir [23]. Birinci derece eğilim modeline sahip örnek bir Kriging modeli Şekil 2.6'da, sabit eğilime sahip örnek bir Kriging modeli ise Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Sabit eğilimli Kriging vekil model ile tahmin [23]

### 2.2.7 Radyal tabanlı fonksiyonlar

Radyal tabanlı fonksiyonlar, radyal olarak simetrik bir fonksiyon olan  $\phi$ 'nin lineer kombinasyonlarının interpolasyonundan faydalanır [24].

$$\hat{f}(x) = \sum_{j=1}^K \lambda_j \phi(\|x - c^{(j)}\|) \quad (2.15)$$

Burada  $\lambda = [\lambda_1 \lambda_2 \dots \dots \lambda_K]$  model parametreleri vektörü,  $c^{(j)}$ ,  $j=1,2,\dots,K$  temel fonksiyon merkezi (*basis function center*) olarak bilinir. Model parametreleri Denklem (2.16)'daki gibi hesaplanır.

$$\lambda = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T f \quad (2.16)$$

Burada  $\phi$ , radyal simetrik fonksiyonlardır ve Denklem grubu (2.17)'dakiler gibi seçilebilir[20].

$$\phi(r) = \exp(-cr^2) \text{ (Gaussian)}$$

$$\phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2} \text{ (Çoklukare, multiquadratic)} \quad (2.17)$$

$$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + c^2}} \text{ (Ters çoklukare, inverse multiquadratic)}$$

### 2.2.8 Vekil modelin doğrulanması

Vekil modellerle eniyileme yaparken önemli olan bir diğer adım ise oluşturulan modelin doğruluğunun incelenmesidir. Vekil modellerin doğrulanmasında kullanılan birçok yöntem vardır. Oldukça kolay olan yöntemlerden biri örneklem bölmesidir (*split-sample*)[15]. Bu yöntemde elde olan veriler ikiye bölünür. İlk kısım (*training-subset*) vekil modelin oluşturulduğu noktalar olarak kabul edilir, ikinci kısım ise (*testing-subset*) model doğruluğu için kullanılır. En popüler yöntemlerden birisi ise çapraz doğrulamadır [15]. Bu yöntemde elde edilen veriler L sayıda bölüme ayrılır, bu bölümdeki veriler diğer L-1 bölümdeki veriler için test verisi olarak kullanılır. Sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem ise test noktası kullanımına dayalı yöntemdir. Bu yöntem kullanıldığında, karekök ortalama hata (RMSE) Denklem (2.18) kullanılarak hesaplanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - y)^2}{n}} \quad (2.18)$$

### 2.2.9 Oluşturulan vekil modelle eniyileme

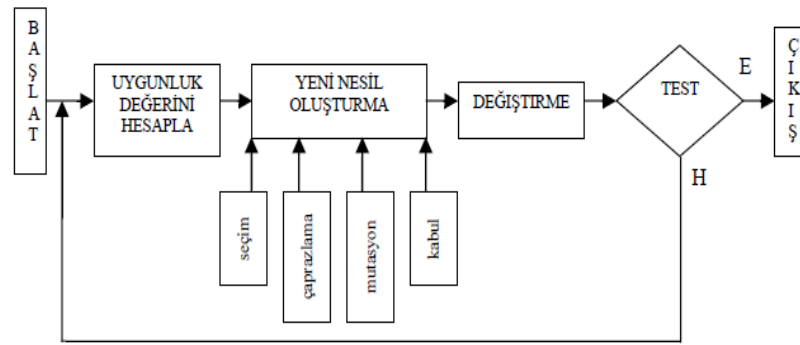
Kabul edilebilir doğrulukta tahmin yapabilen bir vekil model oluşturulduktan sonra, eniyileme bu vekil model kullanılarak gerçekleştirilebilir. Eniyileme problemi Denklem (2.10)'daki gibi modellenir. Eniyilenecek amaç fonksiyonu ve kısıtlar belirlendikten sonra, kullanılacak yöntemin seçilmesi gerekir. Bir eniyileme probleminin çözümü için gradyan tabanlı yöntemler ya da gradyan tabanlı olmayan

(genetik algoritma vb.) yöntemler kullanılabilir[25]. Vekil modellerle eniyileme yaparken kullanılan popüler yöntemler bu kısımda anlatılmıştır.

Görüntüleme (*screening*) yöntemi hem direkt eniyileme çözümlerinde hem de vekil modellerle eniyileme yaparken kullanılabilir. Bu yöntem yinelemeli (*iteratif*) bir yöntem olmayıp temelindeki fikir, Hammersley [26] algoritmasını kullanarak belirli sayıda rasgele tasarım oluşturup, amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre sıralamaktır.

Popüler olan bir diğer yöntem ise doğal seçim (seleksiyon) teorisinden esinlenmiş genetik algoritmadır. John Holland (1970) tarafından geliştirilmiştir [27]. Bu algoritma, çözüm dizilerinden oluşan bir başlangıç nesliyle, çaprazlama ve mutasyon gibi doğal seçim parametrelerini kullanır.

Algoritmanın genel prensibi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Genetik algoritmanın çalışma prensibi [28]

İlk olarak başlangıç nesli için  $n$  kromozumlu bir popülasyon oluşturulur. Başlangıç nesli genel olarak rasgele oluşturulur. Oluşturulan her bir kromozom için uygunluk fonksiyonu oluşturmak ikinci adımdır. Yeni bir nesil oluşana kadar seçim, çaprazlama ve mutasyon adımları tekrar edilir. Hesaplanan uygunluk fonksiyonuna göre iki tane kromozom çaprazlanmak için seçilir. Burada doğal seçim ilkesine dayanarak uygunluk derecesi yüksek olanın seçilme ihtimali yüksektir. Seçilen kromozomlar çaprazlama oranlarına göre çaprazlanır. Çaprazlama işlemi oluşan yeni bireylerin tamamen ebeveynlerinin kopyası olmaması için yapılır. Kromozom üzerindeki bazı dizilerin (genlerin) üzerinde mutasyon oranına göre değişiklik yapılır. Oluşturulan yeni nesil kabul edildikten sonra bu nesil ebeveyn nesil yerine geçerek, bir sonraki nesil bu nesli kullanarak oluşturulur. İstenen uygunluk derecesine erişilene kadar bu yinelemeli işlemler devam eder [28].

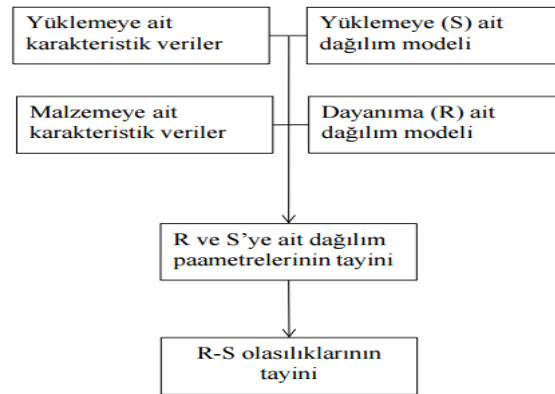
Eniyileme problemlerinin çözümünde kullanılan gradyan tabanlı yöntemlerden biri ise karesel lagranjlarla doğrusal olmayan programlama (*NLPQL, Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian*) yöntemidir. Tek amaç fonksiyona sahip problemlerin çözümünde kullanılmakta olup sözde Newton (*quasi Newton*) yöntemine dayanır [29]. Bir diğer gradyan tabanlı popüler yöntemlerden biri ise karışık tamsayı ardışık karesel programlama (*MISQP, Mixed-integer sequential quadratic programming*) yöntemidir. Yine tek amaç fonksiyonlu programlar için kullanılır ve ardışık karesel programlama (SQP) [30] yönteminin geliştirilmiş halidir.

## 2.3 Kuyruk Olasılığı Modelleme Yöntemiyle Güvenilirlik Tahmini

### 2.3.1 Giriş

Bir sistemin güvenilirliği belirli bir zaman diliminde ve belirli koşullar altında o sistemden beklenen işlemi yerine getirme olasılığı ile ifade edilebilir [31]. Mühendislik sistemlerinin karmaşıklaşması ve yüksek güvenilirliğe sahip sistemlere olan ihtiyacın artması, güvenilirlik tahminleri üzerinde olan çalışmalara olan ihtiyacı da artırmaktadır.

Yapısal sistemlerdeki belirsizlikler çoğunlukla yükleme, geometri ve malzeme özelliklerindeki belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. [32] Yapısal güvenilirlik analizi yapılırken bu belirsizliklerin hesaba katılması önemlidir. Yapısal güvenilirlik analizinin aşamaları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Yapısal güvenilirlik analizinin aşamaları

Yapısal güvenilirlik analizi yapılırken incelenmesi gereken önemli noktalardan biri ise sistemin sınır durum fonksiyonudur. Sınır durum fonksiyonu (performans fonksiyonu) sistem kapasitesi ile sistemin belirli koşullar altında yanıtı arasındaki

fark olarak tanımlanabilir [33]. Sistem yanıtı ve kapasitesine örnek olarak sırasıyla yapıdaki gerilmeler ve malzemenin akma mukavemeti verilebilir.

Güvenilirlik tahmini analitik yöntemlerle veya simülasyon temelli yöntemlerle hesaplanabilir. Analitik yöntemler içerisinde en popüler olanları birinci derece güvenilirlik yöntemi [34] (*first order reliability method – FORM*) ve ikinci derece güvenilirlik yöntemidir (*second order reliability method - SORM*) [35].

Simülasyon temelli teknikler ise Monte Carlo yöntemi [36] ve bu yöntemden geliştirilmiş tekniklerden olan önem örnekleme (importance sampling) [37], uyarlanmış önem örnekleme (adaptive importance sampling) [38] ve yönlü simülasyon (directional simulation) [39] olarak sıralanabilir. Fakat bu yöntemler çok yüksek sayıda sınır durum fonksiyonu hesabı gerektirir. Güvenilirlik tahmininde kullanılan bu yöntemlerin eksikliklerini geliştirmek adına, özellikle yüksek güvenilirliğe sahip sistemlerin güvenilirlik tahmininde kuyruk olasılığı modelleme yöntemi kullanılabilir [40].

### 2.3.2 Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi

Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi, ilgilenilen sınır durum fonksiyonunun kuyruk bölgesinin bilinen bir dağılıma (GPD) benzeştirerek, hasar olasılığı ve güvenilirlik indisi hesabı için bu dağılımın parametrelerini kullanmaya dayalıdır[40]. Benzeşen kuyruk bölümleri, kuyruk denkliği olarak da bilinmektedir.  $F(x)$  ve  $Q(x)$  kümülatif dağılım fonksiyonlarına sahip iki rassal değişken, aşağıdaki eşitliği sağladıkları takdirde kuyruk denkliğine sahiptir:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1-F(x)}{1-Q(x)} = 1 \quad (2.19)$$

$M_n$  rassal değişkeni,  $X_2, \dots, X_n$  gibi  $n$  tane aynı  $F$  olasılık dağılımına sahip, bağımsız rassal değişkenli bir dizinin en büyük değeri olsun. Bu durumda  $M_n$ 'nin kümülatif dağılım fonksiyonu Denklem (2.20) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} Pr \{M_n \leq z\} &= Pr\{X_1 \leq z, \dots, X_n \leq z\} \\ &= Pr\{X_1 \leq z\} \times \dots \times Pr\{X_n \leq z\} \\ &= \{F(z)\}^n \end{aligned} \quad (2.20)$$

Burada  $F$  dağılımı genellikle bilinmediği için bu Denklem (2.20) kullanılarak  $M_n$ 'nin olasılık dağılımını hesaplamak mümkün değildir. Dolayısıyla  $F_n$  için uç değerlere

göre elde edilmiş yaklaşık modelleri incelenir.  $\{a_n > 0\}$  ve  $\{b_n\}$  sabitlerine sahip Denklem (2.21)'deki gibi bir dönüşüm yapılır.

$$M_n^* = \frac{M_n - b_n}{a_n} \quad (2.21)$$

$M_n^*$  için tüm olası dağılım aralıkları için Fisher ve Tippet (1928) tarafından oluşturulan uç tipi teorem kullanılır [41]. Oluşturulan  $\{a_n > 0\}$  ve  $\{b_n\}$  sabitlerine sahip bir dizide,  $H$  çakışık olmayan bir dağılım fonksiyonudur ve  $n$  değeri sonsuza giderken Denklem (2.22)'deki koşul sağlamak şartıyla,

$$Pr \left\{ \frac{M_n - b_n}{a_n} \leq z \right\} \rightarrow H(z) \quad (2.22)$$

$H$  dağılım fonksiyonu Denklem grubu (2.23)'de gösterilen dağılımlardan birine dahildir.

$$H(z) = \exp \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{z - b}{a} \right) \right] \right\}, \quad -\infty < z < \infty$$

$$H(z) = \begin{cases} 0, & z \leq b \\ \exp \left\{ - \left( \frac{z - b}{a} \right)^{-\alpha} \right\}, & z > b \end{cases} \quad (2.23)$$

$$H(z) = \begin{cases} 1, & z \geq b \\ \exp \left\{ - \left[ - \left( \frac{z - b}{a} \right)^\alpha \right] \right\}, & z > b \end{cases}$$

Denklem grubu (2.23)'deki dağılımlar sırasıyla I., II. ve III. tip uç değer dağılımlarını gösterir. Bu dağılımların daha bilindik isimleri Gumbel, Frechet, ve Weibull dağılımlarıdır. Burada  $a$  ve  $b$  katsayıları dağılıma ait büyüklük ve konum parametreleri,  $\alpha$  ise şekil parametresi olarak bilinir. Bu üç dağılım ailesi tek bir model ailesine dönüştürüldüğünde, modelin dağılım fonksiyonu Denklem (2.24)'deki halini alır.

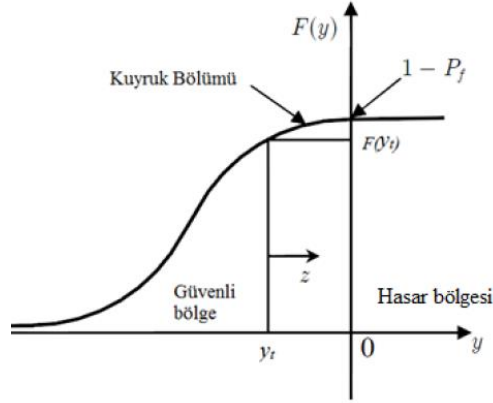
$$H(z) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (2.24)$$

### 2.3.3 Genelleştirilmiş Pareto dağılımı

Genelleştirilmiş Pareto dağılımı (GPD), bir eşik değer üzerindeki değerlerin benzetiminin yapılması gereken durumlarda kullanılır.  $y(x)$  gibi bir sınır durum fonksiyonunda  $x$  rassal değişkenleri gösterirken, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi,  $y_t$



büyükliğündeki bir eşik değerin üzerinde kalan bölge, kuyruk bölümü olarak adlandırılır ve genelleştirilmiş Pareto dağılımı kullanarak yaklaşım yapılabilir.

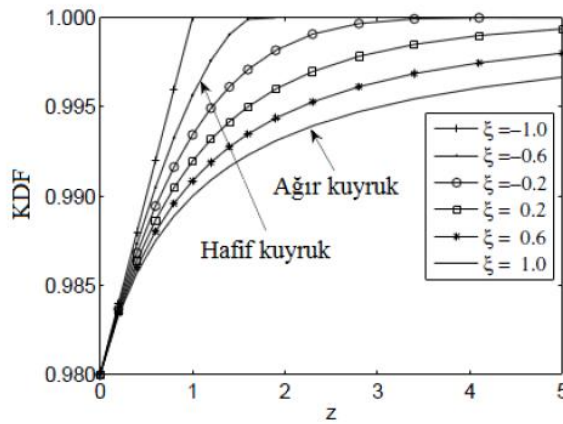


Şekil 2.10: Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi [42]

Genelleştirilmiş Pareto dağılımı,  $F_Z(z)$  olarak gösterilen koşullu aşım dağılımına benzetim yapar. Burada,  $z=y-y_t$  'dir ve benzetim Denklem (2.25)'deki gibi yapılır.

$$F_Z(z) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{z}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}}, & \text{eğer } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{z}{\sigma}\right), & \text{eğer } \xi = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'deki  $\xi$  dağılıma ait şekil parametresiyken,  $\sigma$  ise ölçek parametresidir. Şekil parametresi  $\xi$  dağılımın ağırlığı için önemlidir.  $\xi > 0$  olması pareto tipi denilen kuyruğun ağır olduğu durumu,  $\xi = 0$  olması üstel tip kuyruk denilen orta kuyruk durumunu,  $\xi < 0$  olması ise Beta tipi kuyruk denilen hafif kuyruk durumunu gösterir [43]. Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruklar Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruk GPD'leri [43]

Koşullu aşım dağılımı fonksiyonu ile  $F(y)$  kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki ilişki Denklem (2.26)'daki gibidir.

$$F_Z(y - y_t) = \frac{F(y) - F(y_t)}{1 - F(y_t)} = \frac{F(y) - F_t}{1 - F_t} \quad (2.26)$$

Seçilen eşik değerinin üzerindeki  $F(y)$  fonksiyonu koşullu dağılım fonksiyonu olan  $F_Z(y - y_t)$  cinsinden Denklem (2.27)'deki gibi ifade edilir.

$$F(y) = F_t + (1 - F_t)F_Z(y - y_t) \quad (2.27)$$

Denklem (2.27) kullanılarak  $F(y)$  hesaplandıktan sonra hasar olasılığı ise Denklem (2.28) yardımıyla hesaplanır [40].

$$P_f = 1 - F(y = 0) = (1 - F_t) \left(1 - \frac{z}{\sigma} y_t\right)_+^{-1/3} \quad (2.28)$$

Güvenilirlik indisi  $\beta$  ise Denklem (2.29) kullanılarak hesaplanır. Burada  $\Phi$  standart normal rassal değişkenin kümülatif dağılım fonksiyonunu belirtmektedir.

$$\beta = \Phi(1 - P_f) \quad (2.29)$$

Kuyruk olasılığı modelleme yöntemiyle anlatılan prosedür izlenip hasar olasılığı hesaplanırken, kuyruk bölümünün belirlenmesi için seçilecek uygun eşik değerinin belirlenmesi önemlidir. Uygun eşik değeri seçimi için birçok çalışma yapılmıştır. Kümülatif dağılım fonksiyonunu alt kuyruk, orta kısım ve üst kuyruk diye ayıracak olursak, Pickands (1975) yaptığı çalışmalarında Pareto dağılımında kuyruğun analizini yapabilmek için eşik değerinin yeterince yüksek bir değer olması gerektiğini öne sürmüştür [41].

Boos'un (1984) yaptığı çalışmada ise toplam veri sayısı,  $N$ , 50 ile 500 arasındayken kuyruk bölümündeki veri sayısının toplam veri sayısına oranının 0.2,  $N$  500 ile 5000 arasındayken ise bu oranın 0.1 olması gerektiğini öne sürmüştür [44].

Bu yönde bir başka çalışma ise Hasofer'e (1996) aittir. Bu çalışmaya göre kuyruk bölümünde bulunması gereken veri sayısı  $N_t$  ile toplam veri  $N$  arasındaki ilişki Denklem (2.30)'da gösterildiği gibidir[45].

$$N_t \approx 1.5\sqrt{N} \quad (2.30)$$

Uygun eşik değeri seçilip kuyruk bölümü belirlendikten sonra hasar olasılığının Denklem (2.28) kullanarak hesaplamak için genelleştirilmiş Pareto dağılımının parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreleri bulmak için birçok yöntem

mevcuttur; en büyük olabilirlik kestirimi (*maximum likelihood estimation*), momentler yöntemi (*method of moments*), en küçük kareler regresyonu yöntemi (*least square regression method*), olasılık ağırlıklı momentler (*probability weighted moments*) vb. [46-48].

Bir veri grubunun olabilirliği, seçilen olasılık dağılım modelinin o veri grubunu oluşturabilme olasılığıdır. Genelleştirilmiş Pareto dağılımındaki şekil ve ölçek parametrelerinin bulunması da benzer bir durum olduğu için bu dağılım parametrelerinin bulunmasında böyle bir yöntem kullanılabilir [49-50]. En büyük olabilirlik kestirimi, bilinmeyen dağılım parametrelerini içeren olabilirlik fonksiyonunun elde edilmesiyle başlar. Olabilirlik fonksiyonunu maksimize eden parametre değerleri elde edilir ve bu değerlere en büyük olabilirlik kestiricileri (*maximum likelihood estimators*) denir. Olabilirlik fonksiyonu, parametrelerin bulunabilmesi için, veri ve parametrelerin rollerini tersine çevirecek şekilde yeniden elde edilir:

$$L(\theta|x) = f(x|\theta) \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)'deki  $L$ ,  $x$  verisinden  $\theta$  parametresini elde etmenin olabilirliğini temsil eder ve  $\theta$ 'ya bağlı bir olasılık dağılım fonksiyondur.  $f(x|\theta)$  bilinen bir parametreler grubuna sahip bir veri fonksiyonudur ve veriye göre tanımlanır. Olabilirlik fonksiyonu olan  $L(\theta|x)$  ise bilinen bir veri grubuna sahip parametre fonksiyonudur ve parametreye göre tanımlanır.

En küçük kareler regresyonuna göre elde edilebilecek en iyi eğri, verilerin eğriye olan uzaklıklarının (yani eğriden olan sapmalarının) karelerinin toplamının minimum olduğu durumdur. Genelleştirilmiş Pareto dağılımının parametreleri Denklem (2.32)'nin minimize edilmesiyle bulunur.

$$\text{Min}_{z,\mu} \sum_{i=N_u}^N (\widehat{F}_{z,\mu}(z) - P_i)^2 \quad (2.32)$$

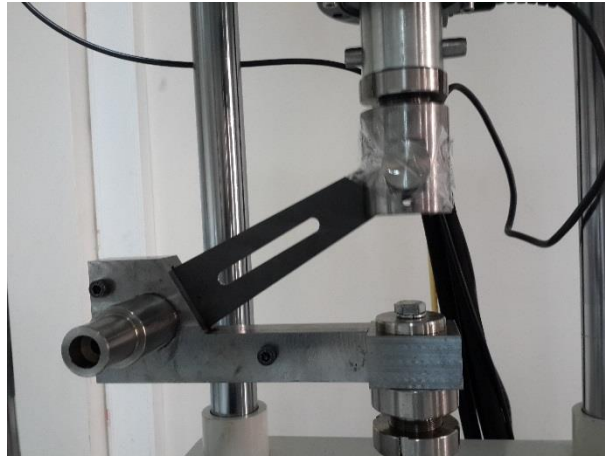
Denklemdaki  $N$  toplam veri sayısını,  $N_u$  ise eşik değerine karşılık gelen indeks değerini belirtir. Yukarıdaki eşitlikte deneysel kümülatif dağılım fonksiyonu olan  $P_i$  ise Denklem (2.33) kullanılarak hesaplanır.

$$P_i = \frac{i}{N+1}, i = 1 \dots N \quad (2.33)$$

### 3 OTOMOBİL TORK KOLU YORULMA ÖMRÜNÜN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ İLE TAHMİN EDİLMESİ

#### 3.1 Giriş

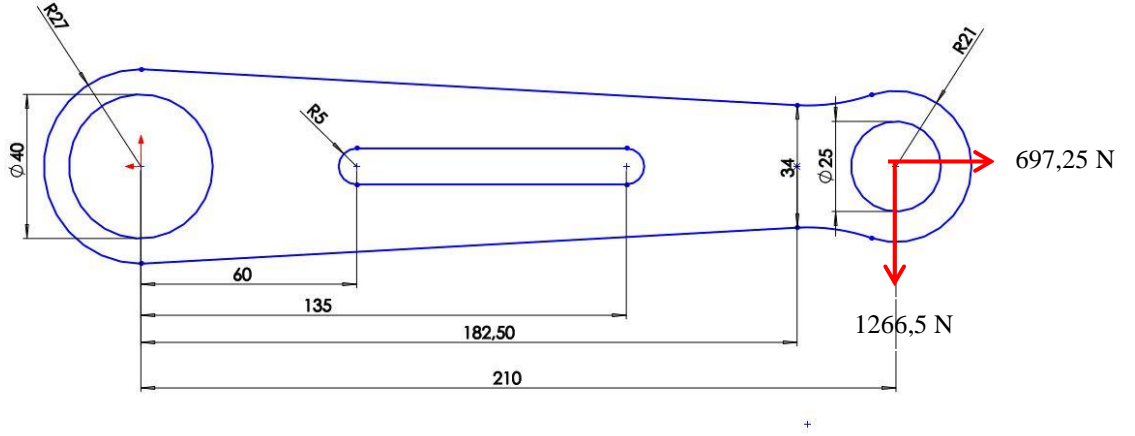
Otomobil tork kolunun çevrimsel yükleme altında eniyilemesini ve güvenilirlik tahminini yapabilmek için önemli olan ilk aşama tork kolunun yorulma ömrünün doğru tahmin edilebilmesidir. Ömür, sonlu elemanlar analizleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Yapılan ilk analizler ömür tahminin birden çok parametreye karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. Yorulma ömrünün sonlu elemanlar analizi ile tahminini doğrulamak için tork kolunun başlangıç tasarımına TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi'nde yorulma testleri yapılmıştır. Kullanılan test cihazı 300 kN kapasiteli (Marka: Labiotech, Model: HH300K-OC), sinüsoidal formda yükleme yapabilen, maksimum 15 HZ hızda çalışabilen, üzerindeki yük hücresinin hassasiyeti 0,05 N olan bir yorulma test cihazıdır. Yorulma testleri 10 Hz frekansta yapılmıştır. Test cihazı ve testlerde kullanılan tork kollarından birisi 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Test cihazı ve tork kolu

Tork kolunun geometrisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.  $\frac{1}{2}$  oranında ölçeklendirme yapılmıştır ve tork kolunun kalınlığı 3 mm'dir. Tork koluna 697.25 N büyüklüğünde yatay kuvvet ve 1266.5 N büyüklüğünde düşey kuvvet etkimektedir. Dolayısıyla, etkiyen bileşke kuvvet  $F_b = \sqrt{695,25^2 + 1266,5^2} = 1445,7 N$  olarak hesaplanabilir. CARLOS otomobil yükleme standartları kullanılarak (Schuetz vd.

1990), uygulanacak pozitif yük  $F_p = 1,10F_b = 1590 \text{ N}$  ve uygulanacak negatif yük ise  $F_n = -0,79F_b = -1140 \text{ N}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.2: Tork kolu yükleme durumu (geometrik ölçüler mm cinsindedir).

Yorulma testleri sonucu üç numune de aynı noktadan kırılmıştır. Şekil 3.3'te yorulma testi yapılan örnek numunelerden biri gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Yorulma testi yapılan numune S1.

Yük kontrollü yorulma testlerinden elde edilen ömür sonuçları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

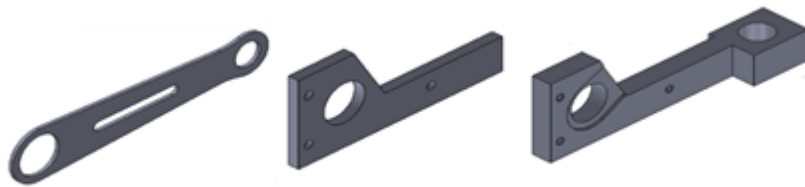
Çizelge 3.1: Yük kontrollü yorulma testleri sonuçları.

Numune	Pozitif Yük (N)	Negatif Yük (N)	Ömür (Çevrim)
S1	1590	-1140	23638
S2	1590	-1140	12508
S3	1590	-1140	16645
		Ortalama	17597
		Standart Sapma	5626

Test sonuçlarından da anlaşılacağı üzere aynı malzemeden yapılan (1040 Karbon Çeliği malzeme özellikleri için bkz. Ek 9 ) üç numuneye ait ömür değerlerinde bir miktar saçılım görülmektedir. Ömür değerlerinin ortalaması 17597 çevrim iken standart sapması 5626 çevrim çıkmıştır. Aynı yüklemelerin uygulandığı bu üç test sonuçlarının birbirinden farklı çıkması aslında yorulma ömrünün doğru bir şekilde tahmin edilebilmesinin oldukça zor olduğunu göstermektedir. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak yorulma testinin benzetiminde (*simülasyonunda*) tork kolunun yorulma ömrü için bu üç değer ortalamasını almak uygun görülmüştür. Yorulma testleri sonucuna bakıldığında ömür sonuçlarının, düşük çevrim yorulması (*low cycle fatigue*) ile yüksek çevrim yorulması (*high cycle fatigue*) kabullerinin arasında bir değerde olduğu görülmektedir. Çözüm yöntemi olarak da gerilme-ömür (*stress life*), gerinim-ömür (*strain-life*) yöntemleri incelenmiştir. Hem ömür sonuçları olarak gerinim-ömür yönteminin sonuçları daha mantıklı olduğundan hem de gerilme-ömür yönteminde, kullanılacak malzemeye ait S-N eğrilerinin elde edilmesi ve bu eğrilerin parametrelerinin kontrolü zor olduğundan Denklem (2.9) kullanılarak ömür tahmini yapan gerinim-ömür yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca bu yöntem seçilerek hem elastik hem de plastik deformasyon göz önünde bulundurulmuştur.

### 3.2 Tork Kolu Katı Modeli

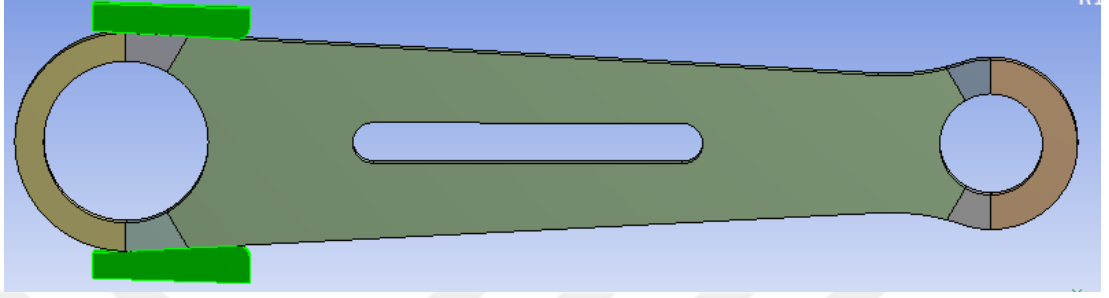
Tork kolu yorulma testleri yapılırken tork kolunu sabitlemek için Şekil 3.4'teki gibi ön ve arka çene olarak adlandırılan iki parçadan oluşan bir düzeneğe hazırlanmıştır.



Şekil 3.4: Yorulma testi düzeneğinin katı modeli

Yorulma analizlerinde bu düzeneğin hepsini modellemek için çok fazla sayıda eleman gerekmektedir. Dolayısıyla katı model oluşturulurken bütün model yerine

sadece tork kolu üzerinde temas tanımlanması gereken kısım modellenmiştir. Şekil 3.5'te yorulma analizleri için kullanılan katı model görülmektedir.



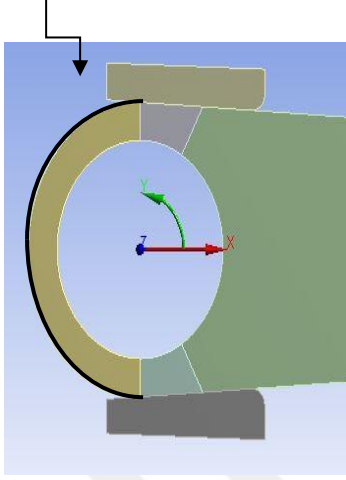
Şekil 3.5: Yorulma analizleri için oluşturulan katı model

Şekil 3.5'ten de anlaşılacağı üzere, test düzeneğinden sadece sınır koşullarında temas tanımlanan kısımlar modellenmiştir. Böylece analizlerde fazla sayıda eleman kullanmaktan kaçınılmıştır. Yine şekilden anlaşılacağı üzere tork kolu yedi ayrı bölümden oluşturulmuştur. Bu şekilde modellenmesinin sebebi ise dairesel kısımlarda çözüm ağ yapısını (*mesh*) daha düzgün oluşturabilmek ve gerekirse kritik bölgelerde daha fazla sayıda eleman oluşturabilmektir. Yorulma analizleri için kullanılan çözüm ağları, çözümün ağ modelindeki eleman sayısına bağlı olup olmadığı araştırılırken elde edilen sonuçlar içerisinde gösterilmiştir.

### 3.3 Sınır Koşulları ve Çözüm Yöntemi

Yapısal bir analiz gerçekleştirilirken çözüm için en önemli kısım sınır koşullarının doğru modellenmesidir. Yorulma testleri ile tork kolunun çalışma şartındaki sınır koşulları farklıdır. Bu aşamada yorulma testlerinin benzetimi yapılmak amaçlandığı için, test şartları altındaki sınır koşulları gösterilmiştir.

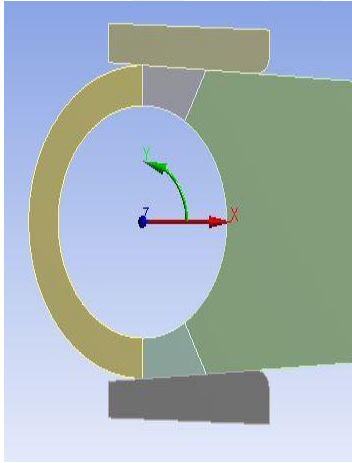
$$U_x=U_y=U_z=0$$



### Sınır Koşulu.1

Tork kolunun okla gösterilen kısmı çene içerisinde her yönde deplasmanı sınırlayan bir yuvaya girmektedir.

Dolayısıyla ilk sınır koşulu olarak; tork kolunun bu kısmında, silindirik koordinat eksenine göre üç yönde de deplasmanlar sıfırlanmıştır.

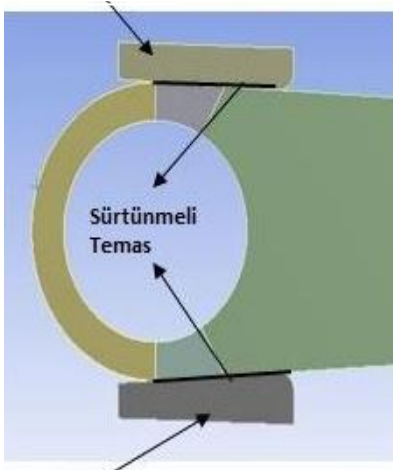


### Sınır Koşulu.2

Tork kolu sol tarafından, silindirik bir mille sabitlenmiştir.

Bu kısmı modellerken; tork kolunun sol tarafında bulunan deliğe sınır koşulu olarak, gösterilen silindirik koordinat eksenine göre X yönünde deplasmana izin verilmiş, diğer yönlerdeki deplasmanlar sıfırlanmıştır.

Sabit



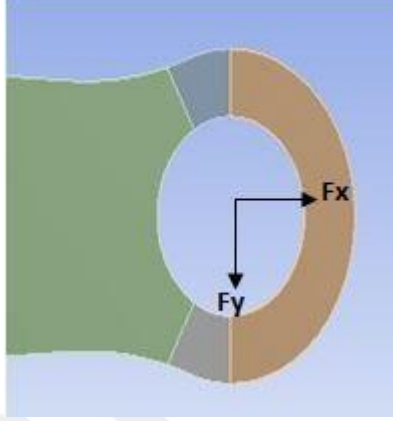
### Sınır Koşulu.3-4

Bu kısımda ise iki sınır koşulu vardır. Bu yuvanın gösterilen kısmı test koşulunda sabitlenmiştir.

Dördüncü sınır koşulu ise bu parçalarla tork kolu arasındaki sürtünmedir. Tork kolu modellenirken bu kısımla tork kolu arasına statik sürtünmeye sahip temas yüzeyi

Sabit





#### Sınır Koşulu.5

Tork kolunun sağ tarafındaki deliğin olduğu bu kısım ise, yüklemelerin olduğu kısımdır.

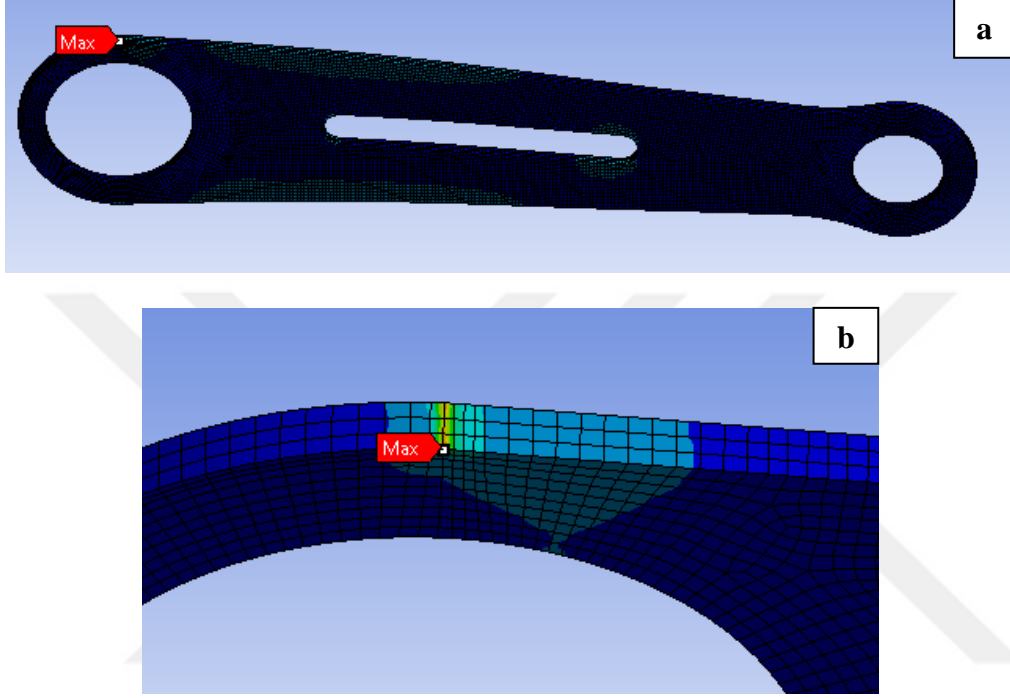
Bu yüzeyde ise Kartezyen koordinatlarda tanımlanan X yönünde 697,25 N Y yönünde ise 1266,5 N 'luk yatak yükü (*bearing load*) tanımlanmıştır.

Sınır koşulları belirlendikten sonra yapısal analiz kısmında; gerilmenin eşdeğer gerilme (*equivalent*) ve aslında kırılmaya sebep olduğu düşünülen normal gerilme değerleri incelenmiştir. Yapılan başlangıç analizlerin sonucunda ise tork kolunun ömrünü belirleyen gerilmenin normal gerilme olduğu görülmüştür. Tork kolu çalışma şartlarında değişken genliğe sahip yükleme altındadır. 1992'de Almanya'da iki laboratuvar (Bericht ve Fraunhofer) tarafından yapılan testler sonucunda araba süspansiyon sistemleri için geliştirilen çok eksenli yorulma standartlarını açıklayan bir teknik rapor yayınlanmıştır [51]. Bu standartları baz alarak, yükleme oranı (-0,718) olarak seçilmiştir. Yöntem olarak ise gerinim-ömür yöntemi kullanılmıştır. Yükleme oranı -1 (*fully reversed*) olmadığı için yani sıfırdan farklı bir ortalama gerilme durumu söz konusu olduğundan; ortalama gerilme düzeltilmesi uygun görülmüştür. Gerinim tabanlı ömür hesabı yapılırken sıklıkla kullanılan SWT yöntemi (Smith-Watson-Topper) seçilmiştir [52-53].

#### 3.4 Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları

Çözüm ağında dörtgen (*Quadrilateral*) elemanlar kullanılmış ve eleman boyutu 1mm alınarak toplamda 27888 elemanla yapılan analiz sonucunda maksimum eşdeğer gerilme Şekil 3.6'da gösterilen noktada 1143 MPa değerinde çıkmıştır. Yorulma testleri sonucu numunenin kırıldığı kısım da bu noktadır (bkz Şekil 3.2). Fakat analizler sonucunda hesaplanan maksimum eşdeğer gerilme değeri oldukça yüksektir. Bunun sebebi ise test koşullarını sağlamak amacıyla verilen Sınır

Koşulu.1'den kaynaklanan gerilme tekilliğidir. Dolayısıyla bu değeri direkt olarak göz önünde bulundurup test sonuçları ile kıyaslamak doğru bir yaklaşım değildir.



Şekil 3.6: Eşdeğer gerilme dağılımı (a) bütün geometri (b) kritik bölge

Gerilme tekillikleri sonlu elemanlar analizlerinde halledilmesi en zor koşullardan biridir. Boyut olarak yeterince büyük eleman kullanıldığında sonlu elemanlar analizinin bu tekilliği yakalaması mümkün değildir fakat model doğruluğu açısından kaba ağ yapılarıyla (eleman boyutu büyük, sayısı az) çözüm yapmanın da yöntem olarak doğru olduğu söylenemez.

Yapısal analiz çözümlerinde; gerilmeler elemanlar içerisindeki integrasyon noktalarında (*integration points*) çözülür ve genellikle bu noktalar düğüm noktalarında (*node*) değildir, dolayısıyla düğüm noktalarında gerilme hesaplamak için ekstrapolasyon kullanılır. [54]

Gerilme dağılımı elde edilirken bir başka yöntem ise elemanlar bazında ortalama değerlerin (*elemental mean stress*) dağılımını almaktır. Bu problemdeki gerilme tekilliğinden kurtulmak için gerilme dağılımları hem düğüm noktalarında ekstrapolasyonla hesaplanmış hem de eleman bazında ortalama değer olarak

incelenmiştir. Akma kıstası olarak ise von-Mises akma kriteri göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. 4 farklı eleman boyutu dolayısıyla 4 farklı eleman sayısına sahip ağ yapısı kullanılarak, gerilme değerlerinde yakınsama olup olmadığı incelenmiştir.

Çizelge 3.2: Maksimum gerilme değerleri.

Maksimum Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer Gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	1143,0	1045,0	1205,0	1421,5	1505,4
Eşdeğer Gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	473,1	430,2	483,5	478,8	487,7

Çizelge 3.2’den de anlaşılacağı üzere eleman bazında ortalama değerlerle hesaplanan eşdeğer gerilme değerleri gerçekte oluşan gerilmelere daha yakındır. İncelenmesi gereken bir diğer durum ise aslında kırılmaya sebep olduğu düşünülen ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak da kritik olduğu görünen normal gerilme değerleridir. Normal gerilme değerlere ait sonuçlar ise Çizelge 3.3 ‘te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3: Maksimum normal gerilme değerleri.

Maksimum Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Normal Gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	1094,0	994,7	1142,6	1370,3	1438,0
Normal Gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	476,8	427,3	482,1	558,9	584,1

Her ne kadar eleman bazında ortalama değerlerle hesaplanan gerilmeler gerçekte oluşan gerilmelere yakın olsa da sonlu elemanlar analizleri ile ömür hesabı yaparken gerilme bileşeni olarak bu değerleri almak mümkün değildir. Ekstrapolasyonlarla düğüm noktalarında hesaplanan gerilmeler ömür hesabında kullanılabilir. Bu değerlerle hesaplanan ömür değerleri ise Çizelge 3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4: Yorulma analizleri ile elde edilen yorulma ömrü değerleri.

Ömür Değerleri (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer Gerilme	996	1342	837	492	410
Normal Gerilme	1150	1586	997	552	474

Çizelge 3.4'ten de anlaşılacağı üzere ömür hesabında sınır koşulu.1'den kaynaklanan gerilme tekilliğinden kurtulmak mümkün olmamıştır. Ağ yapısını iyileştirmek de bu tekilliğin çözümü değildir.

Bu tekilliğin oluştuğu bölgeden kurtulmak adına bu bölgeyi dışarda bırakacak şekilde sonuçları değerlendirmek gerektiği sonucuna varılmıştır. Gerilme ve ömür değerleri bu bölgeden sırasıyla 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 mm uzaklıkta okunmuştur. Uzaklıklara göre okunan değerler sırasıyla durum 1, 2, 3, 4 olarak verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.5-3.6'da gösterilmiştir. Gerilme değerleri yine düğüm noktalarında ve elemanların ortalamasını baz alarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5: Durum 1, 2,3,4 için hesaplanan maksimum eşdeğer gerilmeler.

	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
<b>Maksimum Gerilme (Düğüm Noktalarında)(MPa)</b>					
Eşdeğer Gerilme (1)	511,0	515,1	502,5	480,9	472,9
Eşdeğer Gerilme (2)	348,0	351,6	340,1	343,7	339,9
Eşdeğer Gerilme (3)	294,7	296,7	291,3	286,1	283,9
Eşdeğer Gerilme (4)	253,9	256,3	252,1	251,3	249,5
<b>Maksimum Gerilme (Elemanlarda) (MPa)</b>					
Eşdeğer Gerilme (1)	473,1	430,2	483,5	478,8	487,7
Eşdeğer Gerilme (2)	373,6	363,9	378,2	350,6	350,7
Eşdeğer Gerilme (3)	303,3	301,2	303,6	304,6	303,8
Eşdeğer Gerilme (4)	265,7	264,9	265,6	255,8	254,6

Çizelge 3.6: Durum 1, 2,3,4 için hesaplanan maksimum normal gerilmeler.

	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
<b>Maksimum Gerilme (Düğüm Noktalarında) (MPa)</b>					
Normal Gerilme (1)	502,8	525,1	502,8	482,2	473,4
Normal Gerilme (2)	347,3	348,9	340,6	344,7	341,1
Normal Gerilme (3)	290,1	292,6	286,9	282,9	280,7
Normal Gerilme (4)	250,7	252,6	249,3	248,4	246,6
<b>Maksimum Gerilme (Elemanlarda)(MPa)</b>					
Normal Gerilme (1)	476,8	427,3	482,1	479,7	487,7
Normal Gerilme (2)	372,3	361,6	375,3	351,6	351,9
Normal Gerilme (3)	302,1	298,8	302,4	303,0	302,2
Normal Gerilme (4)	261,6	260,6	261,6	252,1	251,1

Yorulma ömrü değerleri için de yine tekilliğin olduğu bölgeden aynı uzaklıklardaki değerler alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.7-3.8'de gösterilmiştir. Ömür hesabında hem eşdeğer gerilme hem de normal gerilme kullanılmıştır.

Çizelge 3.7: Durum 1, 2,3,4 için maksimum eşdeğer gerilme kullanılarak hesaplanan yorulma ömrü değerleri.

Ömür (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Ömür (1)	18775	18180	20135	24198	25974
Ömür (2)	103840	98929	116130	110360	116490
Ömür (3)	238200	230120	252770	277520	289320
Ömür (4)	526070	499760	546560	556590	579050

Çizelge 3.8: Durum 1, 2,3,4 için maksimum normal gerilme kullanılarak hesaplanan yorulma ömrü değerleri.

Ömür (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Ömür (1)	20083	16798	20087	23904	25854
Ömür (2)	104930	102580	115370	108790	114430
Ömür (3)	258360	247000	273830	294640	306650
Ömür (4)	563220	540920	581210	592940	617340

Hem hesaplanan gerilme değerleri hem de ömür değerleri incelendiğinde tekilliğin bulunduğu noktadan 0,5 mm uzaklıktaki değerleri hesaba katmanın daha doğru sonuç verdiği bulunmuştur. Bir sonraki aşamada ise 0,5 mm uzaklıktaki sadece bir noktada maksimum gerilme ve minimum ömür değerleri yerine bu uzaklıkta bulunan çizgi üzerindeki bütün noktaların sonuçlarını alarak bu değerlerin ortalamasını almak uygun görülmüştür. Bu işlem analiz sonrasında biraz fazla işlem gerektirse de özellikle tekilliklerin olduğu bir durum için daha doğru bir yaklaşım olarak düşünülmüştür. Sonuçlar izelge 3.9-3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9: Durum 1 için hesaplanan ortalama eşdeğer gerilme değerleri.

Ortalama Gerilme (MPa)	izm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	491,0	500,0	482,1	454,7	441,6
Eşdeğer gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	415,9	388,0	417,3	427,2	436,8

Çizelge 3.10: Durum 1 için hesaplanan ortalama normal gerilme değerleri.

Ortalama Gerilme (MPa)	izm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Normal Gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	478,4	497,2	473,2	467,2	454
Normal Gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	418,7	387,9	420,2	430,6	442,7

0,5 mm uzaklıktaki (durum 1) düğüm noktalarının ortalaması alınarak hesaplanan yorulma ömrü değerleri için ise yine hem eşdeğer hem de normal gerilme kullanılmıştır. Sonuçlar izelge 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11: Durum 1 için hesaplanan ortalama yorulma ömrü değerleri.

Ömür Değerleri (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer gerilme	22263	20628	24035	31141	35342
Normal gerilme	25053	21632	27152	27874	31520

Dördüncü sınır koşulunda bahsedilen tork kolunun yerleştiği yuvayla arasındaki sürtünme bu problemin çözümünü oldukça uzatan ve modellenmesi oldukça önemli olan durumdur. Bu kısma kadar verilen sonuçlar sürtünme katsayısı 0,7 alınarak elde edilmiştir. Tork kolu karbon çeliklerinden olan 1040, tork kolunu sabitlemek için yapılmış test düzeneği ise yine karbon çeliklerinden 1041 kullanılarak üretilmiştir. Analizler yapılırken bu parçalara kendi malzeme özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bir diğer önemli olan kısım ise temas halinde olan bu iki çeliğin arasındaki sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı için deneysel olarak doğru bir değer elde etmek imkânlar çerçevesinde mümkün olmadığı için teorik olarak uygun olduğu düşünülen değerler sonlu elamanlar analizleri kullanılarak çözülmüştür. İlk aşamada akla sürtünme katsayısı arttıkça kritik bölgede oluşan gerilmenin artacağı gelse de; sürtünme katsayısı arttıkça sürtünmeden kaynaklanan kayma kuvveti dolayısıyla oluşan kayma gerilmesi artar. Fakat sürtünmeden kaynaklanan kayma kuvveti, yüklenen kuvvetten kaynaklanan kayma kuvvetiyle ters yönde olduğu için, sürtünme katsayısı arttıkça kritik bölgede oluşan kayma gerilmesi azalmaktadır. Dolayısıyla temas bölgesindeki sürtünme katsayısını artırdıkça maksimum gerilme azalacak, bundan dolayı da hesaplanan ömür artacaktır. İlk aşamada sürtünmesiz temas tanımlandığında sürtünmeli temasa göre daha yüksek gerilme daha düşük ömür çıkmasının sebebi de budur. Sürtünmesiz temas verildiğinde elde edilen sonuçlar ile 0,7 sürtünme katsayısı kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelge 3.12’de gösterilmiştir. Bu tablodaki değerler sınır koşulu.1 ‘den kaynaklanan gerilme tekilliğinin olduğu değerlerdir. Diğer değerler de (durum 1, 2, 3, 4 için sonuçlar)

aynı şekilde değişim gösterdiği için sadece bu değerlerin gösterilmesi yeterli bulunmuştur.

Çizelge 3.12: Sürtünmesiz temas ve  $\mu=0,7$  sürtünme katsayısına sahip temas için maksimum eşdeğer gerilme sonuçları.

Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Sürtünmesiz Temas	1329,7	1215,0	1415,5	1677,0	1733,5
Sürtünmeli Temas ( $\mu=0,7$ )	1143,0	1045,0	1205,0	1421,5	1505,4

Bu iki çelik arasındaki sürtünme katsayısıyla alakalı kesin bir değer teorik olarak söz konusu olmadığı ve deneysel olarak da hesaplanmadığı için  $\mu=0,3, 0,5, 0,7$  değerleri incelenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi sonlu elemanlar analizi sonuçları da aynı yönde olup sürtünme katsayısı düştükçe oluşan gerilme değerleri artmış dolayısıyla ömür değerleri azalmıştır. Sonuçlar çizelgeler halinde gösterilmiştir. Bu değerler yine 0,5 mm sağ taraftaki noktalarda oluşan değerlerin ortalaması alınarak (durum1) elde edilmiştir.

Çizelge 3.13: Ortalama Eşdeğer Gerilme Değerleri ( $\mu=0,5$ )

Ortalama Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer gerilme( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	503,6	511,2	495,8	469,8	460,1
Eşdeğer gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	426,5	396,7	429,1	441,5	455,1

Çizelge 3.14: Ortalama Normal Gerilme Değerleri ( $\mu=0,5$ ).

Ortalama Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Normal Gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	491,7	508,4	486,6	482,8	473,0
Normal Gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	429,4	396,7	432,1	393,3	461,2



Durum 1'deki noktaların ortalaması alınarak hesaplanan ömür değerleri için ise yine hem eşdeğer hem de normal gerilme kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.15: Ortalama Ömür Değerleri ( $\mu=0,5$ )

Ömür Değerleri (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer gerilme	20000	18807	21258	27043	29575
Normal gerilme	22510	19710	24106	24239	26422

$\mu=0,3$  alınarak elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.16-17-18 'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.16: Ortalama Eşdeğer Gerilme Değerleri ( $\mu=0,3$ )

Ortalama Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer gerilme( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	526,0	536,0	521,4	494,1	484,2
Eşdeğer gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	445,5	416,0	451,3	464,2	479,0

Çizelge 3.17: Ortalama Normal Gerilme Değerleri ( $\mu=0,3$ ).

Ortalama Gerilme (MPa)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Normal Gerilme ( <i>Düğüm Noktalarında</i> )	513,6	533,0	511,8	507,7	497,8
Normal Gerilme ( <i>Elemanlarda</i> )	448,5	416,0	454,0	468,0	419,6

Çizelge 3.18: Ortalama Ömür Değerleri ( $\mu=0,3$ ).

Ömür Değerleri (Çevrim)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Boyutu				
	1mm	0,75mm	0,50mm	0,40mm	0,30mm
Eşdeğer Gerilme	16745	15504	17361	21868	23788
Normal Gerilme	18775	16227	19514	19640	21297

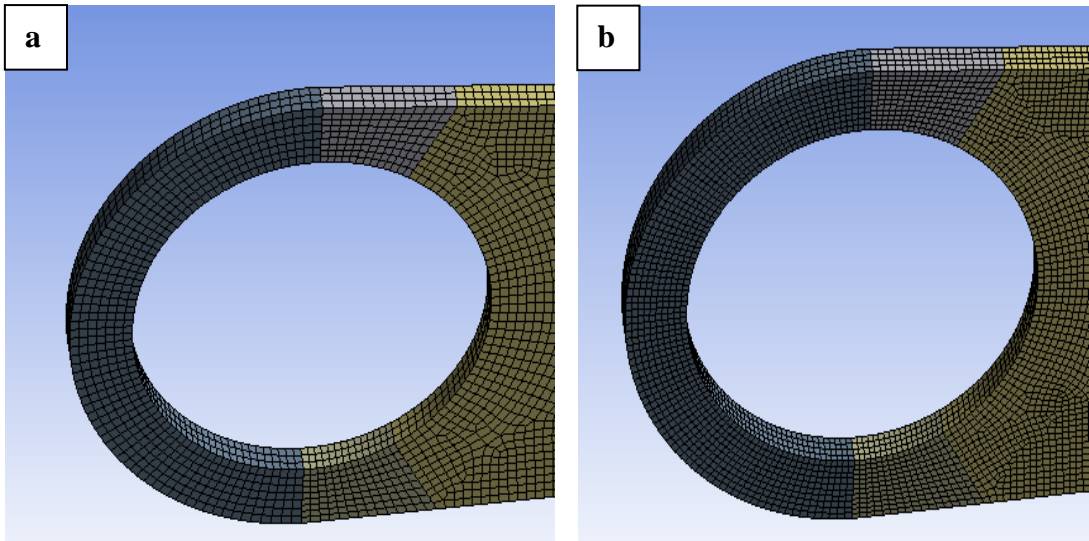
Sürtünme katsayısına göre çözümler incelenirse  $\mu=0,3$  için hesaplanan değerler test sonuçlarının olduğu aralıktadır. Bir sonraki aşama ise en az ne kadar eleman kullanmamız gerektiğidir. Bu kısımda önemli bir diğer nokta ise bu analizlerin tamamlanma süreleridir. Her zaman yeterli bilgisayar kapasitesi ve zaman sağlanamayabilir. Belirtilen eleman boyutuna sahip analizlerin tamamlanma süreleri Çizelge 3.19’da gösterilmiştir. Burada çözüm yapısında kullanılan elemanın boyutunun yerine eleman sayısı gösterilmiştir.

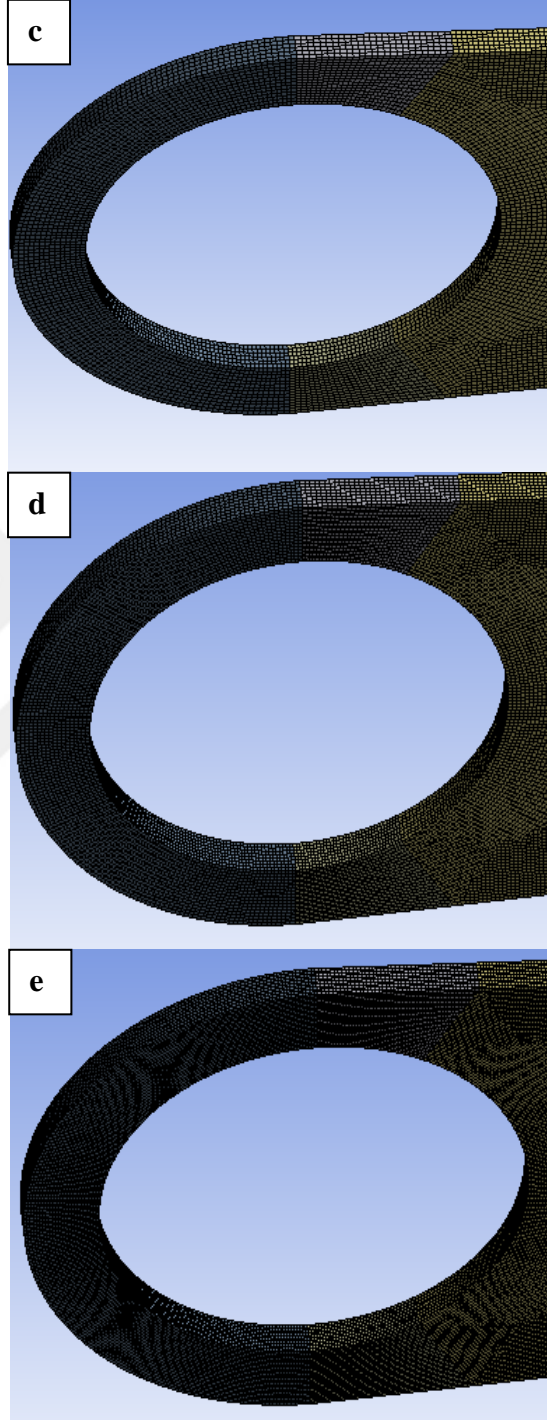
Çizelge 3.19: Sürtünme katsayısı  $\mu=0,3$  alınarak yapılan analizlerin tamamlanma süresi.

Geçen Süre (dakika)	Çözüm Ağ Yapısında Kullanılan Eleman Sayısı				
	27888	66040	217614	452684	996570
$\mu=0,3$	5,5	13,9	67,9	174,6	272,7

Test sonuçlarının ortalamasına (17597 çevrim) oldukça yakın değer olan 217614 eleman, hem çözüm ağı yapısı olarak oldukça düzgün hem de süre olarak da kabul edilebilecek seviyede olduğu için bu sayıda eleman kullanmanın yeterli ve doğru olduğu sonucuna varılmıştır.

Beş duruma ait çözüm ağı yapıları ise Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Gerilmenin yüksek olduğu kritik bölgedeki ağ yapısını göstermek yeterli görülmüştür.

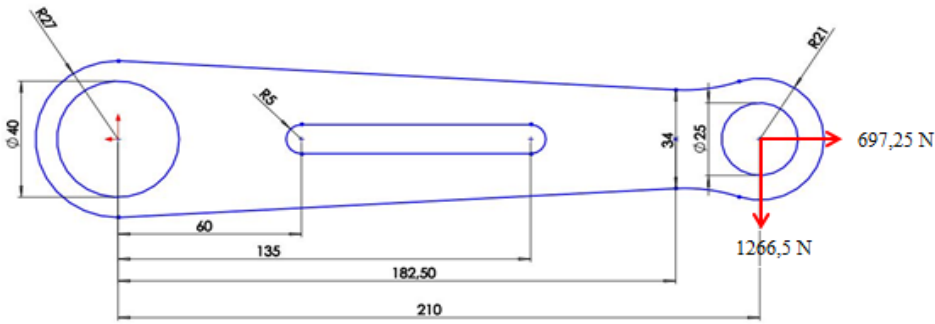




Şekil 3.7: Çözüm ağ yapıları (mesh structure) eleman boyutu büyükten küçüğe a,b,c,d,e

#### 4 OTOMOBİL TORK KOLUNUN KÜTLESİNİN VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEMESİ

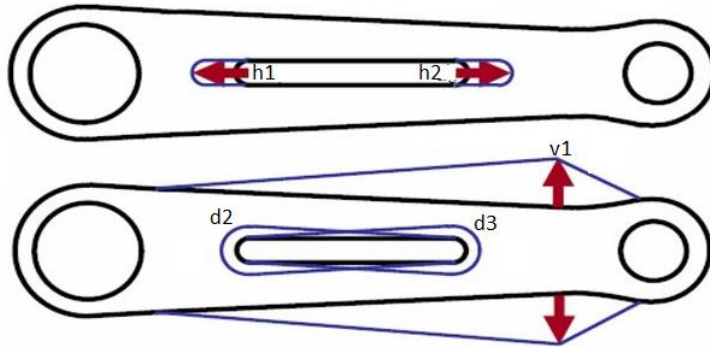
Otomobil tork kolunun yorulma analizlerinin testlerle doğrulaması yapıldıktan sonraki aşama, tork kolunun kütlelerinin eniyilenmesidir. Tork kolunun başlangıç geometrisi ve üzerindeki yüklemeler Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Tork kolu başlangıç geometrisi ve yüklemesi ( geometrik ölçüler mm cinsindedir.)

Tork kolu Şekil 4.1’de gösterildiği gibi tekerleklerden gelen kuvvetlerin etkisindedir. Ortadaki kesik kütle azaltılmak için tasarlanmıştır. Sol taraftan ise silindirik bir mil şasiye sabitlenmiştir. Dolayısıyla sol taraftaki delik üzerinde sabit sınır koşulu (*fixed boundary condition*) tanımlanmıştır.

Bir eniyileme problemindeki ilk aşama tasarım değişkenlerinin belirlenmesidir. Bu probleme ait tasarım değişkenleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Tasarım değişkenleri

Burada h1 ve h2 ortada bulunan deliklerin sol taraftaki deliğin merkezine olan yatay uzaklıklar, d2 ve d3 bu deliklerin yarıçapıdır. v1 değişkeni ise tork kolunun dış hatlarını tanımlayan bir şekil parametresidir. Tasarım değişkenlerinin başlangıç değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Tasarım değişkenlerinin başlangıç değerleri.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)
h1	60
h2	135
d2	5
d3	5
v1	10

Eniyileme prosesinin sonraki adımı ise problemin Denklem (2.10)’da gösterildiği gibi matematiksel tanımlamasının yapılmasıdır. Tork kolunun eniyilemesi matematiksel olarak Denklem (4.1)’de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 &\min \quad \text{Kütle } (h1, h2, d2, d3, v1) \\
 &\text{öyle ki} \quad \text{Mak. eşdeğer gerilme } (h1, h2, d2, d3, v1) - \sigma_{bt} \leq 0 \quad (4.1) \\
 &\quad \quad \quad (2N_f)_{bt} - \text{Yorulma ömrü } n_f (h1, h2, d2, d3, v1) \leq 0
 \end{aligned}$$

Burada  $\sigma_{bt}$  başlangıç tasarıma ait maksimum eşdeğer gerilmedir ve 319,1 MPa’dır.  $(2N_f)_{bt}$  ise başlangıç tasarımın yorulma ömrü olan 78068 çevrime eşittir. Daha önce de belirtildiği üzere eniyileme işlemleri tork kolunun test şartlarından farklı olan çalışma koşulları altında gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla başlangıç tasarım için belirtilen eşdeğer gerilme ( $\sigma_{bt}$ ) ve yorulma ömrü  $((2N_f)_{bt})$  değeri çalışma sınır koşulları altında hesaplanmıştır. Tork kolunun başlangıç kütlesi ise 0,1966 kg’dır. Bu değerler ANSYS Workbench’te yapılan yorulma analizi sonucu elde edilmiştir. Tasarım değişkenleri h1, h2, d2, d3, v1’dir. Denklem (4.1)’de gösterildiği gibi, problem iki farklı kısıta sahiptir. İlk kısıt maksimum eşdeğer gerilmedir. İkinci kısıt ise, değişken yüklemeler altındaki tork kolunun yorulma ömrüdür. Problem kısaca; başlangıç tasarımından daha az gerilmeye ve daha yüksek yorulma ömrüne sahip daha hafif en iyi tasarımı elde etmek şeklinde özetlenebilir.

Yöntem anlatılırken belirtildiği gibi problemin eniyilemesi vekil modeller kullanılarak yapılmıştır. Vekil model oluşturulurken ilk adım deney tasarımıdır. Deney tasarımı oluşturmaktaki amaç, tasarım uzayında mümkün olduğunca az nokta kullanarak maksimum miktarda bilgi edinmektir. Literatür kısmında bahsedildiği üzere birçok deney tasarımı yöntemi vardır ve deney tasarım yöntemi seçimi oluşturulan vekil modelin doğruluğunda önemli rol oynamaktadır [55].

Vekil model oluştururken kullanılacak deney tasarımları, deneylerle ya da bu çalışmada olduğu gibi sonlu elemanlar analizi programları gibi benzetim programları kullanarak elde edilebilir. Deney yaparak elde edilen noktalarla deney tasarımı oluşturulurken genel olarak klasik yöntemlerden faktöriyel tasarımlar kullanılır. Deney tasarımı oluştururken yüksek doğruluk derecesine sahip analizler kullanılacaksa çoğunlukla oldukça popüler yaklaşımlardan biri olan Latin hiperküp örnekleme gibi uzay doldurma teknikleri seçilir [56].

Deney tasarımı yöntemi olarak Latin hiperküp örnekleme seçilmiştir. Tasarım uzayını oluşturacak bu noktalar MATLAB'da *lhsdesign* komutuyla elde edilmiştir. Bu örneklem noktalarının belirlenmesinden sonra bu noktalarda ANSYS Workbench kullanılarak yorulma analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile örneklem noktalarındaki amaç ve kısıt fonksiyonlarının değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan tasarım değişkenleri ile amaç ve kısıt fonksiyonları arasında matematiksel ilişkiyi kuracak olan vekil model seçimi ise eniyileme prosesinin önemli bir diğer noktasıdır.

Eniyilemede kullanılacak vekil model için yanıt yüzey yöntemi ve kriging yöntemi üzerinde çalışılmıştır. İlk aşamada 50 örneklemden oluşan deney tasarımı oluşturulmuş, bu deney tasarımı kullanılarak yanıt yüzey ve Kriging yöntemleriyle tahminler yapılmıştır. Oluşturulan 50 örneklem Ek.1'de gösterilmiştir. Tasarım değişkenleri için belirlenen aralıklar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Tasarım değişkenlerinin başlangıç değerleri tork kolunun başlangıç tasarımındaki değerleridir. Tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar belirlenirken; tork kolunun geometrisini bozmadan, amaç fonksiyonunda maksimum ölçüde azaltma sağlamak amaçlanmıştır.

Çizelge 4.2: Tasarım değişkenlerinin başlangıç aşamada belirlenen geniş alt sınır ve üst sınır değerleri.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h1	60	40	80
h2	135	108	162
d2	5	3	10
d3	5	3	10
v1	10	7	18

Model doğrulama metriği olarak karekök ortalama hata karesi (*RMSE*) ve ortalama mutlak hata (*MAE*) incelenmiştir. Hata metrikleri iki vekil model için de çapraz doğrulama kullanılarak hesaplanmıştır. Latin hiperküp deney tasarımı kullanarak amaç fonksiyonu ve iki kısıt fonksiyonu için oluşturulan modellerin hata değerleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan karekök ortalama hata karesi (KOHK) ve ortalama mutlak hata (OMH) değerleri.

	KOHK ( <i>RMSE</i> )		OMH ( <i>MAE</i> )	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	17,5E-07	134,0E-07	6,46E-07	102,0E-05
Gerilme	110,6	112,4	65,9	69,4
Ömür	4,08E+04	4,63E+04	2,73E+04	3,54E+04

Oluşturulan örneklem noktalarında hesaplanan kütle, gerilme ve ömür fonksiyonlarına ait ortalamaların ve bu fonksiyonların değiştiği aralıklar (*maksimum-minimum*) Çizelge 4.4’te gösterilmiştir

Çizelge 4.4: Örneklem noktalarında hesaplanan amaç ve kısıt fonksiyonlarının ortalama ve aralık değerleri.

	Ortalama	Aralık
Kütle (kg)	0,1784	0,0861
Gerilme (MPa)	499,8	2178,0
Ömür (çevrim)	71167	434832

Bir seri için hesaplanan KOHK ve OMH metriklerin normalizesi için Denklem (4.1) de gösterilen eşitlikler kullanılabilir [57].

$$(NKOHK)_{AN} = \frac{KOHK}{y_{mak}-y_{min}}$$

$$(NKOHK)_{ON} = \frac{KOHK}{\bar{y}} \quad (4.1)$$

$$(NOMH)_{AN} = \frac{OMH}{y_{mak}-y_{min}}$$

$$(NOMH)_{ON} = \frac{OMH}{\bar{y}}$$

Burada NKOHK normalize edilmiş karekök ortalama hata karesi, NOMH ise normalize edilmiş ortalama mutlak hatadır. AN alt indisi aralıkla normalize edilmiş hali için, ON ise ortalama ile normalize edilmiş hali için kullanılmıştır. Denklem (4.1)'den anlaşılacağı üzere bir seri için hesaplanan hata metriklerinin normalizesi için o serinin ortalama değeri ( $\bar{y}$ ) veya serinin değiştiği aralık ( $y_{mak} - y_{min}$ ) kullanılabilir [57]. Hata metriklerinin normalizesi için iki değer de kullanılmıştır. Sonuçlar yüzde olarak Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	9,80E-04	75,2E-04	3,62E-04	57,0E-04
Gerilme	22,1	22,5	13,2	13,9
Ömür	57,4	65,0	38,3	49,8

Çizelge 4.6: Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	20,3E-04	156,0 E-04	7,5E-04	118,0E-04
Gerilme	5,1	5,2	3,0	3,2
Ömür	9,4	10,6	6,3	8,2



Normalize edilmiş hatalar incelendiğinde modellerin tahminin iyi olmadığı açıkça görülmektedir. 50 örnekleme oluşturulan iki vekil modelin iyileştirilmesi için 50 adet daha örnekleme oluşturulmuş, toplamda 100 örneklemden oluşan deney tasarımıyla tekrar vekil model kurulmuştur. 100 örneklemden oluşan deney tasarımı Ek.2’de gösterilmiştir.

100 örnekleme kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey vekil modellerinin amaç ve iki kısıt fonksiyonunu tahmini için hesaplanmış ve normalize edilmiş hatalar ise Çizelge 4.7 ve 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7: 100 örnekleme kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	12,5E-06	6690,0E-06	4,26E-06	5250,0E-06
Gerilme	7,1	20,4	3,3	12,7
Ömür	33,6	63,2	18,5	45,0

Çizelge 4.8: 100 örnekleme kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	25,6E-06	1,37E-02	8,75E-06	1,08E-02
Gerilme	1,6	4,6	0,8	2,9
Ömür	4,9	9,3	2,7	6,6

100 örnekleme ile oluşturulan vekil modellerin doğrulanması için hazırlanan çizelgeler incelendiğinde hata metriklerinin aralıkla normalize edilmiş hallerinin daha iyi olduğu görülür fakat iki modelin de özellikle kısıt fonksiyonlarını tahmin ederken başarılı olduğu söylenemez. Bu modelleri iyileştirmek adına yapılacak bir başka seçenek ise, çok geniş aralıkta değişen gerilme ve ömür değerlerinin değişim aralıklarını daraltmaktır. Bunu yapmanın yollarından biri ömür ve gerilim değerlerinin kendileri yerine logaritmik değerlerini almaktır. İki modelin de kütleyi oldukça iyi tahmin ettiği görülmektedir. Dolayısıyla değiştirilen sadece kısıt

fonksiyonlardır. Oluşturulmuş 100 örneklem için iki kısıt fonksiyonunun onluk logaritmik değerleri alınmış ve tekrar iki vekil model yöntemi de incelenmiştir. Bu aşamada normalize etmek için kullanılacak logaritmik gerilme ve logaritmik ömür fonksiyonlarının ortalama ve aralık değerleri ise Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9: Örneklem noktalarında hesaplanan amaç ve kısıt fonksiyonlarının ortalama ve aralık değerleri.

	Ortalama	Aralık
Kütle	0,1784	0,0861
Logaritmik Gerilme	2,639	1,016
Logaritmik Ömür	4,322	3,987

100 örneklem kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey vekil modellerinin amaç ve logaritmik iki kısıt fonksiyonunu tahmini için hesaplanmış ve normalize edilmiş hatalar ise Çizelge 4.10 ve 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10: 100 örneklem ve logaritmik kısıt fonksiyonları kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin ortalama ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	1,25E-05	669,0E-05	0,426E-05	525,0E-05
Logaritmik Gerilme	0,4	0,6	0,3	0,4
Logaritmik Ömür	1,3	1,5	0,9	1,0

Çizelge 4.11: 100 örneklem ve logaritmik kullanılarak oluşturulan Kriging ve yanıt yüzey yöntemi için hesaplanan hata metriklerinin aralık ile normalize edilmiş hali.

	NKOHK (%)		NOMH (%)	
	Kriging	YYY	Kriging	YYY
Kütle	25,6E-06	1,37E-02	8,75E-06	1,08E-02
Logaritmik Gerilme	1,1	1,6	0,7	1,2
Logaritmik Ömür	1,5	1,6	1,0	1,1

Hem aralık hem de ortalama ile normalize edilmiş sonuçlar incelendiğinde, kısıt fonksiyonlarının logaritmik değerlerini almak iki model için de daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tork kolunun kütle eniyilemesinde kullanılacak vekil modeller oluşturulduktan sonra, eniyileme işlemi iki vekil model için de yapılmıştır. Eniyilemede MATLAB'ın kısıtlı problemlerin eniyilenmesi için kullanılan yöntem olarak ardışık karesel programlamayı temel alan *fmincon* fonksiyonu kullanılmıştır. Bu komut içerisinde birçok algoritmayı kullanmaktadır. Eşitsizlik kısıtlarının var olduğu eniyileme problemlerinde sıklıkla kullanılan iç nokta (*interior-point*) algoritması seçilmiştir. Bu algoritma ardışık karesel programlama (SQP) adımlarını güvenli bölgede tutar [58].

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{öyle ki} \quad & h(x)=0 \\ & g(x)\leq 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

burada  $h(x)$  eşitlik kısıtları,  $g(x)$  eşitsizlik kısıtıdır. Orijinal hali Denklem (4.2)'deki gibi olan eniyileme problemi iç nokta yönteminde Denklem (4.3)'de gösterilen hale getirilir.

$$\begin{aligned} \min_{x,s} \quad & f(x) - \mu \sum_{i=1}^m \ln s_i \\ \text{öyle ki} \quad & h(x)=0 \\ & g(x)+s=0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

burada  $\mu$  bariyer parametresidir ve  $\mu > 0$ 'dır ve  $s$  serbestlik değişkenidir (*slack variable*) yine sıfırdan büyük olduğu kabul edilir [56].

Kısıt fonksiyonlarının logaritmik değerlerini kullanarak oluşturulan iki vekil model de en iyileme için kullanılmıştır. Eniyileme yapılırken tasarım değişkenleri için belirlenen aralıkta (bkz. Çizelge 4.2) toplam 50 adet başlangıç noktası seçilmiş ve hepsini kullanarak 50 eniyileme problemi çözülmüştür. Elde edilen optimum tasarımlardan amaç fonksiyonunun en çok azaldığı en iyi çözüm seçilmiştir. En iyi çözümün doğrulaması için ise tezin ilk aşamasında yorulma ömrünü oldukça iyi tahmin ettiği gösterilen ANSYS Workbench'in yorulma analizi kullanılmıştır. Eniyileme hem oluşturulan 50 örneklem için hem de 100 örneklem için yapılmıştır.

İki deney tasarımı (50,100 örneklem) kullanılarak oluşturulan YYY ile elde edilen en iyi çözümlere ait sonuçlar Çizelge 4.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.12: Tasarım değişkenlerinin başlangıçtaki ve YYY vekil modeli kullanılarak elde edilen en iyi çözümdeki değerleri.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	En iyi Çözüm (mm)	
		50 Örneklem	100 örneklem
h1	60,0	40,0	40,0
h2	135,0	113,6	115,5
d2	5,0	10,0	10,0
d3	5,0	4,7	4,5
v1	10,0	18,0	18,0

Vekil modelin tahmini ile ANSYS Workbench yorulma analizi sonuçları ise Çizelge 4.13’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.13: YYY kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	50 Örneklem			100 Örneklem		
	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle	0,1465	0,1464	0,1	0,1462	0,1460	0,1
Logaritmik Gerilme	2,503924	2,442981	2,5	2,501187	2,443795	2,3
Logaritmik Ömür	4,955548	5,209917	4,9	4,892483	5,205583	6,0
Gerilme	319,1	277,3	15,1	318,0	278,0	14,3
Ömür	90271	162150	44,3	78069	160540	51,4

Kriging vekil model kullanılarak elde edilen en iyi çözüme ait sonuçlar Çizelge 4.14'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.14: Tasarım değişkenlerinin başlangıçtaki ve Kriging vekil modeli kullanılarak elde edilen en iyi çözümdeki değerleri.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	En iyi Çözüm (mm)	
		50 Örneklem	100 Örneklem
h1	60,0	40,0	40,0
h2	135,0	113,0	116,0
d2	5,0	10,0	10,0
d3	5,0	5,0	4,4
v1	10,0	18,0	18,0

Vekil modelin tahmini ile ANSYS Workbench yorulma analizi sonuçları ise Çizelge 4.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15: Kriging yöntemi kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	50 Örneklem			100 Örneklem		
	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle	0,1461	0,1462	0,1	0,1463	0,1459	0,2
Logaritmik Gerilme	2,503927	2,445604	2,4	2,496988	2,442981	2,2
Logaritmik Ömür	4,921101	5,195927	5,3	4,892483	5,20991	6,1
Gerilme	319,1	279,0	14,3	314,0	277,3	13,2
Ömür	83388	157010	46,9	78069	162178	51,9

Logaritmik tabanda hatalar oldukça az görünse de dönüşüm yapıldığında gerilme ve ömür değerlerindeki hatalar oldukça fazladır. Dolayısıyla gerilme ve ömür fonksiyonlarının logaritmik değerlerini kullanmak düşünüldüğü kadar iyi bir sonuç vermemiştir.

Bu aşamadan sonra tasarım değişkenlerinin aralıklarını Çizelge 4.2'deki gibi geniş tutmak yerine dar bir aralıkla başlayıp kademeli optimizasyon yapmaya karar verilmiştir. Tasarım değişkenleri için birinci aşamada belirlenen aralık Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16: Birinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h1	60	48	72
h2	135	122	148
d2	5	4	6
d3	5	4	6
v1	10	8	12

Belirlenen aralıkta 50 örneklem oluşturulmuştur. Oluşturulan örneklem Ek.3'te gösterilmiştir. Oluşturulan örneklerle iki vekil model oluşturulmuş ve yine 50 başlangıç noktası kullanılarak eniyileme işlemi yapılmıştır.

YYY kullanılarak birinci aşamada elde edilen optimum sonuç Çizelge 4.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17: Birinci aşama YYY eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	49,6
h2	122,0
d2	6,0
d3	5,4
v1	12,0

İlk aşamada bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18: Birinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1846	0,1836	0,5
Gerilme (MPa)	319,1	318,2	0,3
Yorulma Ömrü (çevrim)	78068	79228	1,5

Kriging vekil modelle elde edilen en iyi çözüm ise Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19: Birinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	48,3
h2	122,0
d2	6,0
d3	5,3
v1	12,0

İlk aşamada Kriging vekil modelle bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20: Birinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1845	0,1833	0,6
Gerilme (MPa)	319,0	314,1	1,6
Yorulma Ömrü (çevrim)	78072	84693	7,8

Sonuçlar incelendiğinde YYY kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahminleri daha doğru iken Kriging vekil modelle eniyileme sonucu amaç fonksiyonu daha çok azaltılmıştır. Elde edilen en iyi çözüme bakıldığında ise bulunan en iyi çözümün geometrik sınır değerlere dayandığı görülmektedir. Dolayısıyla elde edilen en iyi çözüm etrafında tasarım değişkenlerinin sınırları değiştirilerek amaç fonksiyonunu

daha fazla azaltmanın mümkün olabileceği görülmüştür. Başlangıç tasarımı olarak birinci aşamada elde edilen en iyi çözümler dikkate alınıp bu çözüm etrafında tekrar deney tasarımı yapılmıştır. İkinci aşamada kullanılan alt ve üst sınır değerleri Çizelge 4.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21: İkinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h1	48,0	43,0	53,0
h2	122,0	108,0	132,0
d2	6,0	4,0	8,0
d3	5,2	4,0	6,0
v1	12,0	9,0	15,0

Çizelge 4.21’de gösterilen aralıkta oluşturulan örneklem noktaları Ek.4’te gösterilmiştir. Yine bu aralıklarda rastgele oluşturulan 50 başlangıç noktasıyla eniyileme yapılmıştır. YYY kullanılarak birinci aşamada elde edilen optimum sonuç çizelge 4.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22: İkinci aşama YYY eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	43,0
h2	115,5
d2	8,0
d3	5,3
v1	15,0

İkinci aşamada bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.23’de gösterilmiştir.



Çizelge 4.23: İkinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1658	0,1650	0,4
Gerilme (MPa)	319,0	316,8	0,7
Yorulma Ömrü (çevrim)	81180	80988	0,2

Kriging vekil modelle elde edilen en iyi çözüm ise Çizelge 4.24'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24: İkinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	43,0
h2	114,3
d2	8,0
d3	5,5
v1	15,0

İkinci aşamada Kriging vekil modelle bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.25'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.25: İkinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1662	0,1647	0,9
Gerilme (MPa)	319,0	317,1	0,6
Yorulma Ömrü (çevrim)	85057	80620	5,5

Sonuçlar incelendiğinde ilk aşamada olduğu gibi yine YYY kullanılarak oluşturulan vekil modelin tahminleri daha doğru iken Kriging vekil modelle eniyileme sonucu amaç fonksiyonu daha çok azaltılmıştır. İki vekil model için en iyi çözümler incelendiğinde h1,d2 ve v1 tasarım değişkenlerinin yine sınırlarda olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bulunan en iyi çözüm etrafında tekrar bir eniyileme yapılabilir. İkinci aşamada bulunan optimum tasarımlar etrafında sınıra dayanan tasarım değişkenler için alt ve üst sınırlar değiştirilerek tekrar bir deney tasarımı

oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Ek.5'te gösterilmiştir. Üçüncü aşama için belirlenen belirlenen alt ve üst sınır değerleri Çizelge 4.26'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.26: Üçüncü aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h1	43,0	41,0	45,0
h2	115,0	110,0	120,0
d2	8,0	6,0	10,0
d3	5,4	5,0	6,0
v1	15,0	13,5	16,5

Her aşamada olduğu gibi tekrar bu sınırlar içerisinde 50 örneklem kullanılarak iki vekil model oluşturulmuş, yine bu sınırlarda rastgele seçilen 50 başlangıç noktası için iki model de kullanılarak eniyileme yapılmıştır. YYY kullanılarak üçüncü aşamada elde edilen optimum sonuç Çizelge 4.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27: Üçüncü aşama YYY eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	41,0
h2	118,8
d2	10,0
d3	5,0
v1	16,5

Üçüncü aşamada bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.28: Üçüncü aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (k)	0,1515	0,1515	0,0
Gerilme (MPa)	319,1	320,0	0,3
Yorulma Ömrü (çevrim)	82320	77088	6,8

Kriging vekil modelle elde edilen en iyi çözüm ise Çizelge 4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29: Üçüncü aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	41,0
h2	118,8
d2	10,0
d3	5,0
v1	16,5

Üçüncü aşamada Kriging vekil modelle bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.30'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.30: Üçüncü aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1515	0,1515	0,0
Gerilme (MPa)	319,1	320,0	0,3
Yorulma Ömrü (çevrim)	83242	77088	7,9

Üçüncü aşama sonucunda hem Kriging hem de YYY aynı optimum sonucu bulmuştur fakat YYY ile oluşturulan modelin tahmini daha iyidir. Bulunan optimum tasarım sonuçları incelenirse tasarım değişkenlerinden h1,d2,d3, ve v1 yine belirlenen sınırlara dayanmıştır. Üçüncü aşamada bulunan optimum tasarımlar etrafında sınıra dayanan tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar değiştirilerek tekrar bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı Ek.6'da gösterilmiştir. Üçüncü aşama için belirlenen belirlenen alt ve üst sınır değerleri Çizelge 4.31'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.31: Dördüncü aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h1	41,0	38,0	44,0
h2	118,8	110,0	120,0
d2	10,0	9,0	11,0
d3	5,0	4,5	5,5
v1	16,5	15,5	18,0

Aynı prosedürler tekrar edilerek eniyileme yapılmıştır. YYY kullanılarak üçüncü aşamada elde edilen optimum sonuç çizelge 4.32’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.32: Dördüncü aşama YYY eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	38,0
h2	120,0
d2	11,0
d3	4,9
v1	18,0

Dördüncü aşamada bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.33’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.33: Dördüncü aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1404	0,1405	0,07
Gerilme (MPa)	319,0	315,2	1,2
Yorulma Ömrü (çevrim)	80280	83081	3,4

Kriging vekil modelle elde edilen en iyi çözüm ise Çizelge 4.34’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.34: Dördüncü aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h1	38,0
h2	120,0
d2	11,0
d3	4,9
v1	18,0

Dördüncü aşamada Kriging vekil modelle bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.35’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.35: Dördüncü aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata(%)
Kütle (kg)	0,1404	0,1405	0,1
Gerilme (MPa)	319,0	315,2	1,2
Yorulma Ömrü (çevrim)	84140	83081	1,3

Dördüncü aşama sonucunda ise yine iki vekil model de aynı optimum tasarımı bulmuştur. Tahminleri incelendiğinde kütle ve gerilme bakımından aynı doğruluk derecesinde tahmin yapmışken kısıtlardan biri olan yorulma ömrü için Kriging vekil modelin daha iyi tahmin ettiği görülmektedir. Elde edilen optimum sonuçlar incelendiğinde yine sınırlara dayanan tasarım değişkenleri olduğu görülmektedir. Fakat bunlarda h1,d2 ve v1 tasarım değişkenleri tork kolunun geometrisi göz önünde bulundurulduğunda daha fazla değiştirilememektedir.

Sınıra dayanan diğer tasarım değişkenleri için geometrik olarak değişim mümkün olacağı için h1, d2, v1 değişkenlerini bulunan en son değerlerde sabitleyip diğer 2 tasarım değişkeni ile eniyileme işlemine devam edilmiştir. Daha açık bir ifade ile eniyileme işlemi 5 tasarım değişkeni yerine 2 tasarım değişkeni ile devam edecektir.

Beşinci aşama için kullanılacak deney tasarımı için Çizelge 4.36'daki gibi alt ve üst sınır değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.36: Beşinci aşama tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları.

Tasarım Değişkeni	Başlangıç Değeri (mm)	Alt Sınır (mm)	Üst Sınır (mm)
h2	120,0	115,0	125,0
d3	4,9	4,5	5,0

Belirlenen aralıkta 2 tasarım değişkeni için 30 örnekleme oluşan deney tasarımı oluşturulmuş (bkz. Ek.7), yine bu aralıkta toplamda rastgele 20 başlangıç noktası seçilmiş ve iki vekil modelle de eniyileme yapılmıştır. YYY kullanılarak beşinci aşamada elde edilen optimum sonuç çizelge 4.37'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.37: Beşinci aşama YYY eniyileme sonuçları

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h2	123,0
d3	4,5

Beşinci aşamada bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.38’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.38: Beşinci aşama yanıt yüzey vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1401	0,1401	0,00
Gerilme (MPa)	319,1	319,0	0,01
Yorulma Ömrü (çevrim)	78074	78194	0,20

Kriging vekil modelle elde edilen en iyi çözüm ise Çizelge 4.39’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.39: Beşinci aşama Kriging vekil modelin eniyileme sonuçları.

Tasarım Değişkeni	En iyi Çözüm (mm)
h2	122,3
d3	4,6

Beşinci aşamada Kriging vekil modelle bulunan en iyi tasarıma ait amaç ve kısıt fonksiyonlarının vekil model tarafından tahmin ettiği değerleri ile ANSYS Workbench analizi sonuçları ise Çizelge 4.40’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.40: Beşinci aşama Kriging vekil modelin tahmini ve yorulma analizi sonuçları.

	Modelin Tahmini	Analiz Sonucu	Hata (%)
Kütle (kg)	0,1402	0,1402	0,00
Gerilme (MPa)	319,1	319,3	0,02
Yorulma Ömrü (çevrim)	78176	77794	0,50

İki vekil model için de elde edilen sonuçlar incelendiğinde tasarım değişkenleri beşinci aşamada artık sınıra dayanmamaktadır. İki modelin tahminlerindeki farklar hem amaç hem kısıt fonksiyonları için yüzde birin altındadır. İki vekil modelin de oldukça iyi tahmin yaptığı görülmüştür. ANSYS Workbench analiz sonuçları incelendiğinde Kriging modeli kullanarak elde edilen tasarımda kısıtların az da olsa ihlal edildiği görülür fakat YYY ile oluşturulan vekil modelin eniyileme sonuçlarında hem kısıtlar ihlal edilmemiş hem de kütle olarak daha fazla azaltmak mümkün olmuştur. Ayrıca dördüncü aşamadaki sonuçlar incelendiğinde kütle 0,1405 kg'dan sadece 0,1402 kg'a düşürülebilmıştır. Bu sonuçlar ışığında bu problem için en iyi tasarımın YYY kullanılarak elde edilmiş olduğuna karar verilmiştir. Eniyileme işleminin sonunda tork kolunun kütlesi %28,6 oranında azaltılmıştır. Tasarım değişkenlerinin, amaç fonksiyonu ve iki kısıt fonksiyonunun başlangıç tasarımdaki değerleri ile optimum tasarımdaki değerleri Çizelge 4.41'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.41: Başlangıç tasarım ve optimum tasarımın karşılaştırılması.

	Başlangıç Tasarım	Optimum Tasarım
h1 (mm)	60,0	38,0
h2 (mm)	135,0	123,0
d2 (mm)	5,0	11,0
d3 (mm)	5,0	4,54
v1 (mm)	10,0	18,0
Kütle (kg)	0,1966	0,1401
Gerilme (MPa)	319,1	319,0
Yorulma Ömrü (çevrim)	78068	78194

Aşama aşama yapılan eniyileme işlemlerini daha açık göstermek için bütün aşamaların sonuçları tek çizelge halinde Çizelge 4.42'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.42: Bütün aşamalara ait tasarım değişkenleri sınırları ve eniyileme sonuçları.

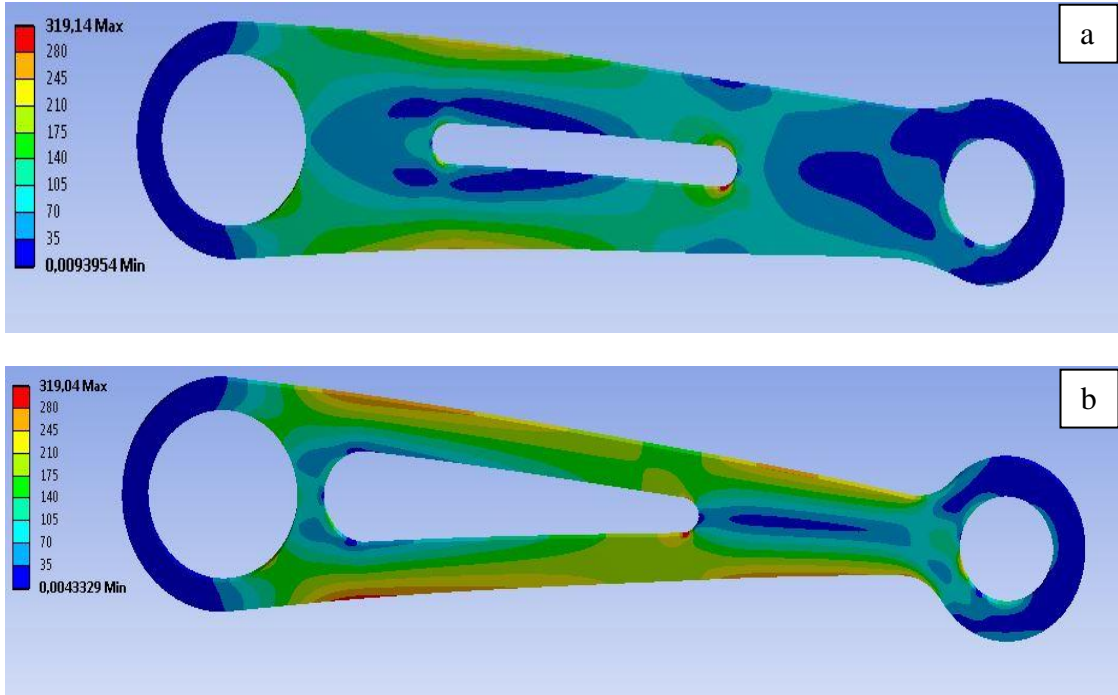
	1.Aşama	2.Aşama	3.Aşama	4.Aşama	5.Aşama
Tasarım Değişkenlerinin Alt ve Üst Sınırları					
[AS <sub>h1</sub> , ÜS <sub>h1</sub> ]	[48,72]	[43,53]	[41,45]	[38,44]	[38,38]
[AS <sub>h2</sub> , ÜS <sub>h2</sub> ]	[122,148]	[108,132]	[110,120]	[110,120]	[115,125]
[AS <sub>d2</sub> , ÜS <sub>d2</sub> ]	[4,6]	[4,8]	[6,10]	[9,11]	[11,11]
[AS <sub>d3</sub> , ÜS <sub>d3</sub> ]	[4,6]	[4,6]	[5,6]	[4,5,5,5]	[4,5,5]
[AS <sub>v1</sub> , ÜS <sub>v1</sub> ]	[8,12]	[9,15]	[13,5,16,5]	[15,5,18]	[18,18]
YYY Vekil Modelinin Eniyileme Sonuçları					
h1 (mm)	49,6	43,0	41,0	38,0	38,0
h2 (mm)	122,0	115,5	118,8	120,0	123,0
d2 (mm)	6,0	8,0	10,0	11,0	11,0
d3 (mm)	5,4	5,3	5,0	4,9	4,54
v1 (mm)	12,0	15,0	16,5	18,0	18,0
Kütle (Tahmin) (kg)	0,1846	0,1658	0,1515	0,1404	0,1401
Kütle (Analiz) (kg)	0,1836	0,1650	0,1515	0,1405	0,1401
Maksimum Gerilme (Tahmin) (MPa)	319,1	319,0	319,1	319,1	319,1
Maksimum Gerilme (Analiz) (MPa)	318,2	316,8	320,0	315,2	319,0
Yorulma Ömrü (Tahmin) (Çevrim)	78068	81180	82320	80280	78074
Yorulma Ömrü (Analiz) (Çevrim)	79228	80988	77088	83081	78194



Çizelge 4.43: Bütün aşamalara ait tasarım değişkenleri sınırları ve eniyileme sonuçları (devamı).

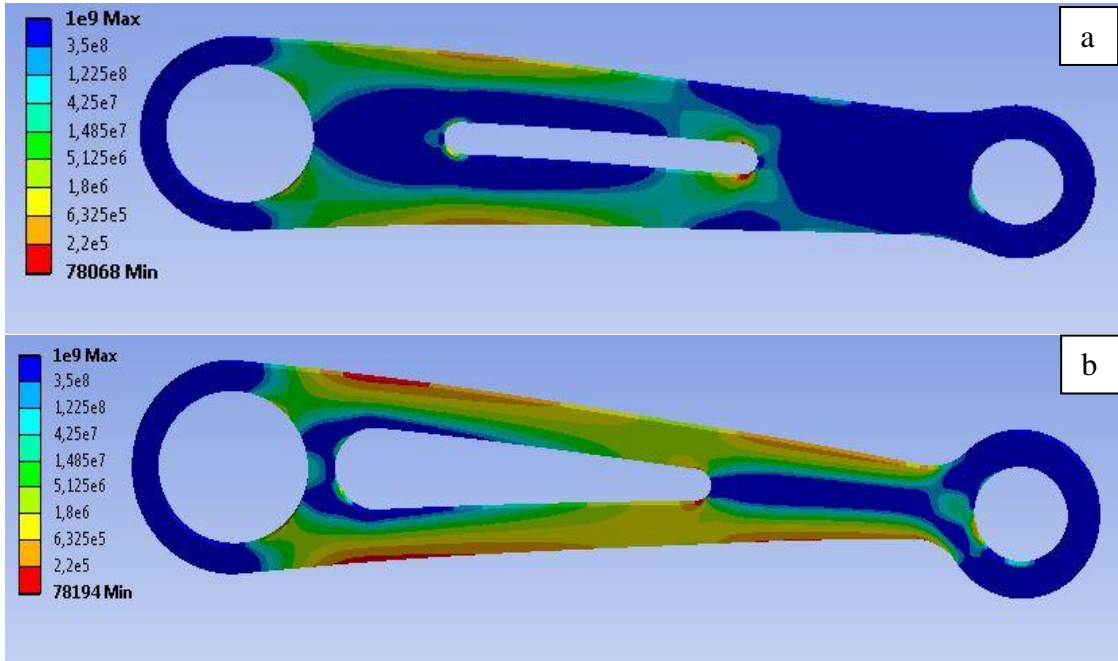
Kriging Vekil Modelinin Eniyileme Sonuçları					
h1 (mm)	48,3	43,0	41,0	38,0	38,0
h2 (mm)	122,0	114,3	118,8	120,0	122,3
d2 (mm)	6,0	8,0	10,0	10,0	11,0
d3 (mm)	5,3	5,5	5,0	4,9	4,6
v1 (mm)	12,0	15,0	16,5	18,0	18,0
Kütle (Tahmin) (kg)	0,1845	0,1662	0,1515	0,1404	0,1402
Kütle (Analiz) (kg)	0,1833	0,1647	0,1515	0,1405	0,1402
Maksimum Gerilme (Tahmin) (MPa)	319,0	319,0	319,1	319,0	319,1
Maksimum Gerilme (Analiz) (MPa)	314,1	317,1	320,01	315,2	319,3
Yorulma Ömrü (Tahmin) (Çevrim)	78072	85057	83242	84140	78176
Yorulma Ömrü (Analiz) (Çevrim)	84693	80620	77088	83081	77794

Başlangıç tasarımın ve optimum tasarımın eşdeğer gerilme dağılımları ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Eşdeğer gerilme dağılımı a) başlangıç tasarım b) optimum tasarım

Başlangıç tasarımın ve optimum tasarımın yorulma ömrü dağılımları ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Yorulma ömrü dağılımı a) başlangıç tasarım b) optimum tasarım



## 5 OPTİMUM TASARIMIN GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ

YYY vekil modeli kullanılarak elde edilen optimum tasarım için yapılan güvenilirlik tahminleri tezin bu kısmında anlatılmıştır.

Bir mühendislik sistemindeki belirsizlikler; geometrik özellikler, malzeme özellikleri veya yükleme koşullarından kaynaklanabilir. Güvenilirlik tahminine geçmeden önce sistemdeki belirsizlikleri oluşturan değişkenleri tanımlamak önemlidir. Ancak sistemi doğru bir şekilde ifade edebilecek vekil model oluşturmak; özellikle tork kolunun yorulma ömrü gibi geometrik özelliklere, malzeme özelliklerine ve yüklemelere karşı oldukça duyarlı bir sistem yanıtı için oldukça zordur. Daha önce yapılan yorulma analizlerinde, tork kolunun yorulma ömrünün malzeme özelliklerindeki ve gerilmeleri oluşturan yüklemelerdeki değişimlere karşı oldukça duyarlı olduğu görülmüştür. Güvenilirlik tahminleri için belirlenen rastgele değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Rastgele değişkenlerin ortalamaları, standart sapmaları ve dağılım tipleri.

Rastgele Değişkenler	Dağılım Tipi	Ortalama	Standart Sapma	Değişim Aralıkları
Yüklemeler				
F <sub>x</sub> (N)	Normal	348,625	34,8625	[244,452]
F <sub>y</sub> (N)	Normal	633,250	63,3250	[443,882]
Malzeme Özellikleri				
$\sigma'_f$	Lognormal	1543	123	[1174,1912]
b	Normal	-0,140	0,014	[-0,182,-0,098]
$\varepsilon'_f$	Lognormal	0,610	0,061	[0,427,0,793]
c	Normal	-0,570	0,057	[-0,700,-0,400]

Tork kolunun yorulma ömrü tahmini literatür kısmında detaylıca anlatıldığı üzere gerinim-ömür yöntemiyle yapılmıştır. Denklem (2.9)'dan anlaşılacağı üzere yorulma ömrü hesabı için dört adet malzeme özelliği gereklidir. Bu malzeme özellikleri için ortalama değerleri tork kolunun yapıldığı çeliğin değerleridir. Malzeme özelliklerine ait değişkenlik katsayısı için literatürde mevcut yorulma tabanlı güvenilirlik çalışmalarından faydalanılmıştır [59-61]. Rastgele değişkenlerin değişim aralığının alt ve üst değerleri için ortalama değerlerden standart sapmanın üç katı kadar uzaklaşmıştır.

Deterministik yöntemlerle tork kolunun ağırlığının eniyilenmesi yapılırken yatay ve düşey eksenlerdeki kuvvetler için güvenlik katsayısı olarak 2 kullanılmıştır. Bu koşulda optimum tasarımın yorulma ömrü 78194 çevrimdir. Güvenilirlik hesapları yapılırken kuvvetlerdeki belirsizlikler göz önünde bulundurulduğundan yüklemeler için güvenlik katsayısı kullanılmamıştır. Güvenilirlik hesaplarında tork kolu üzerindeki yüklemeler yatay ekseninde  $F_x = 348,625$  N ve düşey ekseninde  $F_y = 633,25$  N olarak alınmıştır. Bu yükleme koşulları tork kolunun yorulma ömrü 4.255.373 çevrim olarak hesaplanmıştır.

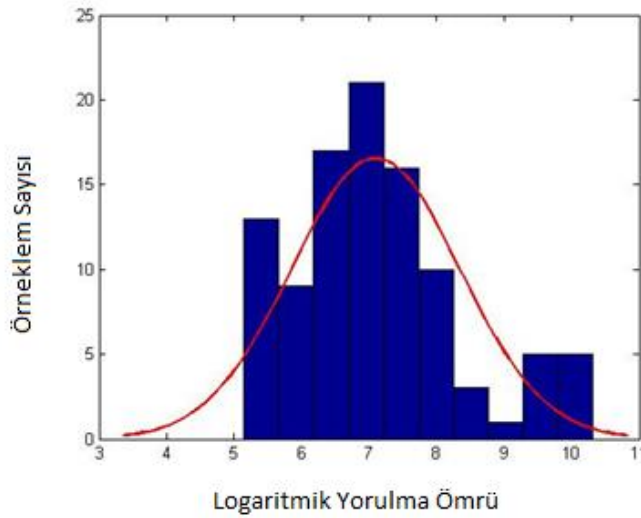
Tork kolunda hasar yorulmadan kaynaklandığından, problem için sınır durum fonksiyonu yorulma ömrü üzerinden Denklem (5.1)'deki gibi modellenmiştir.

$$g = \log(N_k) - \log(N) \quad (5.1)$$

Yorulma ömrü değerlerindeki saçılımı azaltmak maksadıyla ömür değerlerini logaritmik tabanda almak uygun görülmüştür. Denklem (5.1)'de  $N_k$  optimum tasarım için kritik ömür değeridir. Tork kolunun kritik ömür değeri belirlenirken; kuvvetlerdeki ve malzemedeki belirsizlikler göz önünde bulundurulsa da yorulmaya karşı tasarım yapılırken malzemenin üretim şekli, yüzey durumu, sıcaklığı, vb. gibi durumların da hesaba katılması gerekir [4]. Dolayısıyla bahsedilen durumları hesaba katmak için bir güvenilirlik katsayısı hesaplanır. Tork kolunun yorulma ömrü için üretim şekli, çalışma şartları gibi koşullar göz önünde bulundurularak; bu güvenlik katsayısı 0,78 olarak bulunmuştur. Bulunan bu güvenlik katsayısı kullanılarak güvenilirlik hesabı için kullanılacak kritik ömür değeri  $N_k = 0,78 * (4255373) = 3,319,190$  çevrim olarak hesaplanmıştır. N ise tasarımı yapılan parçanın ömür değeridir. Sistem için hasar durumu ise,  $g > 0$  koşuldur.

Yüksek güvenilirlik mertebelerinde olan mühendislik sistemlerinin güvenilirlik hesabı Monte Carlo gibi benzetim yöntemleri kullanarak hesaplanırken milyon mertebesinde analizlerin yapılması gerekebilir. Bu yüksek hesapsal maliyetten kurtulmak adına yorulma ömrü tahmini için vekil modeller kullanılabilir.

Yorulma ömrü tahmini için vekil model oluştururken 6 adet tasarım değişkeni cinsinden Çizelge 5.1’de gösterilen değişim aralıklarında 100 örneklem noktası oluşturulmuştur. Oluşturulan 100 örneklem için yorulma değerlerinin davranışını incelemek için bir histogram oluşturulmuştur. Oluşturulan histogram Şekil 5.1’de verilmiştir. Histogram oluşturulurken yorulma ömrü değerlerinin logaritmik değerleri alınmıştır.



Şekil 5.1: Yüz örneklemin yorulma ömrü değerlerinin histogramı.

Yorulma ömrünün genel yapısı incelendiğinde, lognormal dağılıma sahip olduğu söylenebilir [62]. Dolayısıyla yorulma ömrünün logaritmik tabandaki değerlerinin normal dağılıma sahip olması beklenir.

Şekil 5.1 incelendiğinde yorulma ömrü değerlerinde genel olarak düşük çevrimlerde bir yığılma olduğu görülebilir. Normal dağılması beklenen yorulma ömrü verilerinin sağa çarpık bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

Dağılımı normal olması beklenen verilerin normal dağılım göstermemesinin sebeplerinden biri aykırı değerler (*outlier*) olabilir [63]. Aykırı değerler veri setinin ortalamasının çok uzağında olan değerler olarak tanımlanabilir [64]. Aykırı değerler verilerin standart sapmasının artmasına, dağılımın şeklinin değişmesine sebep

olabilir. Ortalamadan uzakta gözlemlenen bu değerlerin aykırı olup olmadığını belirleyebilmek için, Grubbs, Dixon, Rosner, Walsh gibi birçok aykırı değer testleri vardır [65-66]. Bu testlerin çoğu az sayıda örneklem için veya az sayıda aykırı değer olduğu düşünülen durumlarda kullanılır.

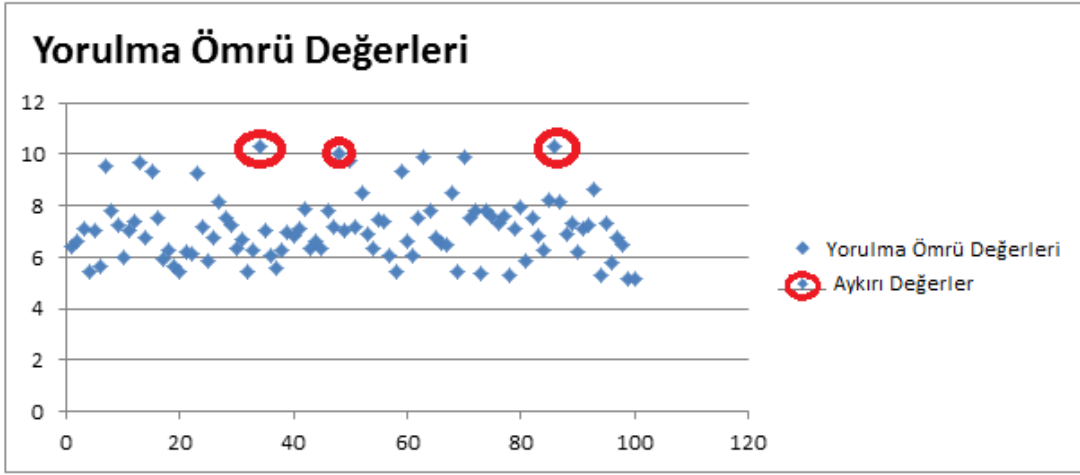
Aykırı değerlerin analizinde sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem ise çeyrek değerler genişliği (*interquartile range (IQR)*) testidir. Çok sayıda örneklemin olduğu durumlarda oldukça etkili bir şekilde kullanılan yöntemlerden biri olan IQR testi ilk olarak Tukey (1997) tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem çok çarpıklık göstermeyen dağılımlar için uygundur [67].

IQR testinin aşamaları şu şekildedir;

1. Veriler küçükten büyüğe doğru sıralanır.
2.  $Q_1$  sıralanan verilerin ilk çeyrekligi (%25) ve  $Q_3$  üçüncü çeyrekligi (verilerin ilk %75) bulunur.
3.  $IQR = Q_3 - Q_1$  çeyrek değerler genişliği hesaplanır.
4.  $Q_1 - (1,5 * IQR)$  değerinden daha küçük ve  $Q_3 + (1,5 * IQR)$  değerinden daha büyük değerler aykırı gözlemler olarak tanımlanır.

Yorulma ömrü dağılımı incelendiğinde çok fazla çarpıklığın olmadığı görülebilir. Ayrıca örneklem sayısının fazla olması sebebiyle, veri setinin aykırı değere sahip olup olmadığını incelemek için IQR testi kullanılmıştır.

Yüz örneklemden oluşan yorulma ömrü değerlerinin grafiği Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Yorulma ömrü değerlerinin logaritmik tabanda verildiği grafik incelendiğinde aykırı değerler olabileceği gözlemlenmiştir. Uygulanan IQR testi sonucu 3 adet aykırı değer saptanmıştır. Buradaki 3 adet aykırı noktanın çıkarılıp çıkarılmaması konusunda ise altı rastgele değişkenin alt ve üst sınırları incelenmiştir. Aykırı değerlerin çıkarılması bu sınırlardan taviz verilmesine sebep olmadığı için, başka bir deyişle tasarım uzayını küçültmediği için gözlemlenen aykırı değerlerin veri setinden çıkarılması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 5.2: Yüz örneklemin yorulma ömrü değerlerinin grafiksel gösterimi.

Eniyileme işlemlerinde olduğu gibi YYY ve Kriging vekil modelleri incelenmiştir. Kriging vekil modelin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Dolayısıyla güvenilirlik hesapları için Kriging vekil model kullanılmıştır. Oluşturulan vekil modelin doğrulaması çapraz doğrulama ile yapılmıştır ve doğrulama metriği olarak KOHK (*RMSE*) ve OMH (*MAE*) kullanılmıştır. Hataların normalizesi için de yine örneklem noktalarının yorulma ömrü yanıtlarının ortalama değerleri ve değişim aralığı kullanılmıştır. *NKOHK* normalize edilmiş karekök ortalama hata karesi, *NOMH* ise normalize edilmiş ortalama mutlak hatadır. *AN* alt indisi aralıkla normalize edilmiş hali için, *ON* ise ortalama ile normalize edilmiş hali için kullanılmıştır ve normalize edilmiş bu hata değerleri yüzde olarak hesaplanmıştır. Aykırı değerler atılmadan oluşturulan vekil modelin çapraz doğrulama hataları ve aykırı değerler atıldıktan sonra oluşturulan vekil modelin çapraz doğrulama hataları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 incelendiğinde aykırı değerlerin veri setinden çıkarılması sonucunda iyileşme görülse de hata metrikleri için ortalama ile normalize edilmiş değerleri göz önünde bulundurulduğunda yüzde hatalar oldukça yüksektir. Daha önce de belirtildiği gibi doğrusallıktan oldukça uzak olan yorulma ömrü tahmini gibi sistem yanıtlarında fazla tasarım değişkeni kullanılarak iyi tahminler yapan vekil model oluşturmak oldukça zordur.



Çizelge 5.2: Vekil modellerin yorulma ömrü tahminlerindeki çapraz doğrulama hataları.

Yorulma Ömrü Tahmini Hataları		
Hata Değerleri (%)	Aykırı Değerler Çıkarılmadan	Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra
$(NKOHK)_{ON}$	126,5	37,03
$(NOMH)_{ON}$	20,02	9,94
$(NKOHK)_{AN}$	2,38	1,62
$(NOMH)_{AN}$	0,38	0,43

Daha iyi bir vekil model oluşturmak için örneklem sayısı iteratif olarak artırılmıştır. Her aşamada yine verilerde aykırı değerlerin olup olmadığı incelenmiş, tasarım uzayının küçülmesine izin verilmeden aykırı gözlemler veri setinden çıkarıldıktan sonra vekil modeller oluşturulmuştur. İteratif olarak ilerlenen bu aşamada belirlenen hata metriklerinin ikisinde de (KOHK ve OMH) hem ortalama ile hem de aralıkla normalize edilmiş değerlerin yüzde 5'in altında olacak vekil modeli bulmak hedeflenmiştir. Çizelge 5.3'te bütün aşamalar özetlenmiştir.

Çizelge 5.3: Kriging vekil modelin yorulma ömrü tahminindeki çapraz doğrulama hataları.

İterasyonlar	Oluşturulan Örneklem Sayısı	Örnekleme Gözlemlenen Aykırı Değer Sayısı	Kriging Vekil Modelin Yorulma Ömrü Tahmini Hataları							
			Aykırı Değerler Çıkarılmadan Hatalar (%)				Aykırı Değerler Çıkarıldıktan Sonra Hatalar (%)			
			$(NKOHK)_{ON}$	$(NOMH)_{ON}$	$(NKOHK)_{AN}$	$(NOMH)_{AN}$	$(NKOHK)_{ON}$	$(NOMH)_{ON}$	$(NKOHK)_{AN}$	$(NOMH)_{AN}$
İterasyon 1	100	3	126,5	20,02	2,38	0,38	37,03	9,94	1,62	0,43
İterasyon 2	200	4	18,67	3,87	0,47	9,83E-02	18,67	3,87	0,47	9,83E-02
İterasyon 3	300	9	20,87	3,5	0,34	5,77E-02	17,56	3,09	0,39	8,76E-02
İterasyon 4	400	7	14,34	2,17	0,32	4,79E-02	12,28	2,25	0,36	6,60E-02
İterasyon 5	500	10	22,43	2,97	0,35	4,59E-02	14,2	1,92	0,36	4,86E-02
İterasyon 6	600	13	12,89	2,03	0,19	0,30	7,91	1,51	0,33	6,40E-02
İterasyon 7	700	9	17,34	1,79	0,18	1,84E-02	4,10*	0,8	0,36	7,77E-02

\* İterasyonlar  $(NKOHK)_{ON}$  hatası %5'in altına inene kadar devam etmiştir

Yorulma ömrünü hedeflenen doğrulukta (%5'in altında hata ile) tahmin edebilen vekil model yedinci iterasyonun sonucunda oluşturulmuştur. Oluşturulan bu vekil model için oluşturulan örneklem noktaları Ek 8'de gösterilmiştir.

Birçok rastgele değişkenin birbirine doğrusal olmayan şekilde bağlı olduğu durumlarda, güvenilirlik hesabını analitik yöntemlerle yapmak mümkün değildir. Tork kolunun yorulma ömrü doğrusallıktan oldukça uzaktır. Fiziksel deneylerin de mümkün olmadığı bu gibi durumlarda güvenilirlik hesabı için Monte Carlo Simülasyonları (MCS) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [68].

MC yönteminde, sistemin rastgele davranışlarının ve gerçek süreçlerin benzetimlerinde güvenilirlik indislerini tahmin eder. MC yönteminde örneklem sayısı  $N$  belirlendikten sonra ilk adım her değişken için  $N$  adet rastgele sayılar üretilmesidir. Rassal değişkenler her sayının gelme olasılığı aynı olan düzgün (*uniform*) dağılımdan seçilir. Daha sonrasında elde edilen bu rassal değişkenler ilgilenilen dağılıma (normal, lognormal vb.) taşınır. Oluşturulan her rassal değişken için sınır durum fonksiyonu  $g$  hesaplanır. Hesaplanan sınır durum fonksiyonlarının hasara uğrayıp uğramadığı incelenir. Güvenilirlik ve hasar olasılığı ise Denklem grubu (5.2) kullanılarak elde edilir.

$$R = \frac{N_g}{N}$$
$$P_f = \frac{N_h}{N} \quad 5.2$$

Burada  $R$  güvenilirlik,  $P_f$  hasar olasılığı,  $N_g$  hesaplanan  $N$  adet sınır durum fonksiyonu içinde güvenli olanların sayısı,  $N_h$  ise hasara uğrayanların sayısıdır.

Tork kolunun güvenilirliğinin hesabı için  $N=10^6$  adet rassal değişken oluşturulup sınır durum fonksiyonu hesaplanmıştır. Bu mertebede yorulma analizi yapmak mümkün olmadığından, sınır durum fonksiyonu hesabı için oluşturulan vekil model kullanılmıştır.

Tork kolunun güvenilirliği literatür kısmında detaylı olarak anlatılan kuyruk olasılığı modelleme yöntemi ile de hesaplanmıştır. Bu yöntem için ise 1000 adet örneklem kullanılmış ve eşik değeri 0,95 seçilmiştir. Oluşturulan örneklem noktalarında sınır durum fonksiyonu hesabı için yine Kriging vekil model kullanılmıştır. Hasar olasılığını Denklem (2.28) kullanarak hesaplamak için genelleştirilmiş Pareto dağılımının parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreleri bulmak için ise

en büyük olabilirlik kestirimi (*maximum likelihood estimation*) ve en küçük kareler regresyonu metodu (*least square regression method*) kullanılmıştır. Bu yöntemlerin detayları literatür kısmında verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Tork kolu optimum tasarımın güvenilirlik tahminleri.

Yöntem	Güvenilirlik
MCS	0,9991
Kuyruk Olasılığı Modelleme	
En Büyük Olabilirlik Kestirimi (ML)	0,9995
En Küçük Kareler Regresyonu Metodu (LS)	0,9990



## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında otomobilde arka süspansiyon sisteminin bir parçası olan tork kolunun ağırlık eniyilemesi ve güvenilirlik tahmini yapıldı. Eniyileme işlemleri vekil model kullanılarak yapıldı. Başlangıç değeri 0,1966 kg olan tork kolunun kütlesi %28,6 oranında azaltılarak 0,1401 kg'a düşürüldü. Elde edilen optimum tasarımın güvenilirlik tahmini Monte Carlo simülasyonu ve kuyruk olasılığı modeli kullanılarak gerçekleştirildi. Kuyruk olasılığı modellenmesinde kullanılan genelleştirilmiş Pareto dağılımı parametreleri ise en büyük olabirlik kestirimi ve en küçük kareler regresyonu yöntemiyle elde edildi. Bu üç yöntemle elde edilen güvenilirlik tahminlerinin birbiriyle tutarlı olduğu gözlemlendi. Monte Carlo simülasyonlarıyla güvenilirlik 0,9991 olarak hesaplanırken, dağılım parametrelerinin en büyük olabirlik kestirimi kullanılarak elde edilen kuyruk olasılığı modelinde 0,9995 olarak hesaplandı. Son olarak en küçük kareler regresyonuyla ise güvenilirlik 0,9990 olarak tahmin edildi.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak;

- Tork kolunun optimum tasarımına yorulma testleri yapılabilir.
- En iyileme işlemlerinde belirlenen tasarım değişkenlerine kalınlık eklenebilir.
- Tork koluna etkiyen yüklemeler için CARLOS otomobil standartları kullanılmış sabit genlikli çevrimsel yükleme şartlarında bütün işlemler gerçekleştirilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda, tork koluna etkiyen değişken genlikli yüklemeler altında problem incelenebilir.
- Güvenilirlik tahminlerinde sınır durum fonksiyonu, ömür üzerinden değil de hasar faktörü üzerinden modellenerek kümülatif hasar durumu incelenebilir.
- Ayrıca tork kolunun güvenilirlik tahmini çoklu kuyruk ortancası yöntemiyle [69] veya Markov Zinciri Monte Carlo yöntemiyle [70] hesaplanabilir.
- Tez çalışması boyunca yapılan işlemler oldukça fazla bilgisayar yükü gerektirmektedir. Bu çalışmalarda çoklu işlemciler kullanılarak paralel hesaplama yapılabilir. Paralel hesaplama ile performans artar, böylece problem daha kısa sürede çözülebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Kögmen, Z.**, Karayolu Taşımacılığının diğer taşımacılık modlarıyla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlar (Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi), Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı,2014
- [2] **Url-1** <http://www.nastyz28.com/forum/showthread.php?t=286114>
- [3] **Sanford, R.J.**, Principle of Fracture Mechanics, Prentice Hall, NJ, 2003.
- [4] **Budynas, R.G., Nisbett, J.K.**, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9<sup>th</sup> Edition, Mc Graww Hill, NY, 2011
- [5] **Bai, Y., Wei-Liang, J.**, Marine Structural Design, 2th Edition, Elsevier, Oxford, 2015
- [6] **05224G**, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, ASM International, Ohio,2008
- [7] **Anand L., Parks, D.M.**, 2004 Bahar Dönemi, Defect-Free Fatigue, Mechanics and Materials II Supplementary Notes, MIT
- [8] **Barkey M., Hathaway, R., Lee, Y.L., Pan, J.**, Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice, Elsevier, Oxford, 2005
- [9] **Landgraf, R.W.**, Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Hardened Steels, Report No: 320, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, Urbana, 1968
- [10] **SAE J1099**, Technical Report on Fatigue Properties, The SAE Fatigue Design and Evaluation Steering Committee,1975
- [11] **Tavernelli, J.F., Coffin, L.F.**, Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue, and S. S. Manson, discussion, Trans. ASME, J. Basic Eng., vol. 84, no. 4, s. 533–537.
- [12] **Acar, E.**, 2014-2015 Akademik yılı bahar dönemi, Mak 511 Makine Mühendisliğinde Eniyileme Teknikleri ve İleri Uygulamalar ders notları, TOBB ETÜ.
- [13] **Rao, S.S.**, Engineering Optimization Theory and Practice, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley, NJ, 2009
- [14] **Haftka, R.T., Venkataraman S.**, Structural optimization complexity: what has Moore's law done for us?, Structural and Multidisciplinary Optimization,Cilt.28, s.375-387
- [15] **Haftka, R.T., Goel, T.,Queipo, N.V., Shyy,W., Tuvker, P.K.**, Surrogate-based analysis and optimization, Progress in Aerospace Sciences Cilt. 41,1-28,2005



- [16] **Giunta, A.A., Wojtkiewicz, S.F., Eldred, M.S.**, Overview of modern design of experiments methods for computational simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics, paper AIAA 2003–0649, 2003
- [17] **Santner, T.J., Williams, B., Notz, W.**, The Design and Analysis of Computer Experiments, Springer, Heidelberg, 2003
- [18] **Koziel,S., Yang, S.**, Computational Optimization, Methods and Algorithms, Springer-Verlag Berlin Heidelber,2011
- [19] **Giunta, A.A., Wojtkiewicz, S.F. Jr., Eldred, M.S.**, Overview of modern design of experiments methods for computational simulations. In: Proceedings of the 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV (2003). AIAA-2003-0649
- [20] **Koziel,S., Leifsson L.**, Surrogate-Based Modeling and Optimization Applications in Engineering, Springer,NY,2013
- [21] **Anderson-Cook, C.M., Montgomery, D.C., Myers, R.H.**, Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Design Experiments, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley, NJ,2016
- [22] **Bezerra M.A., Escaleria, L.A., Oliveria E.P.,Santelli E.R.**, Response Surface Methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, Talanta Cilt.76, s.965-977,2008
- [23] **Acar, E.**,Effects of the correlation model, the trend model, and the number of training points on the accuracy of Kriging metamodels, Expert Systems, Cilt. 30, Sayı. 5,2013
- [24] **Wild, S.M., Regis, R.G., Shoemaker, C.A.**, ORBIT: Optimization by radial basis function interpolation in trust-regions. SIAM J. Sci. Comput. 30, 3197–3219 ,2008
- [25] **Han, Z.H., Zhang, K.**,Surrogate-Based Optimization, Real-World Applications of Genetic Algorithms, Dr. Olympia Roeva (Ed.), ISBN: 978-953-51-0146-8, InTech, 2012
- [26] **Heng, P.A., Luk, W.S., Wong, T. T.**, Sampling with Hammersley and Halton Points, Journal of Graphics Tools 01/1997; 2(2),1997
- [27] **Holland, J.H.**, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [28] **Bolat, B., Erol O.K., İmrak, C.E.**,Mühendislik uygulamalarında genetik algoritmalar ve operatörlerin işlevi, Journal of Natural Engineering and Natural Sciences, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 2004/4,2004
- [29] **Luenberger, D.G., Ye,Y.**, Linear and Nonlinear Programming, 3.baskı, Springer,NY,2008
- [30] **Nocedal, J., Wright, S.J.**, Numerical Optimization,Springer,NY,2006
- [31] **Birolini, A.**, Reliability Engineering, *Springer*, Berlin, 1999.
- [32] **Ditlevsen, O.**, Model Uncertainty in Structural Reliability, Structural Safety Volume 1, 1982.

- [33] **Shinozuka, M.**, (1983) Basic Analysis of Structural Safety, Journal of the Structural Division, ASCE, cilt 109, no. 3,1983
- [34] **Tichy, M.** First-order third-moment reliability method. Structural Safety 1994;16:189±200.
- [35] **Der Kiureghian A, Lin HZ, Hwang SJ.**, Second-order reliability approximations. J Engrg Mech, ASCE 1987;113(8):1208±25.
- [36] **Liu, J.S.**, Monte Carlo Strategies in Scientific Computing, Springer-Verlag, New York, 2001.
- [37] **Melchers, R.E.**, Importance Sampling in Structural Systems, Structural Safety, Cilt 6, 3-10,1989
- [38] **Wu, Y.T.**, Computational Methods for Efficient Structural Reliability and Reliability Sensitivity Analysis, AIAA Journal, Cilt. 32, No. 8, 1717-1723,1994
- [39] **Nie, J.,Ellingwood, B.R.**,Directional Methods for Structural Reliability Analysis, Structural Safety, Cilt. 22, 233-249,2000
- [40] **Ramu, P.**, 2007, Multiple Tail Models Including Inverse Measures for Structural Design Under Uncertainties,(Doktora Tezi) University of Florida, Gainesville, FL.,2007
- [41] **Pickands, J.**, Statistical Inference Using Extreme Order Statistics, Annals of Statistics, Vol 3, 119-131,1975
- [42] **Acar, E.**,Guided Tail Modeling for Efficient and Accurate Reliability Estimation of Highly Safe Mechanical Systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 225, No. 5, 1237-1251,2011
- [43] **Kim, N.H., Ramu,P.,Queipo, N.V.**, Tail Modeling in Reliability-Based Design Optimization for Highly Safe Structural Systems, 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/AHS/ASC Structures,Structural Dynamics, and Material Conference,Newport,RI,AIAA 2006-1825,2006
- [44] **Boos, D.**, Using Extreme Value Theory to Estimate Large Percentiles, Technometrics, 26(1)33-39,1984
- [45] **Hasofer, A.**, Non-Parametric Estimation of Failure Probabilities, Mathematical Models for Structural Reliability, Eds. F. Casciati, B. Roberts, CRC Press,Boca Raton, FL,1996
- [46] **Myung, J.I.**,Tutorial on Maximum Likelihood Estimation, Journal of Mathematical Psychology,47,90-100,2003
- [47] **Hosking, J.R.M., Wallis, J.R.**,Parameter and Quantile Estimation for the Generalized Pareto Distribution, Technometrics,Vol 29, No:3,39-349,1987
- [48] **Castillo E., Hadi, A.S., Sarabia, J.M.**, Extreme Value and Related Models with Applications in EGINEERING and Science, Wiley Interscience, Hoboken, NJ,2005

- [49] **Ramu, P.**, Multiple Tail Models Including Inverse Measures for Structural Design Under Uncertainties, Doktora Tezi, University of Florida, Gainesville, FL,2007
- [50] **Ramu, P., Kim, N.H. ve Haftka, R.T.**, Inverse Measure-Based Tail Modeling Approaches for Structural Reliability Estimation, 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, AIAA 2007-1947, 2007
- [51] **Schütz, D., Klätschke, H., Heuler, P.**, CARLOS- Multiaxial fatigue loading standard for car wheel suspensions, Innovation and reliability in automotive design and testing. Proceedings of the 3rd International Conference, Vol.2 ,Torino, 1992
- [52] **Chu, C.**, "Comparison of Mean Stress Correction Methods for Fatigue Life Prediction," SAE Technical Paper 2000-01-0778, 2000
- [53] **Barkey, M., Hathaway,R., Lee, Y.L, Pan, J.**, Fatigue Testing and Analysis, Elsevier,2005
- [54] **Mac Donald, B.J.**, Practical Stress Analysis with Finite Elements, Glasnevin Publishing, 2007
- [55] **Haftka, R., Kim, N.H., Picheny, V., Roustant, O.**, Adaptive design of experiments for accurate approximation of target regions, HAL Archives, HAL No: hal-00319385,2008
- [56] **Acar, E., Guler, M.A., Gerçeker, B., Cerit, M.E., and Bayram, B.**, "Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations," Thin-Walled Structures, Vol. 49, No. 1, 2011, pp. 94-105.
- [57] **Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., and Rowe, C.M.**, tatistics for the evaluation and comparison of models, Journal of Geophysical Research, 90(C5), 8995–9005,1985
- [58] **Byrd, R.H., Mary E. Hribar, and Jorge Nocedal**, "An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming," SIAM Journal on Optimization, Vol 9, No. 4, pp. 877–900, 1999
- [59] **Ang, A., H-S., Munse, W.H.**, Practical Reliability Basis for Structural Fatigue, ASCE, National Structural Engineering Conference,1975
- [60] **White, G., Ayyub, B.**, Reliability Based Fatigue Design for Ship Structures, Naval Engineers Journal, May 1987
- [61] **Ayyub, B., McCuen, R.H.**, Probability, Statistic and Reliability for Engineers, CRC Press, Boca Raton, FL,1999
- [62] **Deng, F.,Hongshuang, L., Zizi, L.,Debing,W.**, Identifying the Probability Distribution of Fatigue Life Using the Maximum Entropy Principle
- [63] **Vandervieren, E.,Hubert, M.**, An adjusted boxplot for skewed distributions, Computational Statistics & Data Analysis, Cilt 52, Sayı 12, 2008
- [64] **Rousseeuw, P.J., Leroy, A.M.**, Robust Regression and Outlier Detection, John Wiley & Sons, Feb 25, 2005

- [65] **Grubb, F.**, Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples, *Technometrics*, 11(1), pp. 1–21, 1969.
- [66] **Efe, E., Şahinler,S.,Üçkardeşler, F.**, Aykırı gözlemlerin belirlenmesinde kullanılan bazı istatistikler, *KSÜ Doğa Bilg. Derg.*13(1),2010
- [67] **Seo, S.**, A Review and Comparison of Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets, Yüksek Lisans Tezi, Pittsburgh Üniversitesi, 2006
- [68] **Lagaros, N.D., Papadrakis,M.**, Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Cilt 191, Konu 32,2007, sf. 3491-3507.
- [69] **Ramu, P., Kim, N.H. , Haftka, R.T.**, “Multiple tail median approach for high reliability estimation”, *Structural Safety*, Vol. 32(2), 124-137,2010.
- [70] **Acar, E., Bayrak, G.**, "Reliability Estimation Using MCMC Based Tail Modeling", 17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, AIAA Aviation, (AIAA 2016-4412), 2016



## EKLER

**EK 1:** Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 50 örneklem.

Çizelge Ek 1 Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 50 örneklem.

	h1(mm)	h2 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	v1 (mm)	Gerilme (MPa)	Ömür (çevrim)	Kütle (kg)
1	54,9671	132,0804	3,482662	7,279636	10,0759	310,80	89283,7	0,1928
2	43,3837	131,3999	8,609915	9,937252	7,222662	432,15	18728,6	0,1843
3	62,45202	152,8558	6,521126	7,536769	8,152543	419,42	21379,6	0,1908
4	59,09409	124,8421	7,708638	7,08375	15,80994	506,98	9486,5	0,1599
5	71,07277	129,8783	4,704463	9,374114	14,76784	301,90	103658,4	0,1683
6	71,55231	159,4314	6,673861	6,781701	15,59271	850,58	1330,8	0,1567
7	65,62407	109,9348	7,947153	5,232445	13,90195	327,01	69092,0	0,1789
8	40,94178	159,8552	9,813676	9,777477	15,92	2410,60	44,8	0,1244
9	42,20821	116,6465	6,07177	5,817741	7,561598	289,88	128120,2	0,2040
10	51,34427	141,5534	3,899653	7,196537	11,02616	379,11	33883,7	0,1840
11	60,98211	137,49	3,558616	8,24501	9,241248	318,41	78971,1	0,1947
12	66,94108	143,3944	7,2725	7,865761	12,10756	490,79	10854,8	0,1732
13	54,18245	125,6868	8,392074	4,550507	16,8016	624,27	4147,1	0,1570
14	75,71158	138,8964	7,68133	3,420207	9,836442	338,39	58334,5	0,1968
15	72,191	150,1833	5,837281	4,959693	13,59958	483,36	11571,7	0,1755
16	79,60252	108,0466	9,674031	9,122017	7,123136	232,28	434917,0	0,2105
17	61,51253	113,0985	6,409687	6,649706	8,844137	245,92	314176,7	0,2019
18	52,35768	160,5966	9,737182	5,87636	16,32306	2142,79	64,5	0,1399
19	43,95612	140,8596	3,800932	5,600825	9,019499	368,36	38777,9	0,1969
20	64,37456	118,3142	4,650055	8,608479	16,0965	277,75	160798,2	0,1651
21	74,63817	128,2768	8,161296	7,637767	10,31918	347,87	50983,2	0,1890
22	55,42065	114,9089	9,387238	7,751776	14,49279	503,74	9741,4	0,1637
23	42,65367	119,3942	8,187114	3,944368	7,666009	328,61	67438,2	0,2019
24	49,2946	118,9282	5,399009	5,718182	15,09701	331,47	64593,7	0,1698
25	44,94884	123,1835	4,511522	6,371822	12,30185	315,49	82733,8	0,1815
26	50,09121	116,4861	9,024318	5,455039	17,76272	646,87	3620,8	0,1509
27	56,42686	124,3765	8,30212	6,138136	9,901232	371,10	37444,7	0,1886
28	60,4109	114,1213	5,132679	5,318138	10,66311	239,82	362218,5	0,1966
29	57,52319	154,9137	4,753167	8,71285	8,530554	425,83	19986,9	0,1880
30	77,54445	113,72	5,571258	5,56322	17,94157	281,13	150733,3	0,1650
31	60,12149	156,9913	8,932494	8,160998	11,63226	778,09	1828,8	0,1627
32	78,76247	127,593	8,675063	6,159248	7,850997	286,37	136647,4	0,2047
33	65,38984	111,087	6,775199	8,268095	14,89417	295,76	115327,3	0,1708
34	79,38786	123,7161	6,829042	9,548649	12,40764	292,60	121993,2	0,1811
35	47,65554	146,4336	5,338589	6,450325	10,24549	428,28	19486,8	0,1839
36	69,40606	148,8294	7,885769	9,233897	15,34324	850,34	1332,2	0,1516
37	51,04262	134,1911	8,555488	4,737812	16,43462	759,27	1998,3	0,1543
38	68,53143	143,8048	5,954114	9,212878	9,347625	372,98	36566,7	0,1871
39	70,5035	155,0694	6,114881	3,515135	12,87808	497,61	10248,6	0,1800
40	41,79198	111,4508	6,174443	5,953397	11,8079	303,17	101427,0	0,1836
41	48,66091	122,2696	5,184283	3,150264	8,911546	276,09	166051,7	0,2048
42	47,14	110,5239	7,463664	8,852132	13,63125	358,45	44136,1	0,1680

43	68,16556	117,4735	9,257941	4,251915	17,52912	603,28	4732,3	0,1592
44	77,09514	144,8746	9,362128	4,11438	8,38465	380,31	33385,6	0,1979
45	53,18222	145,3224	8,073896	4,374767	17,08016	974,01	830,4	0,1507
46	74,89803	153,5107	5,041351	7,981977	12,96405	470,76	12938,2	0,1732
47	69,10289	137,1499	7,555545	4,664977	11,4951	402,50	25729,4	0,1853
48	40,62304	111,9556	4,225124	5,044627	8,660772	256,48	248346,0	0,2047
49	62,92488	156,3632	4,170567	8,554172	9,16814	419,66	21325,9	0,1880
50	53,85631	149,3436	4,564324	6,35817	12,00505	442,33	16912,8	0,1784



**EK 2:** Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 100 örneklem.

Çizelge Ek 2 Tasarım değişkenleri için geniş aralık kullanılarak oluşturulan 100 örneklem.

	h1(mm)	h2(mm)	d2(mm)	d3(mm)	v1(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür (Çevrim)	Kütle (kg)
1	54,9671	132,0804	3,482662	7,279636	10,0759	310,80	89283,7	0,1928
2	43,3837	131,3999	8,609915	9,937252	7,222662	432,15	18728,6	0,1843
3	62,45202	152,8558	6,521126	7,536769	8,152543	419,42	21379,6	0,1908
4	59,09409	124,8421	7,708638	7,08375	15,80994	506,98	9486,5	0,1599
5	71,07277	129,8783	4,704463	9,374114	14,76784	301,90	103658,4	0,1683
6	71,55231	159,4314	6,673861	6,781701	15,59271	850,58	1330,8	0,1567
7	65,62407	109,9348	7,947153	5,232445	13,90195	327,01	69092,0	0,1789
8	40,94178	159,8552	9,813676	9,777477	15,92	2410,60	44,8	0,1244
9	42,20821	116,6465	6,07177	5,817741	7,561598	289,88	128120,2	0,2040
10	51,34427	141,5534	3,899653	7,196537	11,02616	379,11	33883,7	0,1840
11	60,98211	137,49	3,558616	8,24501	9,241248	318,41	78971,1	0,1947
12	66,94108	143,3944	7,2725	7,865761	12,10756	490,79	10854,8	0,1732
13	54,18245	125,6868	8,392074	4,550507	16,8016	624,27	4147,1	0,1570
14	75,71158	138,8964	7,68133	3,420207	9,836442	338,39	58334,5	0,1968
15	72,191	150,1833	5,837281	4,959693	13,59958	483,36	11571,7	0,1755
16	79,60252	108,0466	9,674031	9,122017	7,123136	232,28	434917,0	0,2105
17	61,51253	113,0985	6,409687	6,649706	8,844137	245,92	314176,7	0,2019
18	52,35768	160,5966	9,737182	5,87636	16,32306	2142,79	64,5	0,1399
19	43,95612	140,8596	3,800932	5,600825	9,019499	368,36	38777,9	0,1969
20	64,37456	118,3142	4,650055	8,608479	16,0965	277,75	160798,2	0,1651
21	74,63817	128,2768	8,161296	7,637767	10,31918	347,87	50983,2	0,1890
22	55,42065	114,9089	9,387238	7,751776	14,49279	503,74	9741,4	0,1637
23	42,65367	119,3942	8,187114	3,944368	7,666009	328,61	67438,2	0,2019
24	49,2946	118,9282	5,399009	5,718182	15,09701	331,47	64593,7	0,1698
25	44,94884	123,1835	4,511522	6,371822	12,30185	315,49	82733,8	0,1815
26	50,09121	116,4861	9,024318	5,455039	17,76272	646,87	3620,8	0,1509
27	56,42686	124,3765	8,30212	6,138136	9,901232	371,10	37444,7	0,1886
28	60,4109	114,1213	5,132679	5,318138	10,66311	239,82	362218,5	0,1966
29	57,52319	154,9137	4,753167	8,71285	8,530554	425,83	19986,9	0,1880
30	77,54445	113,72	5,571258	5,56322	17,94157	281,13	150733,3	0,1650
31	60,12149	156,9913	8,932494	8,160998	11,63226	778,09	1828,8	0,1627
32	78,76247	127,593	8,675063	6,159248	7,850997	286,37	136647,4	0,2047
33	65,38984	111,087	6,775199	8,268095	14,89417	295,76	115327,3	0,1708
34	79,38786	123,7161	6,829042	9,548649	12,40764	292,60	121993,2	0,1811
35	47,65554	146,4336	5,338589	6,450325	10,24549	428,28	19486,8	0,1839
36	69,40606	148,8294	7,885769	9,233897	15,34324	850,34	1332,2	0,1516
37	51,04262	134,1911	8,555488	4,737812	16,43462	759,27	1998,3	0,1543
38	68,53143	143,8048	5,954114	9,212878	9,347625	372,98	36566,7	0,1871
39	70,5035	155,0694	6,114881	3,515135	12,87808	497,61	10248,6	0,1800
40	41,79198	111,4508	6,174443	5,953397	11,8079	303,17	101427,0	0,1836
41	48,66091	122,2696	5,184283	3,150264	8,911546	276,09	166051,7	0,2048
42	47,14	110,5239	7,463664	8,852132	13,63125	358,45	44136,1	0,1680
43	68,16556	117,4735	9,257941	4,251915	17,52912	603,28	4732,3	0,1592
44	77,09514	144,8746	9,362128	4,11438	8,38465	380,31	33385,6	0,1979
45	53,18222	145,3224	8,073896	4,374767	17,08016	974,01	830,4	0,1507
46	74,89803	153,5107	5,041351	7,981977	12,96405	470,76	12938,2	0,1732
47	69,10289	137,1499	7,555545	4,664977	11,4951	402,50	25729,4	0,1853
48	40,62304	111,9556	4,225124	5,044627	8,660772	256,48	248346,0	0,2047
49	62,92488	156,3632	4,170567	8,554172	9,16814	419,66	21325,9	0,1880
50	53,85631	149,3436	4,564324	6,35817	12,00505	442,33	16912,8	0,1784
51	77,70546	120,8968	4,405789	9,454996	12,74381	256,47	248397,2	0,1835
52	40,24212	133,4801	7,024311	3,285421	10,44552	405,83	24786,9	0,1881
53	58,52663	161,8246	3,701807	5,765538	15,56352	621,38	4221,7	0,1633
54	55,71838	144,587	8,79619	6,861619	16,93337	1159,50	460,8	0,1442
55	58,22308	151,5549	8,032217	6,770805	15,01581	876,96	1195,2	0,1541
56	73,99217	128,8571	9,559185	8,966815	11,07595	448,30	15956,1	0,1795
57	51,86766	130,3849	6,262251	3,565198	13,72249	398,21	27012,8	0,1768
58	75,43028	135,7766	7,380547	5,11171	14,20335	457,53	14612,8	0,1738



59	59,49189	120,2063	9,138197	3,051842	8,575265	315,25	83058,7	0,2014
60	41,52118	147,205	6,591431	9,635088	12,17255	586,94	5267,1	0,1590
61	45,27131	132,5617	5,303569	8,493438	10,1762	371,20	37398,4	0,1822
62	72,62803	140,0449	9,971854	8,432185	13,40725	750,00	2089,5	0,1629
63	59,64489	122,6065	3,259337	3,666462	17,79902	270,71	184669,4	0,1663
64	44,64353	115,7099	5,638545	5,380427	11,31404	298,76	109420,7	0,1880
65	52,49235	131,004	9,922611	3,867687	7,529003	389,16	30014,8	0,1979
66	63,84128	125,9108	5,898432	6,223856	17,40285	409,38	23832,2	0,1589
67	46,07659	148,4275	5,500209	8,915669	17,33841	729,58	2311,3	0,1408
68	72,89797	147,9273	4,109134	7,379344	10,59422	355,87	45689,1	0,1893
69	48,24904	143,0545	9,509954	7,915914	9,515183	584,95	5337,6	0,1730
70	78,31359	115,4715	4,310148	7,567915	15,75044	258,16	239536,2	0,1740
71	49,68384	108,9049	5,691443	8,358997	12,54705	265,54	205130,3	0,1792
72	73,22028	135,3771	9,169037	9,08629	13,18288	587,25	5256,3	0,1666
73	45,86897	122,0337	6,357042	7,263852	14,65383	401,14	26125,9	0,1645
74	50,53149	158,4685	7,136669	4,274141	8,041421	458,36	14499,8	0,1934
75	43,02454	161,4085	6,980832	6,944109	16,68817	1269,64	341,4	0,1403
76	62,0666	121,4209	7,771639	4,047737	17,5711	525,31	8201,7	0,1592
77	70,09246	149,7792	3,083967	9,331005	8,260068	346,79	51761,0	0,1970
78	61,9331	155,596	6,435748	3,369614	16,58088	806,81	1605,6	0,1596
79	56,05521	138,2539	3,200389	5,302271	17,2243	381,38	32952,5	0,1623
80	66,00405	154,1317	8,844669	7,044835	7,021054	446,30	16268,2	0,1925
81	66,59423	158,7617	5,771653	6,023229	12,68316	554,20	6609,2	0,1738
82	69,64629	134,7011	9,00785	8,800294	14,45484	659,26	3369,8	0,1602
83	64,96479	146,0617	4,989737	6,578267	10,75954	385,85	31221,0	0,1868
84	79,1381	136,4414	6,877565	4,755351	14,33169	422,57	20679,9	0,1757
85	46,72005	109,3878	9,634989	8,109107	15,4518	534,53	7642,1	0,1565
86	71,83722	129,3344	3,313605	3,743599	13,37691	260,84	226241,3	0,1881
87	47,30052	139,8216	3,350757	7,818253	14,04491	396,02	27701,3	0,1683
88	44,06977	132,9006	3,035706	7,442184	9,675168	338,04	58631,2	0,1925
89	63,28401	126,8651	7,501359	4,882884	16,47534	513,81	8978,1	0,1622
90	57,07259	157,9845	7,1012	4,467251	11,1867	556,52	6499,6	0,1792
91	57,78637	150,7536	4,047566	4,124674	13,96518	456,56	14747,0	0,1766
92	67,56402	152,067	8,509502	3,771989	16,13908	997,75	764,7	0,1577
93	74,35532	127,1087	7,213899	4,514735	9,611764	283,10	145224,2	0,1998
94	53,54548	137,7979	3,675745	9,674906	10,86258	350,83	48936,0	0,1804
95	67,72854	152,3414	3,624168	3,135244	13,0588	401,83	25924,0	0,1858
96	54,60193	157,1772	4,364223	9,845446	11,91699	521,53	8446,4	0,1671
97	76,72412	142,457	8,364322	3,277228	7,981927	322,61	73932,9	0,2043
98	76,202	118,1204	3,928236	9,897145	15,16559	272,33	178826,3	0,1721
99	49,14096	140,9952	4,853268	5,019493	7,430655	341,10	56106,1	0,2049
100	64,77801	112,5396	4,903684	6,500609	11,53984	233,68	420221,4	0,1923

**EK 3: Tasarım değişkenleri için birinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.**

Çizelge Ek 3 Tasarım değişkenleri için birinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

	h1(mm)	h2(mm)	d2(mm)	d3(mm)	v1(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür (Çevrim)	Kütle (kg)
1	67,76467	131,7101	5,696313	5,675832	8,826862	282,83	145966,9	0,2023
2	67,56387	122,3135	5,50962	4,137555	9,861467	235,42	402671,0	0,2026
3	49,41289	127,1473	4,985908	5,169387	9,269202	306,88	95277,2	0,1992
4	54,21192	124,979	4,620504	4,418413	9,660126	276,61	164401,1	0,2012
5	56,29962	134,4641	5,028933	5,381122	11,04189	347,71	51096,0	0,1900
6	70,35486	142,4558	4,887917	4,211697	11,22369	329,31	66719,9	0,1933
7	55,82489	123,6086	4,389363	5,908989	11,96579	315,92	82166,5	0,1882
8	59,11664	131,1647	4,112386	4,701206	11,5885	310,35	89954,0	0,1921
9	58,37902	145,2659	5,890271	5,525419	9,323317	379,36	33779,6	0,1937
10	60,22424	131,9447	5,732819	4,496467	9,39198	295,99	114863,3	0,1999
11	53,40148	147,612	5,771964	4,040531	11,69967	415,38	22324,3	0,1844
12	65,08816	130,1814	5,633441	4,962374	10,8651	294,46	118016,1	0,1937
13	54,83245	141,571	5,104588	4,162111	8,334162	334,87	61414,2	0,2037
14	66,0157	138,7572	4,414583	5,057319	10,22169	321,45	75290,1	0,1972
15	68,69654	124,1579	4,55388	5,159511	8,967526	242,56	339550,3	0,2067
16	48,34796	122,6926	4,07347	5,427515	11,44372	310,90	89144,0	0,1909
17	66,85748	147,3362	4,767548	4,845089	11,63988	385,42	31382,1	0,1883
18	57,05605	125,5283	5,567085	4,833314	10,77343	290,78	126049,4	0,1937
19	53,11521	129,5213	4,644898	4,525425	8,304438	290,44	126826,6	0,2063
20	59,7496	125,8281	4,035242	4,453569	11,91367	280,70	151952,6	0,1924
21	54,56124	142,2592	4,174353	5,635631	10,70691	387,50	30612,4	0,1907
22	48,62651	140,7526	5,377503	4,361048	8,429371	349,86	49598,1	0,2009
23	64,38765	126,2797	4,56572	4,311825	9,53933	256,27	249471,3	0,2040
24	69,1615	146,2353	4,250093	4,938289	11,16111	362,07	42074,3	0,1923
25	66,3022	133,6284	4,878766	5,359237	9,178607	292,10	123099,1	0,2020
26	57,71021	133,1465	5,205858	4,656851	8,190279	295,67	115511,3	0,2056
27	69,7213	139,4971	4,821251	5,302568	8,652802	300,54	106111,1	0,2042
28	63,50199	123,4482	5,180565	4,592329	9,824142	254,63	258528,4	0,2015
29	49,63269	135,522	5,259368	5,48278	10,97704	374,06	36072,3	0,1876
30	62,55397	146,5936	5,944462	5,247693	8,516929	356,15	45519,4	0,1989
31	50,73615	137,3269	5,464628	4,613302	10,27928	353,70	47056,4	0,1924
32	52,06059	137,9047	4,351808	4,267961	8,755443	325,64	70553,7	0,2034
33	61,47523	138,531	5,35565	5,037723	10,61448	343,28	54381,6	0,1923
34	63,02138	132,5012	4,491398	5,717193	10,4471	315,43	82824,0	0,1954
35	57,2298	134,7901	5,839108	5,853122	10,48764	355,41	45978,0	0,1899
36	71,24324	128,1865	5,120093	4,738192	11,29069	267,47	197164,5	0,1949
37	61,93782	135,0659	4,236963	5,7406	10,3262	328,37	67681,4	0,1955
38	71,02526	136,7597	5,424307	4,897429	8,594901	283,62	143813,4	0,2050
39	55,42631	143,5156	4,946718	5,767648	10,94509	407,94	24212,4	0,1872
40	68,51146	144,2056	4,453854	4,00818	11,38587	340,09	56919,7	0,1931
41	60,86737	127,3643	5,300269	4,795512	10,05142	282,26	147531,4	0,1982
42	50,31654	139,9791	5,079067	5,099957	8,065586	340,36	56701,6	0,2021
43	51,75171	145,5399	5,678371	5,477209	8,126923	375,20	35564,5	0,1983
44	65,61799	128,4309	4,703842	5,925323	9,455923	284,60	141189,9	0,2010
45	52,61877	144,4043	5,541234	5,564849	11,8199	438,19	17622,2	0,1811
46	71,69555	143,1818	4,121847	5,964353	10,1068	339,73	57217,7	0,1967
47	61,25759	130,8357	4,308441	5,21452	8,945843	285,95	137705,4	0,2040
48	64,09732	140,3415	5,853665	4,331967	9,725433	325,84	70344,7	0,1972
49	58,67726	136,1389	4,733314	4,104097	9,112334	306,02	96657,3	0,2029
50	51,23731	129,0842	5,999602	5,8088	9,975924	335,57	60791,0	0,1921

**EK 4:** Tasarım değişkenleri için ikinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

Çizelge Ek 4 Tasarım değişkenleri için ikinci aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

	h1(mm)	h2(mm)	d2(mm)	d3(mm)	v1(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür(Çevrim)	Kütle(kg)
1	45,09046	125,9602	5,804728	6,848116	13,93089	436,10	17994,6	0,1702
2	51,27819	127,8889	6,329939	5,213489	10,05675	320,26	76706,4	0,1926
3	48,62737	118,8695	4,010804	5,4252	9,426241	276,47	164839,5	0,2017
4	50,52386	126,7775	6,131588	4,679937	13,60586	332,51	63600,7	0,1772
5	52,65021	119,7002	6,989508	5,829895	12,28869	314,74	83746,9	0,1818
6	46,96866	124,9805	6,490836	7,61083	12,40009	429,90	19163,8	0,1750
7	43,58838	108,338	5,918321	7,538668	11,12788	320,33	76620,7	0,1868
8	51,73206	117,5642	7,193854	5,954852	11,34914	302,35	102857,4	0,1861
9	47,63656	113,619	7,809863	6,928834	14,66408	364,31	40859,4	0,1668
10	49,52449	114,6073	5,188065	5,000789	11,88812	270,88	184048,5	0,1895
11	45,40548	130,394	7,117272	7,849048	13,86363	541,72	7240,8	0,1634
12	43,67894	111,9127	4,81742	6,647596	10,28324	297,12	112608,5	0,1939
13	44,73235	118,483	4,13382	4,920129	9,667275	279,00	156980,8	0,2005
14	52,0144	112,7242	4,334602	4,357662	10,40318	236,23	394794,2	0,2004
15	46,62032	120,2358	5,26611	6,407224	12,567	349,63	49752,0	0,1810
16	48,02986	131,7104	4,985911	5,153712	13,54335	380,39	33353,1	0,1772
17	50,34864	111,2825	4,169952	4,177937	14,86001	245,73	315579,2	0,1795
18	51,9429	129,775	4,579428	4,747088	9,300726	302,57	102480,7	0,2008
19	51,44401	109,9949	5,58163	4,122427	10,18961	228,16	482434,7	0,2001
20	47,85972	111,4645	6,931285	7,022419	11,76878	318,75	78543,9	0,1831
21	45,7015	121,793	6,690947	7,151793	11,50218	378,71	34047,1	0,1806
22	50,00647	110,7289	6,858605	7,265259	9,820742	296,11	114610,6	0,1931
23	43,10477	109,8321	5,653016	5,104199	14,31387	278,61	158155,6	0,1763
24	46,40102	122,1852	7,593043	7,691041	11,67901	409,52	23794,7	0,1765
25	49,90188	108,8032	7,883875	6,549948	13,27698	298,26	110375,9	0,1765
26	49,69931	130,9057	7,643627	4,028354	12,82915	338,27	58438,9	0,1774
27	47,24625	119,0728	5,757677	5,725015	9,11901	291,40	124657,6	0,1986
28	52,92238	115,0081	7,389032	6,190992	13,15527	309,85	90696,2	0,1777
29	44,10935	123,6579	5,515243	6,741001	11,1854	367,30	39305,5	0,1847
30	51,17343	128,3554	6,306464	6,055738	10,86633	352,24	48002,4	0,1867
31	44,8483	116,1271	6,025226	7,356563	12,10805	363,72	41172,5	0,1802
32	48,28695	123,2615	7,235635	4,493159	12,9833	312,09	87414,9	0,1784
33	52,27027	121,0927	4,799517	7,970455	14,20087	440,59	17205,9	0,1720
34	47,44039	125,4839	6,616953	7,467093	12,66572	433,32	18506,3	0,1738
35	43,35591	120,8639	6,209871	5,608342	9,175997	308,70	92442,4	0,1960
36	49,22842	115,2751	6,468281	6,618072	14,0968	347,72	51090,3	0,1729
37	46,21905	127,4766	5,114037	5,280168	10,96444	335,96	60444,7	0,1896
38	44,3416	113,0185	5,323141	4,253252	14,44241	266,63	200577,3	0,1776
39	50,85483	126,4666	4,690368	6,096693	13,77698	380,07	33484,1	0,1766
40	48,93211	131,4311	4,414035	7,387471	12,86379	452,63	15306,4	0,1767
41	45,34546	114,2008	4,916997	7,076506	11,61641	330,57	65471,9	0,1862
42	43,96595	124,0972	5,374599	7,809065	9,550645	375,28	35527,4	0,1901
43	45,8672	122,8653	5,96317	5,454221	14,97172	362,20	42004,3	0,1691
44	44,49283	116,9112	7,998877	5,872373	13,40734	332,31	63789,9	0,1725
45	47,03418	117,8122	4,319601	4,577469	10,67896	272,69	177542,6	0,1966
46	52,54653	128,8134	6,786702	5,520986	9,848606	326,39	69745,3	0,1920
47	49,16477	129,5836	7,490725	6,33694	10,73757	375,16	35580,4	0,1829
48	46,11376	124,4592	7,302543	6,251766	14,5843	409,19	23879,9	0,1657
49	48,50487	116,5587	4,547246	4,841151	10,49718	267,91	195419,7	0,1971
50	50,64296	109,1552	7,737698	4,4101	12,19958	244,24	326569,5	0,1859

**EK 5:** Tasarım değişkenleri için üçüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

Çizelge Ek 5 Tasarım değişkenleri için üçüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

	h1(mm)	h2(mm)	d2(mm)	d3(mm)	v1(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür(Çevrim)	Kütle (kg)
1	43,30006	117,72519	7,77759	5,96363	15,27053	364,92	40538,3	0,1618
2	43,61719	115,22704	7,44297	5,75829	13,89579	322,32	74270,3	0,1705
3	44,23764	117,54995	7,38494	5,09534	14,52735	312,20	87272,2	0,1685
4	41,91521	119,39410	7,16013	5,49508	13,75751	344,24	53652,1	0,1706
5	43,68679	116,20011	8,31208	5,67296	14,59041	332,62	63500,0	0,1651
6	42,68755	115,67897	9,97698	5,59182	15,53936	320,02	76991,3	0,1566
7	41,85559	116,15116	7,95695	5,11772	15,23427	312,88	86309,3	0,1634
8	42,22802	110,51236	9,91909	5,27186	16,46740	279,69	154913,9	0,1547
9	43,53690	118,85298	6,69737	5,98648	14,76863	367,62	39148,0	0,1664
10	41,53958	118,28840	9,55283	5,86914	15,82414	366,76	39580,0	0,1543
11	44,73135	116,51233	9,10624	5,95286	15,13347	346,49	51979,0	0,1603
12	44,61553	112,47929	9,26639	5,36677	13,64172	287,54	133733,0	0,1697
13	41,67689	113,16380	8,74589	5,20643	14,95650	294,77	117371,8	0,1636
14	41,75279	110,63824	6,51443	5,69737	14,64632	308,73	92388,2	0,1699
15	44,98151	114,23619	8,19587	5,39121	13,99392	303,78	100386,2	0,1699
16	43,87184	115,50255	8,80260	5,44126	14,08759	314,13	84576,8	0,1671
17	43,90843	117,24899	6,34973	5,90860	14,75740	352,48	47840,2	0,1680
18	43,16159	110,11913	6,13404	5,88845	16,37079	324,32	72002,3	0,1626
19	44,11186	111,65486	7,31832	5,42471	14,41690	296,85	113133,5	0,1702
20	42,42497	114,16920	9,69081	5,79506	14,27228	319,85	77197,2	0,1634
21	44,19925	113,49819	8,40047	5,28612	14,50675	294,12	118728,8	0,1671
22	41,17294	119,06639	9,29292	5,31410	14,85279	338,57	58187,1	0,1604
23	42,56149	118,76948	7,73221	5,32859	15,93208	343,25	54406,2	0,1596
24	43,76252	119,58746	9,38005	5,04730	14,15461	316,77	81059,3	0,1649
25	41,56732	111,93258	8,48485	5,93202	13,70960	317,23	80463,4	0,1691
26	42,80663	111,51081	9,46655	5,71502	14,39541	300,97	105321,6	0,1646
27	41,99647	114,64847	6,44150	5,24129	14,33001	306,29	96225,3	0,1714
28	43,98408	115,17389	7,09711	5,53102	16,09514	332,94	63194,5	0,1614
29	43,47368	116,61970	8,99239	5,84936	13,95993	337,20	59353,5	0,1659
30	44,79925	112,35593	7,65309	5,40730	16,00170	305,56	97405,2	0,1619
31	44,48105	113,72429	6,00324	5,22664	16,15087	310,96	89056,7	0,1646
32	43,01153	112,91545	7,88463	5,77122	15,06108	322,70	73834,7	0,1644
33	41,03085	111,00546	7,52304	5,83654	13,56186	309,74	90853,6	0,1723
34	42,19061	110,96460	8,02589	5,72611	14,90540	309,78	90798,8	0,1653
35	41,35145	114,42354	6,82351	5,64150	15,70599	336,33	60111,8	0,1630
36	44,90687	112,68975	6,96338	5,81259	15,58247	324,20	72135,1	0,1645
37	42,64808	119,93570	8,56481	5,56722	16,27957	367,54	39184,6	0,1551
38	44,39741	117,02003	8,65330	5,34221	15,62558	320,81	76039,9	0,1600
39	43,32998	114,89158	6,78758	5,01034	16,42802	311,03	88952,8	0,1614
40	42,46728	116,90742	9,77357	5,62740	13,50251	326,61	69515,6	0,1663
41	41,09699	119,63841	6,20287	5,17070	16,05983	351,36	48582,6	0,1622
42	44,58992	113,92784	6,93610	5,19782	13,85102	292,51	122187,1	0,1737
43	43,11800	118,40580	8,35814	5,13774	15,04030	322,70	73836,5	0,1631
44	41,24804	118,08890	9,13347	5,55784	15,47321	349,08	50133,6	0,1577
45	42,11127	117,84604	6,59687	5,03109	15,73369	330,00	66030,8	0,1640
46	44,30923	110,26398	9,65921	5,50122	14,17245	280,09	153739,3	0,1666
47	42,91353	113,35896	8,13168	5,06732	15,32478	295,74	115362,1	0,1639
48	42,96710	112,03308	6,30506	5,46141	16,25525	315,68	82488,9	0,1630
49	42,30299	115,82691	8,93195	5,15874	15,40843	307,26	94668,7	0,1605
50	41,47197	111,39170	7,26482	5,61386	15,85348	316,56	81332,4	0,1623

**EK 6:** Tasarım değişkenleri için dördüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

Çizelge Ek 6 Tasarım değişkenleri için dördüncü aşamada oluşturulmuş 50 örneklem.

	h1(mm)	h2(mm)	d2(mm)	d3(mm)	v1(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür(Çevrim)	Kütle(kg)
1	39,26655	118,68766	10,56822	5,01854	17,76875	317,44	80203,2	0,1434
2	39,59058	110,32871	10,87757	4,69597	16,46149	278,46	158607,5	0,1526
3	38,40014	116,91360	9,72629	5,08299	16,94273	320,67	76204,6	0,1497
4	38,92407	113,54519	10,72276	4,80808	16,58431	284,01	142757,7	0,1508
5	40,18729	118,49884	10,68963	5,04645	15,79997	317,82	79717,2	0,1527
6	43,95735	119,14741	10,91527	4,82070	16,32203	297,70	111463,5	0,1513
7	43,38919	118,19884	9,23496	4,64389	16,10389	299,73	107607,1	0,1571
8	41,99274	111,01500	9,66800	4,54498	15,52773	270,12	186871,4	0,1609
9	41,15402	116,10110	10,78493	5,12403	15,98254	295,80	115245,9	0,1527
10	39,43027	115,55579	10,97375	5,39452	17,67435	311,24	88647,8	0,1432
11	39,47162	111,82299	9,36613	4,85174	17,24554	275,66	167451,6	0,1517
12	38,10995	114,77593	9,92886	4,59453	15,66181	284,65	141079,8	0,1569
13	42,93300	111,49360	9,17205	4,53570	15,83058	268,22	194181,7	0,1608
14	41,73343	114,36593	10,38085	5,43431	17,89261	306,47	95931,3	0,1449
15	42,25168	119,40688	10,14431	4,70631	17,73075	303,55	100770,6	0,1462
16	39,93835	117,61097	9,53803	5,25130	16,18637	330,97	65084,6	0,1536
17	42,66481	110,90167	9,57620	4,90880	16,63504	274,07	172772,7	0,1554
18	40,61543	119,96655	9,35762	5,31599	17,09942	354,54	46518,2	0,1490
19	38,23406	119,25782	9,04323	4,74780	16,43806	326,93	69177,1	0,1537
20	43,55691	111,24865	9,50070	4,94423	16,82691	274,87	170070,7	0,1548
21	39,04481	115,10403	10,51706	5,35877	17,94296	312,73	86509,2	0,1432
22	39,83026	117,23270	10,42629	5,18022	16,73121	313,14	85934,2	0,1490
23	39,73583	110,63258	10,93837	5,40757	17,52737	287,44	133959,9	0,1459
24	43,48065	114,48593	10,45580	4,96051	17,27366	286,63	135986,6	0,1492
25	38,48948	114,84338	10,24893	5,28291	15,87243	312,19	87286,1	0,1537
26	41,86058	117,90485	10,09354	5,45921	17,38338	340,21	56824,1	0,1467
27	42,85724	115,84447	9,09377	5,15109	15,58925	309,71	90903,9	0,1594
28	42,18528	112,22080	9,61689	4,51354	17,14254	271,72	180987,4	0,1531
29	42,54892	112,60872	10,18850	4,67690	16,67198	277,78	160714,4	0,1536
30	41,63924	115,77374	10,04891	5,16252	16,28357	301,19	104917,5	0,1533
31	42,35475	112,87472	9,41913	4,57296	17,31732	272,42	178499,3	0,1524
32	40,04230	119,65008	9,30118	5,47200	17,01043	366,89	39515,6	0,1492
33	43,64452	112,56182	9,03506	5,26178	16,50946	292,30	122654,8	0,1563
34	40,95175	114,11125	10,64633	5,49204	17,56585	307,58	94167,7	0,1454
35	43,25757	110,54160	9,83379	4,79050	17,43587	273,63	174263,6	0,1516
36	43,83328	118,91280	10,52933	5,10212	17,47397	313,29	85731,9	0,1463
37	42,69379	117,46401	10,23808	5,36625	16,77241	326,67	69448,9	0,1499
38	40,32857	113,94940	9,84946	4,86680	15,92592	283,74	143481,8	0,1563
39	41,28462	115,22557	9,70598	4,88451	16,89288	291,41	124626,0	0,1520
40	40,76472	116,49276	9,78160	4,98383	17,83291	301,87	103712,3	0,1465
41	41,45123	116,61752	9,27806	5,21364	16,05675	316,47	81453,8	0,1559
42	38,68184	111,70682	10,62827	5,03981	16,38766	283,15	145088,1	0,1521
43	40,72566	113,32537	9,89019	4,76172	16,24068	277,92	160262,3	0,1553
44	40,40984	113,06130	9,12296	5,33805	17,17369	308,10	93365,9	0,1515
45	43,06297	118,24862	10,00989	5,22271	16,98087	320,57	76330,3	0,1496
46	41,00270	116,21831	10,83419	4,72084	16,00778	289,37	129330,3	0,1532
47	38,81923	113,78754	9,46612	4,92270	17,61455	290,83	125930,1	0,1487
48	38,26338	117,04331	9,96425	4,62652	15,71574	299,33	108352,4	0,1558
49	41,55627	112,16643	10,31433	4,60888	15,63451	276,88	163524,8	0,1582
50	39,13257	110,03343	10,32595	5,07097	17,99928	277,27	162295,9	0,1459

**EK 7:** Tasarım değişkenleri için beşinci aşamada oluşturulmuş 30 örneklem.

Çizelge Ek 7 Tasarım değişkenleri için beşinci aşamada oluşturulmuş 30 örneklem.

	h2(mm)	d3(mm)	Gerilme(Mpa)	Ömür(Çevrim)	Kütle(kg)
1	120,9589	4,635476	308,92	92105,1	0,1407
2	123,8523	4,558207	327,05	69049,4	0,1398
3	122,367	4,920186	338,97	57850,1	0,1395
4	116,5488	4,742116	287,77	133170,4	0,1421
5	117,9599	4,886187	300,15	106813,0	0,1412
6	119,1436	4,861292	307,67	94032,1	0,1408
7	123,375	4,600398	327,39	68699,0	0,1399
8	119,8838	4,578696	295,80	115247,5	0,1412
9	117,6527	4,765453	291,39	124680,8	0,1416
10	121,6192	4,98748	336,98	59548,9	0,1396
11	120,3078	4,81948	317,02	80737,5	0,1405
12	124,0865	4,901294	353,51	47176,1	0,1389
13	124,8478	4,777883	353,49	47186,7	0,1389
14	122,7773	4,703266	328,97	67065,9	0,1399
15	121,7669	4,807696	327,14	68958,0	0,1400
16	122,1429	4,625612	317,77	79781,7	0,1403
17	124,4571	4,936321	359,75	43384,9	0,1387
18	115,3741	4,500802	282,44	147047,2	0,1430
19	118,4459	4,982062	309,38	91402,1	0,1408
20	115,0415	4,521522	282,13	147891,1	0,1431
21	123,1775	4,662751	329,09	66941,4	0,1398
22	120,6196	4,593352	302,87	101948,9	0,1409
23	118,9773	4,545531	289,45	129123,6	0,1416
24	117,0953	4,786125	289,42	129212,7	0,1418
25	121,2307	4,716744	315,74	82402,4	0,1404
26	118,1096	4,839171	298,01	110867,0	0,1413
27	116,1159	4,671601	286,02	137535,8	0,1424
28	116,823	4,867795	290,38	126975,0	0,1417
29	115,7616	4,688539	285,62	138552,9	0,1425
30	119,4984	4,957194	314,95	83459,8	0,1405

**Ek 8:** Güvenilirlik tahmini için kullanılan 700 örneklem.

Çizelge Ek 8 Güvenilirlik tahmini için kullanılan 700 örneklem.

	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	σ <sub>f</sub> (Mpa)	b	ε <sub>f</sub> (Mpa)	c	Ömür (Çevrim)
1	413,46	702,13	1670,14	-0,113	0,518	-0,572	68551516,0
2	432,40	493,06	1492,46	-0,166	0,568	-0,413	34492909,1
3	270,41	716,91	1686,47	-0,172	0,585	-0,483	1982151,9
4	433,98	484,82	1363,51	-0,113	0,731	-0,526	366165871,6
5	375,53	487,53	1181,20	-0,128	0,729	-0,538	18687837,8
6	264,29	685,83	1566,82	-0,181	0,593	-0,488	1412781,9
7	301,93	567,62	1380,19	-0,107	0,566	-0,698	314645971,6
8	357,75	690,79	1872,32	-0,139	0,766	-0,465	27921373,1
9	443,16	726,92	1842,96	-0,136	0,698	-0,422	49211487,0
10	444,70	664,03	1463,80	-0,131	0,697	-0,698	3060620,7
11	276,78	723,47	1192,34	-0,118	0,774	-0,453	21318248,3
12	443,09	721,55	1791,83	-0,150	0,717	-0,401	45884215,1
13	344,96	810,86	1890,97	-0,175	0,592	-0,632	194345,3
14	410,46	771,57	1216,02	-0,120	0,738	-0,424	25489855,5
15	273,51	475,68	1506,34	-0,154	0,570	-0,507	11421210,1
16	331,73	581,88	1603,86	-0,111	0,697	-0,668	396642084,2
17	434,47	582,93	1680,74	-0,151	0,784	-0,620	3344086,8
18	408,78	702,63	1704,94	-0,112	0,619	-0,471	154858393,2
19	443,57	669,62	1653,73	-0,167	0,584	-0,458	4363612,3
20	380,39	742,17	1710,46	-0,171	0,503	-0,669	171496,3
21	251,43	582,34	1449,90	-0,108	0,545	-0,559	351316474,5
22	420,62	521,08	1603,21	-0,178	0,468	-0,634	544752,5
23	438,27	475,85	1259,70	-0,124	0,564	-0,423	177287237,5
24	385,18	735,56	1216,55	-0,120	0,548	-0,604	1660007,1
25	401,61	520,95	1897,07	-0,145	0,552	-0,443	81123648,9
26	398,57	590,15	1384,20	-0,150	0,726	-0,622	1216449,5
27	380,34	529,77	1884,07	-0,148	0,618	-0,644	13997844,5
28	279,61	686,30	1311,10	-0,145	0,710	-0,472	5482769,9
29	390,86	626,62	1316,46	-0,169	0,471	-0,690	127222,5
30	250,62	500,55	1426,13	-0,155	0,656	-0,507	8238465,3
31	301,60	739,35	1862,48	-0,156	0,554	-0,530	2022885,5
32	264,20	554,45	1375,63	-0,161	0,637	-0,636	752303,8
33	415,28	532,96	1286,14	-0,156	0,743	-0,462	11312589,0
34	388,52	644,20	1467,07	-0,148	0,500	-0,656	876811,1
35	309,96	477,68	1450,55	-0,123	0,673	-0,553	166597668,9
36	441,65	596,61	1270,76	-0,170	0,757	-0,696	155181,4
37	335,26	485,56	1241,54	-0,175	0,536	-0,554	908867,6
38	323,36	740,30	1627,59	-0,143	0,609	-0,449	10238236,1
39	403,23	553,51	1182,10	-0,179	0,753	-0,658	161621,4
40	409,40	671,74	1597,07	-0,119	0,611	-0,480	58548967,0
41	282,87	808,52	1756,82	-0,123	0,528	-0,493	15342624,0
42	345,87	606,91	1347,70	-0,164	0,622	-0,690	249981,6
43	336,68	706,31	1504,64	-0,125	0,637	-0,553	8455527,6
44	378,43	730,32	1594,19	-0,135	0,578	-0,409	36726945,7
45	391,55	606,97	1219,31	-0,111	0,432	-0,666	24021072,9
46	400,97	691,43	1540,26	-0,135	0,684	-0,477	11649626,3
47	385,38	796,89	1337,29	-0,147	0,567	-0,522	788210,2
48	380,26	514,05	1791,75	-0,152	0,451	-0,550	11149151,7
49	277,82	543,88	1890,65	-0,141	0,558	-0,530	43488759,0
50	268,75	745,38	1798,62	-0,160	0,513	-0,572	801348,5
51	347,66	627,80	1547,43	-0,104	0,501	-0,677	556909235,0
52	443,63	734,44	1379,81	-0,143	0,725	-0,613	617578,6
53	314,80	593,09	1725,00	-0,161	0,571	-0,532	3283944,0
54	365,74	546,44	1348,85	-0,146	0,447	-0,510	478888,5
55	400,26	698,18	1631,75	-0,148	0,711	-0,407	38634557,7
56	297,06	605,80	1616,99	-0,167	0,487	-0,672	519549,5
57	349,24	614,21	1301,38	-0,110	0,761	-0,501	82248705,0
58	389,41	674,14	1240,68	-0,133	0,544	-0,519	2717351,6
59	429,31	465,51	1362,38	-0,151	0,548	-0,558	5117983,1
60	443,53	562,69	1807,63	-0,163	0,502	-0,593	2156215,3
61	357,82	735,86	1846,37	-0,164	0,708	-0,557	1114037,3

62	272,83	706,95	1690,33	-0,138	0,453	-0,499	7021389,8
63	275,05	490,50	1709,18	-0,146	0,775	-0,412	230393430,0
64	297,56	492,33	1343,66	-0,120	0,485	-0,673	94547212,1
65	418,87	478,00	1599,13	-0,176	0,532	-0,461	8365032,9
66	413,37	603,36	1472,04	-0,125	0,479	-0,426	74755817,9
67	294,65	691,46	1903,47	-0,171	0,614	-0,670	470599,9
68	437,29	716,99	1240,42	-0,110	0,691	-0,612	7319099,5
69	316,80	644,33	1410,85	-0,165	0,767	-0,685	245344,6
70	284,89	484,24	1551,42	-0,131	0,695	-0,549	81861260,8
71	296,23	682,44	1218,73	-0,136	0,701	-0,469	6916619,7
72	372,14	490,94	1709,56	-0,168	0,576	-0,615	2282544,2
73	342,44	493,90	1584,74	-0,182	0,515	-0,632	619600,7
74	365,73	506,77	1807,76	-0,147	0,735	-0,479	51025662,5
75	358,34	517,38	1756,30	-0,177	0,670	-0,547	2364142,8
76	434,78	563,32	1408,56	-0,133	0,726	-0,585	9135041,4
77	303,45	562,93	1507,73	-0,167	0,718	-0,428	21878655,0
78	400,78	538,14	1255,08	-0,137	0,540	-0,512	7614024,9
79	323,13	781,42	1254,99	-0,161	0,679	-0,660	91423,7
80	362,11	709,52	1373,17	-0,105	0,788	-0,515	66908944,4
81	259,78	653,62	1561,18	-0,118	0,709	-0,585	43577471,1
82	354,41	523,36	1698,28	-0,176	0,685	-0,614	1100892,4
83	406,07	472,31	1404,15	-0,167	0,645	-0,488	6728951,0
84	438,27	789,33	1389,10	-0,120	0,703	-0,539	4175023,7
85	271,02	710,85	1801,56	-0,123	0,609	-0,642	28137273,3
86	362,32	654,40	1846,80	-0,117	0,744	-0,493	253850069,1
87	341,63	561,79	1645,79	-0,140	0,452	-0,685	9912985,2
88	246,48	505,99	1362,46	-0,146	0,781	-0,645	3827067,9
89	314,12	678,93	1239,44	-0,131	0,463	-0,686	932761,3
90	277,73	817,43	1792,63	-0,110	0,627	-0,434	152388562,9
91	409,21	507,59	1605,52	-0,126	0,574	-0,448	249423153,4
92	308,73	540,70	1873,70	-0,138	0,466	-0,665	43327630,9
93	353,93	593,39	1219,04	-0,157	0,692	-0,577	778514,3
94	278,45	471,04	1605,47	-0,123	0,652	-0,664	368912327,2
95	369,21	702,27	1384,41	-0,150	0,714	-0,528	1558966,6
96	298,70	595,51	1784,87	-0,134	0,634	-0,415	161203522,5
97	380,05	815,49	1314,95	-0,107	0,724	-0,623	5138586,4
98	399,62	678,23	1464,34	-0,107	0,773	-0,595	93697731,5
99	261,43	587,53	1673,53	-0,114	0,613	-0,500	502061740,3
100	291,63	504,07	1327,21	-0,182	0,716	-0,408	35807787,6
101	433,97	730,32	1408,76	-0,182	0,600	-0,513	533773,1
102	275,69	773,15	1272,75	-0,175	0,730	-0,681	56300,4
103	415,77	575,94	1669,54	-0,160	0,545	-0,588	1818462,3
104	355,98	702,82	1595,39	-0,180	0,784	-0,650	172987,6
105	451,20	554,48	1299,29	-0,146	0,529	-0,631	1295396,5
106	260,26	644,11	1282,97	-0,153	0,454	-0,684	271355,8
107	336,08	758,49	1525,35	-0,137	0,702	-0,429	19994143,8
108	444,07	570,08	1581,51	-0,157	0,765	-0,588	2166790,9
109	244,96	556,41	1198,31	-0,154	0,547	-0,450	8599013,9
110	405,18	614,53	1213,75	-0,110	0,721	-0,474	68178174,3
111	414,00	603,18	1768,14	-0,153	0,624	-0,513	6453480,3
112	424,69	579,29	1507,11	-0,170	0,597	-0,582	733923,0
113	261,56	654,60	1456,39	-0,139	0,727	-0,592	2698270,6
114	327,15	724,42	1756,76	-0,110	0,775	-0,673	144588902,2
115	298,05	603,82	1442,84	-0,150	0,455	-0,597	1406174,2
116	410,41	605,73	1566,87	-0,124	0,686	-0,535	41433416,0
117	333,73	490,33	1699,20	-0,129	0,513	-0,562	154908430,7
118	433,41	452,26	1817,15	-0,144	0,573	-0,506	72548574,3
119	281,82	552,98	1416,57	-0,142	0,525	-0,546	6009554,6
120	274,27	690,75	1893,43	-0,175	0,791	-0,671	391858,7
121	272,30	805,68	1230,06	-0,158	0,665	-0,561	281060,7
122	424,81	797,64	1607,22	-0,144	0,685	-0,523	1812202,4
123	364,58	616,54	1479,45	-0,133	0,768	-0,644	5960022,6
124	358,37	534,14	1402,14	-0,108	0,679	-0,517	528966590,3
125	274,15	732,52	1368,71	-0,143	0,635	-0,684	411691,9
126	421,43	730,79	1733,97	-0,145	0,566	-0,527	2950375,3
127	373,39	723,71	1908,47	-0,119	0,659	-0,447	151653174,6
128	317,00	724,86	1311,69	-0,143	0,560	-0,550	952706,1
129	327,58	701,31	1318,50	-0,143	0,562	-0,655	459412,2



130	259,80	618,58	1906,36	-0,140	0,598	-0,692	14739813,4
131	293,90	523,41	1766,07	-0,141	0,611	-0,473	62584959,7
132	269,65	480,34	1487,08	-0,163	0,760	-0,461	20683817,7
133	282,25	755,13	1711,90	-0,175	0,503	-0,612	211792,7
134	293,91	509,33	1541,78	-0,176	0,551	-0,665	576944,7
135	254,33	695,41	1437,10	-0,162	0,605	-0,451	4580139,7
136	431,76	781,97	1228,05	-0,110	0,523	-0,447	16992111,0
137	440,52	638,78	1610,15	-0,122	0,639	-0,500	48278263,5
138	314,25	804,36	1493,09	-0,170	0,588	-0,666	84035,0
139	320,80	700,62	1202,92	-0,100	0,633	-0,556	43572812,0
140	406,29	749,69	1737,59	-0,107	0,708	-0,431	391835958,5
141	325,07	726,73	1586,41	-0,141	0,512	-0,551	2085354,5
142	294,27	488,55	1309,68	-0,181	0,642	-0,469	5398344,4
143	328,01	641,99	1541,49	-0,130	0,595	-0,682	7878761,7
144	264,06	566,49	1556,17	-0,163	0,742	-0,621	1273830,0
145	271,45	650,10	1907,75	-0,138	0,669	-0,505	26806908,7
146	439,95	594,18	1804,88	-0,121	0,557	-0,660	150782432,9
147	442,88	600,32	1884,25	-0,131	0,554	-0,508	64400100,8
148	363,64	511,50	1675,06	-0,133	0,520	-0,585	59842243,9
149	256,43	539,79	1471,78	-0,146	0,776	-0,470	24807193,1
150	292,83	450,78	1864,01	-0,161	0,536	-0,504	20710570,3
151	317,46	793,07	1527,86	-0,146	0,485	-0,586	559439,7
152	414,81	690,75	1345,06	-0,181	0,559	-0,610	126773,0
153	247,20	796,46	1466,46	-0,131	0,698	-0,598	1498041,4
154	279,15	792,10	1586,22	-0,174	0,684	-0,563	334814,4
155	379,02	744,18	1732,39	-0,179	0,429	-0,567	260863,0
156	378,73	609,77	1884,27	-0,161	0,757	-0,416	45635216,7
157	337,79	540,64	1568,88	-0,181	0,544	-0,634	418113,0
158	357,78	727,99	1885,34	-0,114	0,646	-0,435	316862713,8
159	305,63	529,67	1259,33	-0,170	0,536	-0,694	240504,3
160	398,90	467,33	1211,97	-0,108	0,473	-0,597	379731828,8
161	283,30	733,82	1398,61	-0,174	0,569	-0,470	1516662,0
162	386,85	697,39	1602,18	-0,152	0,726	-0,597	1033163,8
163	282,17	714,07	1565,85	-0,132	0,786	-0,514	8996837,7
164	320,64	686,34	1839,09	-0,133	0,742	-0,564	15951071,2
165	374,13	601,82	1572,93	-0,126	0,458	-0,697	23427726,3
166	406,29	591,10	1492,80	-0,128	0,551	-0,520	23344241,2
167	260,87	752,32	1574,49	-0,146	0,513	-0,520	1900553,0
168	437,31	563,31	1699,76	-0,170	0,543	-0,505	2996378,8
169	405,35	751,71	1186,31	-0,119	0,787	-0,597	1718517,9
170	345,25	742,06	1765,08	-0,162	0,628	-0,552	984454,2
171	334,66	766,01	1279,17	-0,127	0,701	-0,489	4727793,2
172	336,93	634,64	1527,11	-0,110	0,735	-0,434	425110455,4
173	307,72	683,92	1363,54	-0,175	0,488	-0,683	82850,6
174	349,77	803,39	1446,39	-0,100	0,758	-0,670	41101496,4
175	350,24	611,26	1662,38	-0,179	0,465	-0,505	1288092,8
176	409,32	771,50	1379,74	-0,112	0,694	-0,404	103822996,3
177	378,02	682,22	1320,29	-0,178	0,690	-0,662	97816,8
178	322,75	577,57	1317,96	-0,136	0,476	-0,591	3567359,5
179	412,81	820,86	1415,21	-0,103	0,590	-0,497	29941997,5
180	354,83	527,96	1823,69	-0,155	0,613	-0,587	7476656,2
181	316,95	690,28	1521,67	-0,114	0,621	-0,441	111647686,4
182	439,31	672,29	1472,13	-0,131	0,742	-0,612	3645779,4
183	426,20	589,77	1306,27	-0,116	0,675	-0,660	25339748,7
184	373,47	452,53	1474,70	-0,178	0,621	-0,639	844526,9
185	366,11	602,60	1797,23	-0,158	0,777	-0,439	27272093,9
186	287,21	512,77	1628,11	-0,127	0,451	-0,475	166841885,6
187	306,66	718,07	1451,94	-0,141	0,625	-0,574	1422114,8
188	291,94	761,95	1753,22	-0,119	0,603	-0,655	21605634,3
189	419,62	721,27	1517,14	-0,134	0,678	-0,618	2003403,0
190	284,51	659,42	1774,71	-0,157	0,503	-0,438	11543539,5
191	290,99	510,03	1837,05	-0,160	0,650	-0,520	11095460,2
192	279,51	805,85	1490,78	-0,108	0,546	-0,604	18686609,7
193	291,35	543,56	1420,74	-0,144	0,749	-0,615	4012702,5
194	334,63	793,42	1614,33	-0,113	0,476	-0,569	18043490,8
195	308,71	527,81	1839,67	-0,174	0,464	-0,429	16508003,3
196	333,48	476,16	1452,56	-0,180	0,483	-0,548	1237470,3
197	282,44	685,60	1716,40	-0,106	0,483	-0,512	464980801,5

198	447,79	460,07	1574,60	-0,138	0,460	-0,693	31936747,0
199	335,28	717,08	1572,60	-0,172	0,593	-0,528	735484,0
200	297,68	693,37	1226,57	-0,123	0,731	-0,573	3349302,5
201	329,01	588,49	1308,30	-0,112	0,716	-0,560	62774972,9
202	367,74	680,76	1242,63	-0,179	0,688	-0,693	60767,6
203	369,39	788,11	1180,89	-0,102	0,686	-0,423	64640045,7
204	391,93	746,41	1849,29	-0,153	0,778	-0,540	2367747,4
205	290,12	725,68	1648,34	-0,128	0,612	-0,590	7289852,6
206	268,42	751,17	1175,05	-0,153	0,539	-0,591	210297,4
207	305,71	588,27	1196,42	-0,164	0,716	-0,655	258847,8
208	310,31	676,95	1327,85	-0,116	0,514	-0,655	9614658,3
209	332,23	661,11	1509,77	-0,121	0,513	-0,595	17453587,8
210	349,63	643,89	1267,92	-0,159	0,597	-0,599	395055,6
211	261,79	547,25	1180,38	-0,133	0,654	-0,465	21110847,6
212	298,60	537,23	1710,58	-0,147	0,652	-0,554	13261993,3
213	410,61	614,17	1435,34	-0,174	0,472	-0,561	454308,1
214	250,08	529,30	1749,97	-0,180	0,472	-0,661	683056,2
215	437,20	747,89	1496,25	-0,141	0,531	-0,434	9332460,1
216	395,91	816,73	1496,18	-0,159	0,696	-0,498	1227703,0
217	345,63	454,37	1210,32	-0,153	0,578	-0,449	19547931,3
218	364,33	646,02	1210,63	-0,158	0,730	-0,503	1895694,8
219	293,35	476,00	1241,23	-0,168	0,769	-0,405	69439244,5
220	339,44	746,99	1612,40	-0,148	0,573	-0,406	20609059,4
221	444,32	817,89	1351,92	-0,123	0,446	-0,625	864970,7
222	357,74	468,37	1794,93	-0,165	0,636	-0,513	11284905,9
223	352,40	799,03	1806,62	-0,126	0,701	-0,482	19575139,2
224	292,17	449,89	1885,15	-0,145	0,544	-0,551	81995695,1
225	345,69	702,17	1534,81	-0,146	0,607	-0,445	10490907,1
226	373,80	740,04	1336,59	-0,167	0,508	-0,643	101496,5
227	385,26	645,44	1340,94	-0,166	0,771	-0,663	219931,6
228	326,27	778,55	1570,15	-0,130	0,604	-0,699	1751657,1
229	320,43	783,72	1736,44	-0,159	0,625	-0,654	328561,9
230	449,50	680,23	1430,50	-0,135	0,508	-0,540	3011233,5
231	428,11	525,55	1645,82	-0,122	0,449	-0,584	177353919,4
232	433,96	512,03	1850,99	-0,125	0,727	-0,607	345575101,9
233	298,47	676,63	1600,37	-0,131	0,755	-0,508	15653853,1
234	313,75	799,13	1493,77	-0,102	0,677	-0,565	50703247,2
235	385,38	577,34	1826,57	-0,177	0,667	-0,627	796130,5
236	272,40	598,63	1464,07	-0,159	0,789	-0,459	11162667,3
237	394,02	816,07	1306,08	-0,099	0,439	-0,453	39548654,4
238	266,21	801,37	1641,40	-0,117	0,582	-0,444	42020347,4
239	379,98	699,45	1634,51	-0,142	0,606	-0,560	2815287,5
240	346,79	817,57	1416,02	-0,125	0,641	-0,409	30140221,2
241	406,04	733,63	1766,59	-0,147	0,457	-0,448	7716174,3
242	392,73	570,61	1911,61	-0,150	0,669	-0,676	7621288,6
243	431,97	694,04	1897,96	-0,164	0,446	-0,629	678886,2
244	429,31	535,54	1267,75	-0,150	0,631	-0,455	12874863,9
245	313,51	555,00	1345,39	-0,180	0,688	-0,578	552363,9
246	389,34	700,79	1191,44	-0,142	0,606	-0,560	729432,6
247	285,14	643,05	1622,29	-0,154	0,653	-0,415	31368082,7
248	398,77	671,40	1474,71	-0,135	0,663	-0,470	12379282,4
249	348,00	727,45	1826,45	-0,111	0,566	-0,528	188669809,6
250	343,82	664,16	1578,52	-0,148	0,465	-0,425	14527303,4
251	432,18	652,13	1446,32	-0,143	0,565	-0,551	2165408,7
252	370,85	664,17	1327,76	-0,113	0,523	-0,650	17132014,8
253	422,76	474,30	1879,67	-0,138	0,655	-0,611	101585274,5
254	411,54	715,72	1265,53	-0,104	0,618	-0,533	27426412,1
255	363,96	820,54	1521,42	-0,120	0,578	-0,680	2800733,4
256	282,05	577,37	1806,39	-0,134	0,507	-0,679	34003579,3
257	293,91	811,11	1206,02	-0,101	0,741	-0,650	6782340,4
258	345,90	615,33	1383,05	-0,128	0,652	-0,487	20212951,0
259	278,93	599,69	1272,73	-0,150	0,712	-0,409	40482837,5
260	447,57	525,52	1679,74	-0,142	0,776	-0,400	244571986,5
261	348,10	560,08	1624,82	-0,181	0,568	-0,655	371316,7
262	341,99	718,19	1838,19	-0,169	0,487	-0,412	9912516,0
263	256,40	739,71	1316,75	-0,142	0,719	-0,541	1321553,2
264	385,85	705,95	1730,77	-0,136	0,469	-0,678	3699462,7
265	252,83	446,72	1429,54	-0,177	0,485	-0,606	1033166,0

266	258,86	762,58	1482,95	-0,127	0,557	-0,431	21961071,3
267	352,50	792,56	1288,92	-0,107	0,737	-0,450	35515459,4
268	264,12	735,19	1778,42	-0,173	0,640	-0,699	197757,6
269	414,17	459,17	1635,19	-0,145	0,642	-0,508	36630440,1
270	414,05	586,33	1719,06	-0,158	0,766	-0,459	16065341,8
271	275,17	719,49	1223,61	-0,131	0,431	-0,681	565906,8
272	381,20	528,00	1875,68	-0,161	0,723	-0,621	4658051,6
273	351,87	544,97	1541,21	-0,171	0,650	-0,669	576234,3
274	446,38	698,08	1731,30	-0,136	0,603	-0,555	6141747,1
275	378,99	623,97	1721,89	-0,112	0,525	-0,574	318889178,4
276	410,47	679,39	1787,37	-0,112	0,521	-0,586	218402091,8
277	338,39	532,61	1289,50	-0,112	0,603	-0,434	343948887,4
278	333,94	510,13	1511,49	-0,165	0,510	-0,574	1808268,2
279	415,67	757,43	1630,16	-0,136	0,445	-0,615	1651524,0
280	261,36	733,66	1861,95	-0,109	0,489	-0,686	310220253,4
281	271,70	797,17	1790,30	-0,172	0,522	-0,634	188471,6
282	416,93	480,56	1604,07	-0,164	0,728	-0,489	11506180,4
283	411,10	628,62	1804,94	-0,176	0,724	-0,698	378685,3
284	256,58	516,24	1199,73	-0,142	0,721	-0,517	7519977,7
285	327,05	782,54	1827,44	-0,112	0,686	-0,578	75771461,4
286	353,59	480,55	1474,91	-0,143	0,742	-0,625	11370725,7
287	330,69	459,74	1200,85	-0,147	0,713	-0,504	10627466,9
288	380,63	654,21	1724,66	-0,140	0,502	-0,604	5198868,1
289	374,62	735,78	1288,26	-0,171	0,791	-0,669	88604,4
290	304,73	561,23	1280,20	-0,171	0,461	-0,539	739999,6
291	247,22	571,46	1361,81	-0,131	0,506	-0,435	45245621,7
292	448,69	522,65	1413,23	-0,160	0,516	-0,500	3875652,7
293	278,77	636,35	1470,52	-0,109	0,551	-0,446	262901846,5
294	266,09	786,51	1473,90	-0,177	0,499	-0,471	966775,0
295	321,46	681,36	1459,01	-0,144	0,613	-0,458	8819636,1
296	285,21	481,48	1624,03	-0,121	0,775	-0,510	547005408,1
297	345,86	591,13	1297,17	-0,154	0,571	-0,487	3716683,2
298	314,61	463,70	1312,81	-0,148	0,641	-0,493	14438667,7
299	441,94	632,99	1243,84	-0,138	0,649	-0,604	1228548,8
300	435,43	606,62	1412,51	-0,107	0,689	-0,541	192333113,4
301	254,96	821,08	1741,96	-0,117	0,574	-0,438	56155731,9
302	397,47	750,60	1346,78	-0,176	0,741	-0,684	65133,4
303	299,98	627,06	1720,39	-0,159	0,764	-0,550	2864831,0
304	331,95	782,00	1685,30	-0,150	0,702	-0,570	1050178,0
305	440,09	590,81	1785,05	-0,147	0,719	-0,511	13240048,7
306	330,89	794,47	1390,51	-0,162	0,479	-0,405	6232545,1
307	448,47	790,73	1402,31	-0,132	0,612	-0,524	2004278,9
308	306,70	713,44	1560,00	-0,142	0,651	-0,448	12933957,2
309	389,83	677,35	1414,07	-0,107	0,685	-0,559	75217381,2
310	356,14	797,75	1772,00	-0,113	0,694	-0,646	34121559,9
311	389,21	490,29	1585,06	-0,122	0,752	-0,510	291658810,0
312	382,64	719,89	1368,07	-0,120	0,447	-0,411	39735015,0
313	281,05	688,01	1676,26	-0,106	0,478	-0,540	346625835,4
314	270,63	758,76	1346,44	-0,177	0,743	-0,556	322852,8
315	451,81	593,95	1510,84	-0,154	0,581	-0,462	8599010,9
316	279,59	727,18	1457,81	-0,182	0,578	-0,672	75429,5
317	250,78	759,55	1571,49	-0,112	0,778	-0,436	118306169,1
318	360,73	565,21	1905,88	-0,139	0,702	-0,699	27793175,0
319	427,43	652,31	1731,35	-0,151	0,786	-0,547	3654266,1
320	383,19	814,09	1897,58	-0,163	0,512	-0,496	1347286,7
321	283,61	651,19	1347,27	-0,137	0,462	-0,530	2968765,4
322	320,73	568,23	1564,08	-0,158	0,568	-0,556	2480743,8
323	339,83	677,78	1211,96	-0,176	0,610	-0,604	149346,6
324	448,18	579,68	1732,57	-0,175	0,636	-0,520	2162683,7
325	276,53	729,72	1618,26	-0,176	0,784	-0,426	10167103,5
326	421,95	599,87	1806,59	-0,148	0,607	-0,495	13247902,4
327	378,11	629,60	1903,35	-0,172	0,574	-0,416	18551238,3
328	322,26	706,31	1859,96	-0,145	0,791	-0,670	2859020,6
329	283,71	811,67	1476,22	-0,106	0,523	-0,547	21939502,5
330	344,26	760,53	1573,17	-0,172	0,780	-0,536	699466,5
331	269,09	723,11	1327,31	-0,134	0,673	-0,493	4599536,4
332	366,62	804,63	1335,83	-0,108	0,536	-0,656	5182278,6
333	291,05	455,10	1414,45	-0,153	0,621	-0,467	24749801,2

334	324,00	578,25	1244,81	-0,178	0,428	-0,580	249740,7
335	365,26	694,15	1725,68	-0,170	0,750	-0,431	11949555,4
336	296,38	549,69	1726,40	-0,176	0,575	-0,608	980128,3
337	304,41	530,32	1574,95	-0,120	0,537	-0,682	187982954,3
338	372,35	712,52	1423,54	-0,144	0,775	-0,634	738402,1
339	299,18	679,71	1788,26	-0,126	0,596	-0,675	26392162,6
340	415,47	666,84	1581,80	-0,123	0,532	-0,415	93845474,6
341	448,39	693,31	1880,67	-0,134	0,458	-0,695	9446444,7
342	395,89	461,02	1832,91	-0,129	0,640	-0,666	374379981,9
343	315,53	575,19	1437,10	-0,108	0,483	-0,696	296764367,1
344	365,49	614,06	1577,24	-0,126	0,454	-0,635	20145110,6
345	432,51	714,00	1633,63	-0,143	0,532	-0,507	3715185,8
346	426,97	767,49	1761,91	-0,170	0,559	-0,545	553051,0
347	414,09	549,69	1724,46	-0,176	0,692	-0,626	820969,7
348	298,23	720,07	1266,65	-0,122	0,741	-0,642	2148891,2
349	367,63	495,21	1780,93	-0,156	0,554	-0,673	6534497,4
350	248,68	760,12	1192,56	-0,126	0,779	-0,589	1189591,9
351	332,45	495,53	1479,85	-0,127	0,776	-0,698	60279550,3
352	309,05	665,93	1713,78	-0,137	0,502	-0,519	9718121,8
353	277,59	581,77	1750,65	-0,122	0,708	-0,556	172396910,1
354	281,18	748,76	1445,06	-0,140	0,652	-0,608	935552,5
355	331,96	633,93	1723,71	-0,141	0,763	-0,477	22482082,5
356	263,60	628,56	1832,49	-0,140	0,648	-0,448	46859266,0
357	368,49	775,40	1353,04	-0,103	0,684	-0,621	19593052,3
358	341,95	576,84	1269,64	-0,149	0,699	-0,546	2224055,6
359	388,76	613,34	1340,10	-0,172	0,568	-0,566	461439,4
360	389,58	808,18	1432,31	-0,162	0,519	-0,598	166743,0
361	376,81	459,03	1385,87	-0,124	0,440	-0,448	199609485,6
362	250,99	811,75	1858,49	-0,112	0,600	-0,405	276256103,0
363	310,48	695,84	1611,39	-0,164	0,529	-0,646	338466,4
364	354,42	665,26	1294,22	-0,118	0,617	-0,663	6464005,0
365	380,12	698,87	1792,74	-0,133	0,517	-0,526	12488382,8
366	328,78	579,83	1297,66	-0,148	0,536	-0,601	1193914,8
367	414,56	678,09	1544,62	-0,139	0,665	-0,620	2165453,8
368	393,42	750,43	1911,51	-0,140	0,753	-0,535	6417674,7
369	445,48	450,30	1436,29	-0,127	0,742	-0,646	84131122,9
370	354,52	474,79	1208,74	-0,120	0,504	-0,496	83294417,7
371	311,63	812,45	1331,68	-0,157	0,573	-0,683	81917,3
372	265,97	689,86	1467,61	-0,174	0,752	-0,690	132323,0
373	371,08	530,64	1420,25	-0,113	0,521	-0,614	238575609,4
374	262,89	544,74	1678,19	-0,167	0,488	-0,446	11449319,5
375	299,43	540,72	1884,04	-0,173	0,729	-0,581	2453621,0
376	335,54	574,89	1178,31	-0,098	0,519	-0,575	322313627,6
377	339,14	778,09	1765,19	-0,179	0,512	-0,578	241924,0
378	426,08	478,73	1345,94	-0,136	0,559	-0,414	113629858,3
379	440,27	594,23	1737,29	-0,139	0,788	-0,415	128093088,6
380	443,20	572,76	1597,22	-0,176	0,704	-0,613	582314,3
381	384,63	744,18	1416,83	-0,104	0,600	-0,637	36501865,8
382	304,13	649,52	1338,91	-0,135	0,485	-0,661	1608289,5
383	383,74	703,08	1404,54	-0,146	0,724	-0,544	1576539,6
384	388,59	781,69	1605,38	-0,154	0,601	-0,428	7930181,9
385	297,00	558,09	1388,36	-0,181	0,748	-0,635	312780,1
386	290,60	460,51	1471,09	-0,151	0,659	-0,676	6057866,3
387	419,63	715,94	1627,68	-0,136	0,759	-0,519	6501462,8
388	315,65	716,54	1905,50	-0,142	0,440	-0,587	4462513,6
389	406,35	775,69	1324,33	-0,140	0,442	-0,501	1212683,0
390	384,47	663,74	1784,48	-0,156	0,789	-0,462	11740962,9
391	369,25	792,72	1357,72	-0,100	0,565	-0,492	50182197,9
392	324,45	746,34	1525,13	-0,139	0,612	-0,639	1048846,7
393	244,24	649,05	1616,39	-0,144	0,445	-0,486	7275514,9
394	340,19	816,23	1764,79	-0,146	0,693	-0,650	710887,0
395	332,26	714,24	1251,54	-0,164	0,684	-0,567	356721,0
396	339,87	760,97	1780,22	-0,166	0,595	-0,510	1309331,1
397	311,07	621,37	1435,63	-0,121	0,551	-0,541	26129737,5
398	407,23	655,51	1491,39	-0,138	0,489	-0,512	5131036,7
399	251,44	726,88	1691,21	-0,139	0,764	-0,423	40457776,2
400	280,58	633,97	1721,94	-0,136	0,510	-0,654	10249397,6
401	394,13	688,14	1733,32	-0,164	0,559	-0,578	778143,5

402	342,49	559,64	1461,18	-0,133	0,546	-0,606	11794426,2
403	275,77	495,58	1490,83	-0,170	0,458	-0,492	3983512,2
404	314,95	623,24	1879,78	-0,178	0,615	-0,433	11333288,4
405	370,34	580,37	1596,85	-0,125	0,732	-0,553	55234848,4
406	283,88	741,69	1801,09	-0,131	0,758	-0,458	33543205,6
407	397,59	738,73	1377,94	-0,164	0,692	-0,602	249891,0
408	294,51	696,37	1633,27	-0,148	0,567	-0,535	2521134,5
409	434,82	493,60	1608,21	-0,129	0,536	-0,583	84201289,7
410	403,22	655,18	1237,40	-0,171	0,749	-0,497	1515099,3
411	283,24	557,01	1543,37	-0,168	0,765	-0,451	13867779,9
412	303,80	799,04	1558,93	-0,182	0,457	-0,667	54330,4
413	262,95	814,76	1240,54	-0,147	0,604	-0,616	184556,6
414	363,85	551,63	1841,64	-0,141	0,474	-0,470	47503372,8
415	386,14	746,51	1826,68	-0,169	0,520	-0,635	310522,0
416	357,69	782,63	1497,97	-0,126	0,751	-0,690	1913655,6
417	332,55	669,46	1750,91	-0,180	0,499	-0,569	446497,2
418	378,04	778,04	1283,57	-0,172	0,471	-0,419	3052275,2
419	378,70	800,67	1631,42	-0,102	0,626	-0,621	100959903,0
420	385,24	651,13	1366,34	-0,100	0,542	-0,529	264302845,2
421	376,24	719,06	1502,89	-0,179	0,567	-0,592	193275,1
422	440,60	661,59	1796,87	-0,141	0,717	-0,692	4753131,1
423	391,53	612,24	1398,24	-0,162	0,676	-0,452	7696013,6
424	293,14	687,95	1530,67	-0,112	0,580	-0,622	54161452,0
425	268,83	640,54	1423,31	-0,114	0,662	-0,686	42200934,7
426	370,32	584,11	1763,28	-0,129	0,505	-0,626	48194219,1
427	337,63	798,17	1902,77	-0,182	0,653	-0,502	965865,1
428	339,41	757,39	1291,38	-0,150	0,674	-0,601	321293,2
429	381,68	764,80	1348,82	-0,106	0,647	-0,502	26937761,4
430	404,22	584,19	1692,25	-0,125	0,554	-0,696	60128187,4
431	316,85	667,82	1451,10	-0,150	0,560	-0,485	3679731,5
432	381,70	773,70	1892,59	-0,129	0,490	-0,583	9582050,0
433	330,56	796,80	1891,56	-0,162	0,718	-0,690	342132,2
434	419,12	696,35	1649,05	-0,134	0,607	-0,578	5157027,8
435	297,34	690,81	1470,59	-0,111	0,711	-0,424	213250294,9
436	371,60	470,31	1640,36	-0,158	0,514	-0,405	78916069,4
437	356,47	695,77	1586,89	-0,152	0,726	-0,431	16805702,0
438	299,07	750,35	1705,61	-0,175	0,562	-0,460	2371213,5
439	310,16	626,64	1531,22	-0,161	0,567	-0,534	1613877,5
440	268,80	729,81	1645,60	-0,114	0,742	-0,574	49239113,5
441	439,48	601,06	1829,08	-0,175	0,597	-0,662	561661,9
442	378,27	811,31	1320,67	-0,137	0,636	-0,504	1618906,7
443	343,73	817,44	1465,78	-0,115	0,681	-0,441	31426471,9
444	376,98	770,51	1906,23	-0,120	0,779	-0,618	32876299,8
445	357,30	590,39	1470,94	-0,170	0,627	-0,448	7458943,3
446	378,64	615,35	1660,24	-0,145	0,660	-0,679	3105384,0
447	357,13	536,49	1839,19	-0,153	0,636	-0,586	8996512,6
448	393,98	740,30	1908,59	-0,142	0,766	-0,620	3506172,7
449	352,68	777,60	1656,03	-0,133	0,743	-0,654	2218631,8
450	450,69	789,30	1254,03	-0,170	0,489	-0,511	346409,2
451	289,48	654,59	1200,65	-0,106	0,492	-0,605	26499420,3
452	266,01	669,97	1630,15	-0,128	0,516	-0,412	81132269,3
453	266,82	499,42	1592,55	-0,168	0,702	-0,550	3319758,0
454	257,23	783,99	1883,93	-0,134	0,500	-0,478	11612998,8
455	320,09	783,97	1560,21	-0,124	0,491	-0,527	5739468,5
456	402,81	732,02	1365,80	-0,143	0,741	-0,458	6962192,7
457	374,60	777,46	1883,95	-0,160	0,760	-0,504	2513259,7
458	404,57	551,00	1572,67	-0,134	0,779	-0,437	106538945,3
459	438,03	698,15	1196,34	-0,161	0,636	-0,429	6310466,8
460	446,33	694,76	1687,88	-0,155	0,633	-0,654	687703,4
461	272,89	597,37	1217,56	-0,108	0,615	-0,463	131983081,1
462	263,51	714,62	1417,69	-0,104	0,487	-0,583	72129920,3
463	353,28	550,40	1343,52	-0,167	0,608	-0,610	577857,1
464	354,31	782,66	1258,09	-0,139	0,623	-0,480	2486645,6
465	423,12	756,27	1403,46	-0,129	0,500	-0,669	1035398,9
466	344,85	590,82	1342,58	-0,105	0,655	-0,462	372129479,1
467	325,84	631,71	1655,17	-0,126	0,437	-0,465	51460744,4
468	383,66	706,33	1222,83	-0,149	0,544	-0,540	670217,0
469	398,18	759,23	1377,27	-0,120	0,622	-0,624	2950533,9

470	352,17	674,05	1381,98	-0,113	0,547	-0,679	19121740,7
471	316,32	660,83	1823,49	-0,132	0,647	-0,512	30215926,6
472	275,20	566,57	1501,92	-0,175	0,559	-0,693	302695,8
473	298,53	713,53	1619,23	-0,177	0,761	-0,661	172876,7
474	253,25	778,19	1752,05	-0,138	0,661	-0,565	3238225,7
475	401,03	716,20	1258,08	-0,172	0,668	-0,498	942949,8
476	294,50	450,05	1896,18	-0,150	0,674	-0,443	150054518,1
477	336,02	698,74	1800,26	-0,114	0,700	-0,550	151045164,3
478	387,06	609,19	1211,38	-0,161	0,735	-0,685	194378,5
479	318,72	608,93	1518,06	-0,108	0,616	-0,606	326143057,9
480	397,16	487,36	1414,33	-0,122	0,483	-0,508	125041795,0
481	326,10	751,76	1639,09	-0,150	0,566	-0,464	4605171,6
482	386,15	566,12	1343,96	-0,161	0,727	-0,613	738244,7
483	390,44	536,32	1601,96	-0,161	0,490	-0,551	2702267,9
484	336,00	572,89	1619,13	-0,118	0,548	-0,454	311721422,1
485	248,07	585,39	1616,71	-0,178	0,781	-0,521	2150871,4
486	312,82	650,14	1504,94	-0,124	0,722	-0,539	19188063,3
487	332,26	655,97	1200,14	-0,130	0,508	-0,601	1504567,9
488	300,22	593,02	1553,20	-0,119	0,793	-0,576	80936419,1
489	414,92	638,32	1253,74	-0,150	0,583	-0,597	583878,6
490	333,42	692,20	1513,39	-0,160	0,575	-0,561	727651,9
491	428,66	803,40	1506,75	-0,108	0,574	-0,590	16494351,3
492	325,37	716,77	1580,74	-0,114	0,468	-0,496	47859658,4
493	403,98	594,63	1768,39	-0,143	0,582	-0,530	12214984,7
494	326,53	758,28	1691,23	-0,174	0,652	-0,504	1089563,9
495	412,17	493,91	1817,71	-0,135	0,789	-0,553	111894892,8
496	401,06	465,92	1212,52	-0,166	0,507	-0,580	951152,6
497	322,50	474,93	1336,12	-0,137	0,557	-0,557	15065695,3
498	288,93	505,12	1513,22	-0,152	0,524	-0,680	3379377,6
499	408,40	565,88	1881,40	-0,156	0,534	-0,577	5446139,2
500	312,13	447,43	1507,48	-0,139	0,435	-0,466	72571606,8
501	383,62	647,62	1420,07	-0,116	0,591	-0,481	52307190,8
502	335,24	479,15	1217,61	-0,165	0,516	-0,470	5589975,7
503	417,37	498,53	1720,79	-0,125	0,745	-0,473	397291650,3
504	278,79	768,68	1321,54	-0,115	0,762	-0,469	20084740,1
505	423,29	812,23	1489,27	-0,125	0,783	-0,406	50400168,2
506	449,89	659,35	1298,49	-0,103	0,641	-0,667	69252196,8
507	351,00	820,81	1728,75	-0,174	0,471	-0,581	191698,0
508	427,93	652,79	1445,84	-0,106	0,766	-0,552	145848373,0
509	366,31	638,36	1869,06	-0,139	0,644	-0,623	11167025,8
510	276,19	568,33	1186,67	-0,130	0,750	-0,689	2961690,4
511	285,57	605,97	1785,84	-0,155	0,582	-0,408	47498442,5
512	328,65	629,39	1636,42	-0,175	0,649	-0,482	2997608,1
513	415,72	779,45	1654,07	-0,170	0,765	-0,656	170560,4
514	408,31	467,50	1710,25	-0,151	0,662	-0,489	33328687,1
515	310,25	608,31	1243,73	-0,130	0,465	-0,586	3383247,8
516	262,71	592,53	1184,60	-0,139	0,572	-0,577	1819191,8
517	267,23	675,51	1391,20	-0,099	0,458	-0,657	286509998,8
518	272,35	753,26	1306,78	-0,163	0,505	-0,460	1699469,8
519	385,16	778,88	1857,61	-0,149	0,518	-0,421	13345435,4
520	347,00	795,89	1224,32	-0,123	0,510	-0,699	469418,7
521	283,46	515,31	1602,85	-0,177	0,684	-0,505	3912438,1
522	346,96	541,00	1644,22	-0,119	0,703	-0,496	328304971,0
523	274,70	783,29	1654,64	-0,147	0,627	-0,624	744393,0
524	255,43	667,88	1812,09	-0,114	0,630	-0,447	440294380,1
525	420,95	633,96	1215,29	-0,150	0,658	-0,612	492510,8
526	360,60	675,25	1776,84	-0,155	0,788	-0,692	1062600,0
527	437,36	753,56	1564,34	-0,099	0,659	-0,672	203566163,9
528	388,91	644,59	1686,43	-0,122	0,647	-0,461	103662122,2
529	365,22	519,59	1330,75	-0,147	0,760	-0,487	12607649,5
530	426,83	605,18	1692,46	-0,120	0,550	-0,513	114207271,2
531	449,69	809,13	1879,85	-0,128	0,777	-0,452	29225744,0
532	244,11	678,00	1502,07	-0,176	0,588	-0,689	130553,2
533	424,01	706,55	1237,02	-0,172	0,647	-0,578	220891,3
534	371,41	715,94	1216,32	-0,100	0,691	-0,625	30799966,1
535	449,91	574,47	1638,53	-0,140	0,675	-0,556	10917854,1
536	353,76	638,94	1761,58	-0,180	0,505	-0,436	5712204,3
537	343,74	653,99	1684,10	-0,177	0,457	-0,616	296655,3

538	410,68	502,31	1428,84	-0,170	0,527	-0,520	2212179,2
539	347,60	706,33	1557,90	-0,143	0,632	-0,653	1136934,9
540	431,38	604,63	1877,91	-0,135	0,597	-0,450	77482626,7
541	363,53	759,95	1228,31	-0,140	0,584	-0,642	256091,5
542	419,80	720,20	1326,79	-0,176	0,710	-0,451	3152374,1
543	365,89	615,15	1848,67	-0,158	0,668	-0,499	7191991,1
544	295,32	589,44	1751,52	-0,159	0,486	-0,684	1589870,4
545	382,61	736,94	1392,10	-0,132	0,585	-0,480	5644324,0
546	261,36	721,29	1286,06	-0,142	0,612	-0,550	1054567,1
547	374,20	606,08	1799,76	-0,151	0,564	-0,417	41780949,5
548	381,48	705,93	1753,22	-0,127	0,603	-0,613	14070952,2
549	395,79	801,24	1373,87	-0,103	0,552	-0,587	16820907,4
550	429,28	740,22	1342,12	-0,130	0,711	-0,666	941369,2
551	448,32	710,41	1410,92	-0,158	0,568	-0,411	11618545,2
552	403,96	484,44	1786,22	-0,165	0,687	-0,570	5366516,9
553	364,94	590,78	1780,77	-0,145	0,603	-0,675	6605519,2
554	437,09	666,95	1595,16	-0,180	0,694	-0,485	2027546,2
555	364,66	617,11	1596,01	-0,108	0,770	-0,548	405353002,7
556	247,53	462,08	1385,08	-0,131	0,616	-0,602	46704169,9
557	269,14	529,67	1689,96	-0,165	0,758	-0,474	13547946,5
558	423,44	759,16	1761,64	-0,138	0,507	-0,449	11379483,2
559	344,73	448,93	1499,89	-0,177	0,747	-0,624	1197463,0
560	419,73	770,35	1503,31	-0,110	0,457	-0,540	23024678,4
561	287,56	472,59	1517,66	-0,145	0,597	-0,569	15456428,4
562	358,88	696,57	1379,93	-0,136	0,435	-0,653	990760,1
563	375,02	632,58	1672,43	-0,134	0,723	-0,520	17549503,5
564	371,86	659,64	1844,49	-0,151	0,488	-0,668	2184815,5
565	319,38	489,31	1725,43	-0,175	0,493	-0,430	18585171,3
566	254,30	697,37	1366,26	-0,144	0,680	-0,535	1933168,1
567	345,83	670,24	1682,95	-0,178	0,505	-0,572	425221,9
568	284,04	464,21	1271,29	-0,120	0,536	-0,654	95713487,8
569	274,48	450,44	1281,55	-0,120	0,760	-0,540	176966629,9
570	252,87	758,41	1228,14	-0,139	0,587	-0,468	3306685,3
571	376,12	676,99	1780,88	-0,162	0,636	-0,435	12052196,0
572	302,63	640,13	1707,50	-0,160	0,634	-0,480	5689714,1
573	356,03	770,41	1857,28	-0,118	0,729	-0,578	37599259,0
574	347,82	787,15	1657,30	-0,152	0,537	-0,508	1523840,4
575	336,60	638,94	1571,43	-0,173	0,775	-0,551	1018145,4
576	269,78	497,26	1382,27	-0,132	0,707	-0,607	23179066,2
577	345,99	655,00	1894,26	-0,146	0,702	-0,526	9576323,0
578	421,42	444,74	1200,88	-0,121	0,478	-0,417	279630098,3
579	300,22	764,66	1892,08	-0,174	0,482	-0,690	181810,0
580	287,36	790,48	1443,39	-0,144	0,609	-0,421	11000783,2
581	361,52	817,06	1402,15	-0,128	0,723	-0,423	20438739,0
582	377,18	634,45	1263,23	-0,171	0,659	-0,593	299832,6
583	330,74	545,87	1849,84	-0,144	0,679	-0,622	18758804,8
584	286,84	481,18	1273,98	-0,127	0,661	-0,464	87380696,1
585	441,17	635,47	1419,10	-0,113	0,694	-0,547	54174085,3
586	261,07	664,95	1836,34	-0,156	0,742	-0,531	4020037,4
587	265,99	732,13	1542,74	-0,148	0,656	-0,495	3313113,7
588	278,62	693,74	1604,35	-0,123	0,637	-0,438	67572895,8
589	373,16	638,94	1689,31	-0,162	0,487	-0,417	14544719,2
590	363,33	507,83	1195,65	-0,118	0,759	-0,671	32015083,4
591	254,83	798,71	1563,58	-0,158	0,455	-0,446	2689387,5
592	437,69	666,79	1197,67	-0,159	0,551	-0,427	6446918,7
593	395,56	610,00	1784,43	-0,181	0,640	-0,697	287866,0
594	397,47	799,99	1424,91	-0,151	0,601	-0,543	612790,2
595	257,19	691,59	1798,87	-0,145	0,722	-0,505	8315130,7
596	422,97	614,29	1355,60	-0,156	0,621	-0,584	783496,2
597	438,36	761,25	1603,14	-0,158	0,510	-0,505	1177419,3
598	448,75	644,86	1866,01	-0,162	0,687	-0,471	7843850,2
599	422,66	652,92	1209,27	-0,103	0,481	-0,527	46227612,6
600	407,40	700,74	1213,84	-0,110	0,668	-0,510	16069049,1
601	280,94	533,69	1676,93	-0,142	0,511	-0,448	53660758,6
602	326,91	662,41	1615,79	-0,135	0,494	-0,572	6424715,4
603	271,86	771,55	1258,15	-0,141	0,488	-0,511	1057369,8
604	250,43	597,17	1761,63	-0,159	0,482	-0,450	11647848,1
605	306,67	611,22	1225,82	-0,167	0,777	-0,580	536330,7

606	305,47	556,77	1225,13	-0,110	0,433	-0,534	89249905,4
607	313,25	595,13	1274,37	-0,179	0,777	-0,567	527472,4
608	341,15	758,84	1756,20	-0,154	0,436	-0,673	492486,5
609	378,83	595,98	1242,19	-0,119	0,782	-0,477	39991226,3
610	249,25	590,88	1349,55	-0,128	0,536	-0,690	7550996,5
611	419,18	579,61	1353,81	-0,168	0,619	-0,571	690591,8
612	421,65	541,59	1807,46	-0,136	0,755	-0,407	314586867,9
613	316,36	475,90	1689,27	-0,161	0,496	-0,543	6954035,5
614	336,77	605,74	1715,50	-0,133	0,669	-0,427	106823708,5
615	381,86	604,02	1414,87	-0,141	0,467	-0,623	2022033,1
616	312,81	488,18	1662,39	-0,145	0,492	-0,427	87842788,4
617	430,89	630,63	1260,76	-0,156	0,700	-0,432	12336919,2
618	268,58	710,73	1283,09	-0,177	0,445	-0,580	141168,4
619	449,59	535,31	1188,59	-0,119	0,453	-0,512	26717086,9
620	356,32	740,54	1885,65	-0,171	0,606	-0,530	1045862,3
621	391,04	471,08	1890,14	-0,152	0,738	-0,432	132573098,7
622	451,89	592,28	1265,41	-0,149	0,792	-0,636	779764,4
623	330,22	526,64	1658,64	-0,180	0,626	-0,436	14056079,6
624	402,90	514,70	1730,85	-0,158	0,760	-0,627	4326133,7
625	414,19	497,00	1585,89	-0,161	0,736	-0,508	8280004,5
626	264,85	544,60	1489,71	-0,141	0,749	-0,609	7627009,1
627	281,05	509,28	1371,19	-0,121	0,700	-0,452	218146482,5
628	318,80	495,55	1730,26	-0,165	0,470	-0,435	23032423,9
629	255,79	669,98	1837,00	-0,164	0,613	-0,416	21005639,9
630	352,55	784,50	1711,59	-0,100	0,489	-0,583	316117726,8
631	313,86	799,02	1474,24	-0,132	0,731	-0,460	9133385,4
632	280,54	526,83	1866,48	-0,156	0,767	-0,653	6858581,0
633	287,46	625,93	1362,51	-0,101	0,489	-0,512	401244217,1
634	384,48	641,51	1878,61	-0,166	0,569	-0,674	814033,0
635	341,44	543,39	1371,60	-0,182	0,567	-0,541	804743,4
636	433,72	468,91	1358,56	-0,122	0,526	-0,433	262883686,3
637	399,07	508,89	1224,61	-0,172	0,698	-0,630	405880,0
638	397,14	452,89	1394,96	-0,179	0,591	-0,448	11173338,9
639	360,87	804,82	1610,59	-0,132	0,687	-0,551	2871662,4
640	282,31	606,20	1324,03	-0,131	0,773	-0,654	3933703,6
641	368,22	807,43	1643,28	-0,139	0,491	-0,631	898039,8
642	306,39	731,96	1763,20	-0,181	0,517	-0,503	856409,9
643	271,90	445,79	1544,26	-0,124	0,662	-0,531	399837833,2
644	288,22	700,73	1654,30	-0,103	0,723	-0,612	504340371,4
645	430,15	710,56	1761,41	-0,109	0,739	-0,513	251781409,9
646	258,86	687,50	1346,23	-0,172	0,573	-0,485	1350303,5
647	294,44	652,33	1617,42	-0,152	0,469	-0,616	1232718,7
648	255,18	525,66	1257,00	-0,162	0,456	-0,576	893678,9
649	335,88	735,73	1554,64	-0,135	0,559	-0,591	2227725,9
650	246,76	529,42	1792,33	-0,131	0,730	-0,466	233540083,8
651	430,62	583,56	1853,54	-0,157	0,506	-0,659	2742357,6
652	284,90	780,66	1541,69	-0,115	0,717	-0,429	72910431,4
653	263,42	767,57	1378,88	-0,115	0,667	-0,613	5663349,5
654	307,93	595,52	1655,56	-0,116	0,437	-0,550	200116622,7
655	338,86	563,53	1850,97	-0,153	0,715	-0,465	28002248,4
656	265,15	673,67	1550,26	-0,177	0,765	-0,497	1911734,7
657	451,04	787,96	1892,95	-0,122	0,607	-0,655	15496242,5
658	313,08	787,55	1319,59	-0,099	0,732	-0,491	59931474,0
659	305,85	667,21	1256,05	-0,168	0,475	-0,661	105618,9
660	256,91	569,04	1393,45	-0,172	0,705	-0,416	23731899,0
661	306,03	766,31	1466,56	-0,105	0,766	-0,434	154169778,8
662	253,64	610,67	1484,52	-0,142	0,732	-0,545	5706703,0
663	349,13	785,75	1403,87	-0,110	0,522	-0,496	16513595,7
664	375,26	644,79	1241,80	-0,166	0,618	-0,662	144422,2
665	262,70	714,55	1470,74	-0,161	0,572	-0,474	2429221,8
666	260,82	510,96	1391,84	-0,177	0,602	-0,452	7990815,8
667	405,67	570,55	1400,19	-0,131	0,791	-0,466	40818700,8
668	432,27	514,14	1251,90	-0,117	0,648	-0,643	48383957,2
669	355,02	565,01	1612,24	-0,139	0,773	-0,571	12934095,3
670	266,70	596,06	1382,65	-0,180	0,607	-0,696	137358,1
671	415,77	650,91	1288,55	-0,099	0,587	-0,602	160197946,7
672	314,32	461,47	1174,49	-0,140	0,710	-0,660	4313515,8
673	305,15	652,49	1383,29	-0,154	0,699	-0,565	1077522,4



674	399,23	547,15	1580,50	-0,167	0,589	-0,528	2420687,2
675	246,15	534,53	1816,73	-0,129	0,446	-0,462	218975927,6
676	254,08	535,15	1205,18	-0,134	0,459	-0,574	5029046,8
677	369,52	805,48	1270,66	-0,169	0,667	-0,422	4972542,4
678	353,43	797,62	1789,29	-0,152	0,439	-0,430	5997351,7
679	395,78	753,29	1764,75	-0,170	0,631	-0,537	781631,3
680	391,11	719,01	1851,40	-0,111	0,690	-0,430	501005545,4
681	406,53	509,63	1275,33	-0,154	0,467	-0,684	871438,0
682	303,90	579,58	1546,49	-0,159	0,506	-0,457	8204163,8
683	388,05	514,55	1472,86	-0,181	0,724	-0,600	655409,2
684	359,79	443,45	1302,10	-0,115	0,478	-0,631	366344698,5
685	326,48	562,92	1598,49	-0,140	0,750	-0,453	48517118,0
686	256,81	708,15	1621,39	-0,137	0,765	-0,596	3660302,7
687	406,28	679,97	1332,26	-0,109	0,432	-0,650	23770692,4
688	314,22	648,82	1557,71	-0,121	0,565	-0,692	23993224,6
689	370,44	609,40	1904,02	-0,126	0,488	-0,413	306013957,1
690	398,18	551,93	1535,56	-0,167	0,625	-0,496	3931682,1
691	265,80	633,13	1686,82	-0,136	0,464	-0,442	35970470,2
692	270,60	731,63	1477,63	-0,101	0,441	-0,418	327667287,2
693	358,30	731,95	1199,67	-0,132	0,769	-0,496	3691193,7
694	344,93	661,33	1390,11	-0,114	0,783	-0,425	160476900,0
695	410,18	687,66	1429,72	-0,108	0,663	-0,434	180003212,7
696	396,74	489,70	1235,49	-0,164	0,452	-0,424	13600994,3
697	254,68	634,17	1551,20	-0,179	0,503	-0,610	280831,5
698	259,16	574,61	1444,72	-0,144	0,441	-0,678	2446606,8
699	262,41	477,92	1719,74	-0,181	0,599	-0,470	8811538,1
700	410,06	499,03	1561,26	-0,142	0,482	-0,675	10989947,9

**Ek 9:** Tork kolunun yapıldığı malzemenin (1040 Karbon Çeliği) özellikleri.

Çizelge Ek 9 Tork kolunun yapıldığı malzemenin (1040 Karbon Çeliği) özellikleri.

<b>MALZEME ÖZELLİKLERİ</b>	
E (Young Modülü)	201,6 GPa
$\nu$ (Poisson Oranı)	0,26
K ( Esneklik ( <i>Bulk</i> )Modülü)	140 GPa
G (Kayma ( <i>Shear</i> ) Modülü)	80 Gpa
Çekme Mukavemeti ( <i>Tensile Yield Strength</i> )	620 MPa
Akma Mukavemeti ( <i>Yield Strength</i> )	415 Mpa
Yorulma Mukavemeti Katsayısı	1543 Mpa
Yorulma Mukavemeti Üssü	-0,14
Yorulma Sünekliği Katsayısı	0,61
Yorulma Sünekliği Üssü	-0,57



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Nahide Tüten  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 04.06.1988, K.Maraş  
**E-posta** : nahidetuten@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2013-2014	Delta Enerji Sistemleri	Proje Mühendisi
2012	Johnson Controls Inc. (CCI)	Stajyer
2010	TEI TUSAŞ	Stajyer
2009	Gürgenler Pipeline Engineering	Stajyer

## YABANCI DİL:

İngilizce (YDS 85/100, TOEFL IBT 93/120)

Almanca (Start Deutsch A2)

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Uluslararası Konferans Yayınları

- Tüten, N., Acar, E., Weight Optimization and Reliability Prediction of an Automobile Torque Arm Subjected to Cyclic Loading, 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2015), ANTALYA, 2015
- Tüten, N., Acar, E., 2015, Weight Optimization and Reliability Prediction of an Automobile Torque Arm Subjected to Cyclic Loading, International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, Vol.1, No.2, sf.16-19, 2015.