

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

**BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ GÜVENİLİRLİĞİNİN MARKOV  
ZİNCİRİ MONTE CARLO TABANLI KUYRUK MODELLEME  
YÖNTEMİYLE TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gamze BAYRAK**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**ARALIK 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 141511035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gamze BAYRAK**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ GÜVENİLİRLİĞİNİN MARKOV ZİNCİRİ MONTE CARLO TABANLI KUYRUK MODELLEME YÖNTEMİYLE TAHMİNİ**" başlıklı tezi **09.12.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

**Jüri Üyeleri :** **Yrd. Doç. Dr. Salih TEKİN (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL** .....  
Orta Doğu Teknik 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.



Gamze Bayrak



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BİR RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ GÜVENİLİRLİĞİNİN MARKOV ZİNCİRİ MONTE CARLO TABANLI KUYRUK MODELLEME YÖNTEMİYLE TAHMİNİ

Gamze BAYRAK

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

Danışman: Doç. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Aralık 2016

Kuyruk modelleme yöntemi, yüksek emniyete sahip mekanik sistemlerin güvenilirliklerini tahmin etmede kullanılan etkili bir yöntemdir. Klasik kuyruk modelleme yöntemi, uygun eşik değer belirlendikten sonra ilgilenilen sınır durum fonksiyonuna ait kümülatif dağılım fonksiyonunun bilinen bir dağılıma (örneğin; Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı) benzeştirilerek, hasar olasılığı ve güvenilirlik indisi hesabı için bu dağılımın parametrelerinin kullanılmasına dayanmaktadır. Klasik kuyruk modelleme yöntemi ile güvenilirlik hesabında, sadece kuyruk bölgesine ait sınır durum fonksiyonları kullanıldığı için diğer sınır durum fonksiyonu hesaplamaları çoğunlukla boşa gitmektedir. Bu çalışmada, klasik kuyruk modelleme yönteminin dezavantajlarının üstesinden gelebilmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, Metropolis – Hastings algoritması ile uygulanan Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modelleme yöntemidir. Geliştirilen Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modelleme yöntemi sadece kuyruk bölgesinden örnekleme yaparak daha etkin güvenilirlik tahminlerinin yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca Markov Zinciri Monte Carlo yönteminde kullanılan teklif dağılım denkleminde ölçek parametresi eklenmiş ve bu ölçek parametresinin, ikinci derece polinom yanıt yüzeyler kullanılarak çeşitli rassal değişken sayılarına sahip örnek problemler için optimum değeri elde

edilmiştir. Optimum değer ile problemlerin rassal değişken sayıları arasında yaklaşık bir ilişki kurulmuştur. Sonrasında yatay eksenli bir rüzgâr türbini problemi için güvenilirlik tahmini yapılmış ve ölçek parametresi ile rassal değişken sayıları arasında kurulan ilişki bu problemde denenerek iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca, önerilen yöntemin dört veya daha az sayıda rassal değişkene sahip problemlerde Klasik Kuyruk Modelleme yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiği saptanmıştır. Dörtten fazla rassal değişken içeren problemlerde ise iki yaklaşımdan hangisinin daha iyi performans gösterdiği açık değildir.

**Anahtar Kelimeler:** Kuyruk modellemesi, Markov Zinciri Monte Carlo yöntemi, Metropolis – Hastings algoritması, Rüzgâr türbini, Güvenilirlik, Optimizasyon.





## **ABSTRACT**

Master of Science

### **RELIABILITY PREDICTION OF A WIND TURBINE'S BLADE WITH MARKOV CHAIN MONTE CARLO BASED TAIL MODELING**

Gamze BAYRAK

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Erdem ACAR

Date: December 2016

Tail modeling is an efficient method used in reliability estimation of highly safe structures. Classical tail modeling is based on performing limit-state function evaluations through a sampling scheme, selecting a threshold value to specify the tail part of the cumulative distribution function, fitting a proper model to the tail part, and estimating the reliability. In this approach, limit-state function calculations that do not belong to the tail part are mostly discarded, so majority of limit-state evaluations are wasted. In this study, Markov chain Monte Carlo method with Metropolis-Hastings algorithm is used to draw samples from the tail part only, so that a more accurate reliability index prediction is achieved. A commonly used proposal distribution formula is modified by using a scale parameter. The optimal value of this scale parameter is obtained for various numerical example problems with varying number of random variables, and an approximate relationship is obtained between the optimal value of the scale parameter and the number of random variables. The approximate relationship is tested on the reliability prediction of a horizontal axis wind turbine and observed to work well. It is also found that the proposed approach is more accurate than the classical tail modeling when the number of variables are less than or equal to

four. For larger number of random variables, none of the two approaches are found to be superior to another.

**Keywords:** Tail modeling, Markov Chain Monte Carlo method, Metropolis – Hastings algorithm, Wind turbine, Reliability, Optimization.



## TEŞEKKÜR

Eğitimim boyunca hiçbir konuda yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli bilgi ve deneyimleri ile bu çalışmanın gerçekleŐmesini sağlayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Erdem Acar'a, beni bu g¼nlere getiren ve ¼zerimdeki emeklerini asla ¼deyemeyeceđim sevgili annem Meral Bayrak, anneannem Emine FerlibaŐ ve dedem Mehmet FerlibaŐ'a, beni her konuda destekleyip zor zamanlarımda yanımda olan sevgili dostum Neslihan Kavak'a, bu s¼rete bana destek olan Cansın Bayrak'a ve diğer t¼m asistan arkadaŐlarıma, ayrıca bu çalıŐmayı 214M205 no'lu proje kapsamında destekleyen T¼B¼TAK'a ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji ¼niversitesi ailesine çok teŐekk¼r ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tez İçeriği.....	2
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Monte Carlo Simülasyonu (MCS).....	5
2.2 Klasik Kuyruk Modellemesi Yöntemi (KKM).....	5
2.2.1 Giriş .....	5
2.2.2 Genelleştirilmiş Pareto dağılımı.....	7
2.3 Markov Zinciri Monte Carlo Yöntemi (MZMC) .....	12
2.3.1 Gibbs örnekleme.....	12
2.3.2 Metropolis – Hastings algoritması .....	13
2.4 Geliştirilen Yöntem: Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı Kuyruk Modelleme Yöntemi (MZMC-KM) .....	14
2.5 Optimizasyon.....	17
2.5.1 Giriş .....	17
2.5.2 Vekil modeller.....	17
2.5.3 Yanıt yüzey yöntemi (Response surface methodology).....	17
<b>3. ÖRNEK PROBLEMLER</b> .....	<b>19</b>
3.1 Örnek Problem 1: İki Değişkenli Doğrusal Örnek Problem .....	19
3.2 Örnek Problem 2: Branin-Hoo Problemi .....	21
3.3 Örnek Problem 3: Camelback Problemi .....	22
3.4 Örnek Problem 4: Titreşim Sönümleyici Problemi .....	24
3.5 Örnek Problem 5: Merkezi Çatlaklı Plaka Problemi.....	26
3.6 Örnek Problem 6: Dönen Disk Problemi .....	28
3.7 Örnek Problem 7: Rosenbrock Problemi (6 değişkenli) .....	30
3.8 Örnek Problem 8: Dixon-Price Problemi (6 değişkenli) .....	31
3.9 Örnek Problem 9: Rosenbrock Problemi (9 değişkenli) .....	32
3.10 Örnek Problem 10: Dixon-Price Problemi (12 değişkenli).....	32
<b>4. ÖRNEK PROBLEMLERDEN ELDE EDİLEN BULGULAR</b> .....	<b>33</b>
4.1 Örnek Problem 1 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	34
4.2 Örnek Problem 2 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	39
4.3 Örnek Problem 3 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	40
4.4 Örnek Problem 4 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	42
4.5 Örnek Problem 5 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	44
4.6 Örnek Problem 6 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	45
4.7 Örnek Problem 7 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	47

4.8 Örnek Problem 8 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	49
4.9 Örnek Problem 9 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	51
4.10 Örnek Problem 10 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları .....	52
4.11 Optimum $k$ Değerinin Bulunması .....	54
<b>5. RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN KKM VE MZMC-KM İLE YAPILAN</b>	
<b>GÜVENİLİRLİK TAHMİNLERİ.....</b>	<b>57</b>
5.1 Rüzgâr Türbini için Bulgular.....	58
5.2 Pala Elemanı Momentum Teorisi (PEMT).....	59
5.2.1 Aktüatör disk konsepti (Betz limiti).....	60
5.2.2 Açılal momentum (Momentum teorisi) .....	62
5.2.3 Pala elemanı teorisi .....	64
5.2.4 Pala elemanı momentum teorisinin elde edilmesi.....	65
5.3 Rüzgâr Türbini için Monte Carlo Simülasyonu ile Güvenilirlik Tahmini .....	66
5.4 Rüzgâr Türbini için KKM ile Güvenilirlik Tahmini .....	67
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>79</b>
EK 1: Tüm örnek problemler için KKM ve MZMC-KM yöntemlerinin KOHK değerleri .....	79
EK 2: Rüzgâr türbini problemi için MCS MATLAB kodu.....	81
EK 3: Rüzgâr türbini problemi için KKM MATLAB kodu.....	83
EK 4: Rüzgâr türbini problemi için MZMC-KM MATLAB kodu .....	85
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>89</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: $y_t$ eşik değeri kullanılarak oluşturulan kuyruk modellemesi.....	8
Şekil 2.2: Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruk dağılımları.....	9
Şekil 2.3: Klasik kuyruk modellemesi yöntemi .....	11
Şekil 2.4: MZMC için Metropolis – Hastings algoritması.....	13
Şekil 3.1: Branin-Hoo fonksiyonu .....	21
Şekil 3.2: Camelback fonksiyonu .....	23
Şekil 3.3: Titreşim sönümleyici .....	24
Şekil 3.4: Titreşim sönümleyicinin normalize edilmiş genliği .....	25
Şekil 3.5: Merkezi çatlaklı plaka.....	26
Şekil 3.6: Dönen disk geometrisi .....	28
Şekil 4.1: $k$ parametresine göre kuyruk bölgesindeki örneklem dağılımları.....	36
Şekil 4.2: Örnek problem 1’de $\mu_R = 70$ için $k$ ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzey.....	37
Şekil 4.3: Örnek problem 1’de $\mu_R = 60$ için $k$ ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzey.....	37
Şekil 4.4: Örnek problem 1’de $\mu_R = 50$ için $k$ ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzey.....	38
Şekil 4.5: Optimum $k$ değerinin problemdeki rassal değişken sayısına göre değişimi .....	55
Şekil 5.1: Risoe rüzgâr türbini palalarının radyal uzaklık boyunca burgu açısı değişimi .....	58
Şekil 5.2: Risoe rüzgâr türbini palalarının radyal uzaklık boyunca incelme değişimi .....	58
Şekil 5.3: WT_Perf verileri ile Risoe rüzgâr türbini test verileri.....	59
Şekil 5.4: Rüzgâr türbini boyunca oluşmuş akış tüpü.....	60
Şekil 5.5: Rüzgâr türbininin aktüatör disk modeli .....	61
Şekil 5.6: Türbin diski arkasındaki hız .....	63
Şekil 5.7: Pala elemanına etkiyen kuvvetler .....	64
Şekil 5.8: Pala elemanı hız bileşenleri .....	64
Şekil 5.9: Rüzgâr türbini problemi için kümülatif dağılım fonksiyonu.....	68





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1: Örnek problemler ve değişken sayıları .....	19
Çizelge 3.2: Örnek problem 1 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri .....	20
Çizelge 3.3: Örnek problem 1 için farklı $\mu_R$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri .....	20
Çizelge 3.4: Örnek problem 2 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri .....	21
Çizelge 3.5: Örnek problem 2 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri .....	22
Çizelge 3.6: Örnek problem 3 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri .....	23
Çizelge 3.7: Örnek problem 2 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri .....	25
Çizelge 3.8: Örnek problem 4 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri .....	26
Çizelge 3.9: Örnek problem 5 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri .....	27
Çizelge 3.11: Örnek problem 6 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri .....	28
Çizelge 3.12: Örnek problem 6 için farklı $c$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri .....	29
Çizelge 3.13: Örnek problem 7 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.....	30
Çizelge 3.14: Örnek problem 8 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.....	31
Çizelge 3.15: Örnek problem 9 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.....	32
Çizelge 3.16: Örnek problem 10 için farklı $y_{crit}$ değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.....	32

Çizelge 4.1: Örnek problem 1 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	34
Çizelge 4.2: Örnek problem 1 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	35
Çizelge 4.3: $k$ parametresinin kuyruk bölgesindeki örneklem sayısına etkisi.....	35
Çizelge 4.4: Örnek problem 1 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	36
Çizelge 4.5: Örnek problem 1 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	38
Çizelge 4.6: Örnek problem 2 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	39
Çizelge 4.7: Örnek problem 2 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	39
Çizelge 4.8: Örnek problem 2 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	40
Çizelge 4.9: Örnek problem 2 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	40
Çizelge 4.10: Örnek problem 3 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	41
Çizelge 4.11: Örnek problem 3 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	41
Çizelge 4.12: Örnek problem 3 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	41
Çizelge 4.13: Örnek problem 3 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	42
Çizelge 4.14: Örnek problem 4 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	42
Çizelge 4.15: Örnek problem 4 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	43
Çizelge 4.16: Örnek problem 4 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	43
Çizelge 4.17: Örnek problem 4 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	43
Çizelge 4.18: Örnek problem 5 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	44
Çizelge 4.19: Örnek problem 5 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	44
Çizelge 4.20: Örnek problem 5 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	45
Çizelge 4.21: Örnek problem 5 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	45
Çizelge 4.22: Örnek problem 6 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri .....	46
Çizelge 4.23: Örnek problem 6 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	46
Çizelge 4.24: Örnek problem 6 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	46
Çizelge 4.25: Örnek problem 6 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.....	47

Çizelge 4.26: Örnek problem 7 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.....	47
Çizelge 4.27: Örnek problem 7 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	48
Çizelge 4.28: Örnek problem 7 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	48
Çizelge 4.29: Örnek problem 7 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması .....	49
Çizelge 4.30: Örnek problem 8 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.....	49
Çizelge 4.31: Örnek problem 8 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	49
Çizelge 4.32: Örnek problem 8 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	50
Çizelge 4.33: Örnek problem 8 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması .....	50
Çizelge 4.34: Örnek problem 9 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.....	51
Çizelge 4.35: Örnek problem 9 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	51
Çizelge 4.36: Örnek problem 9 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	52
Çizelge 4.37: Örnek problem 9 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması .....	52
Çizelge 4.38: Örnek problem 10 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.....	53
Çizelge 4.39: Örnek problem 10 için MZMC-KM tahminlerinin $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	53
Çizelge 4.40: Örnek problem 10 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.....	53
Çizelge 4.41: Örnek problem 10 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması .....	54
Çizelge 4.42: Tüm örnek problemler için düşük, orta ve yüksek güvenilirlik seviyeleri için hesaplanan optimum $k$ değerleri .....	54
Çizelge 5.1: Risoe rüzgâr türbininin genel özellikleri .....	57
Çizelge 5.2: Risoe rüzgâr türbinindeki rassal değişkenler .....	67
Çizelge 5.3: Üç ve dört rassal değişkenli durumlar için güvenilirlik indisleri.....	67
Çizelge 5.4: Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.....	68
Çizelge 5.5: Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması .....	69
Çizelge 5.6: Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki $k$ parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri .....	69
Çizelge 5.7: Optimum $k$ değerlerinin yaklaşık değerlerle karşılaştırılması .....	70
Çizelge Ek 1: Tüm örnek problemler için kullanılan yöntemlerin KOHK değerleri. 79	



## KISALTMALAR

<b>CDF</b>	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
<b>GPD</b>	: Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı
<b>KKM</b>	: Klasik Kuyruk Modellemesi
<b>KOHK</b>	: Karekök Ortalama Hata Karesi
<b>LSF</b>	: Sınır Durum Fonksiyonu (Limit State Function)
<b>MCS</b>	: Monte Carlo Simülasyonu
<b>MH</b>	: Metropolis – Hastings Algoritması
<b>MZMC</b>	: Markov Zinciri Monte Carlo Yöntemi
<b>MZMC-KM</b>	: Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı Kuyruk Modellemesi
<b>PEMT</b>	: Pala Elemanı Momentum Teorisi



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$a$	Eksenel indüksiyon faktörü
$a'$	Teğetsel indüksiyon faktörü
$A$	Kesit alanı
$C_p$	Güç Katsayısı
$d$	Boyut parametresi
$F(x)$	Kümülatif dağılım fonksiyonu
$F_t$	Eşik değeri
$F_Z(z)$	Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı
$f(\theta)$	Birleşik olasılık yoğunluk dağılımı
$H$	Çakışık olmayan dağılım fonksiyonu
$k$	Teklif dağılımı ölçek parametresi
$k^*$	Optimum $k$ değeri
$M_n$	Rassal değişken
$N$	Toplam örneklem sayısı
$N_f$	Hasara uğrayan örneklem sayısı
$N_t$	Kuyruk bölgesindeki örneklem sayısı
$n_{var}$	Rassal değişken sayısı
$P$	Güç değeri
$P_f$	Hasar olasılığı
$P_i$	Ampirik kümülatif dağılım fonksiyonu
$R$	Güvenilirlik
$r$	Birleşik olasılık yoğunluk dağılımı oranı
$U$	Akış hızı
$w$	Pala elemanına etkiyen bileşke bağlı hız
$x$	Veri vektörü
$y_t$	Kuyruk bölgesi değerleri
$Y$	Sınır durum fonksiyonu
$\beta$	Güvenilirlik indisi
$\beta_{act}$	Analitik yöntemlerle elde edilen güvenilirlik indisi
$\beta_{ij}$	Etkileşim çarpanlarının katsayısı
$\varepsilon$	Deneysel hatalar
$\Sigma$	Kovaryans matrisi
$\theta$	Bilinen parametre değerleri kümesi
$\mu$	Ortalama değer
$\zeta$	Şekil parametresi
$\rho$	Hava yoğunluğu
$\sigma$	Ölçek parametresi
$\sigma'$	Yerel sağlamlık faktörü
$\Phi$	Standart normal değişkenin olasılık dağılım fonksiyonu
$\Omega$	Açısal hız





## 1. GİRİŞ

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan sistemlerdir. Türbinler rotasyon türüne göre, dikey eksenli rüzgâr türbinleri ve günümüzde enerji üretiminde sıklıkla kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri olmak üzere ikiye ayrılırlar [1].

Rüzgâr türbinleri sürekli olarak değişken yüklemeye maruz kaldıkları için güvenilirlik analizinde birçok yüklem durumunun incelenmesi gerekmektedir. Yapılan detaylı güvenilirlik analizleri, rüzgâr türbini parçaları için daha rasyonel güvenilirlik seviyeleri elde edilmesini sağlar [2].

Güvenilirlik, bir sistemin belirli bir zaman diliminde ve belirli koşullar altında yapması gereken işlemi yerine getirme olasılığıdır [3]. Bir sistemin yapısal güvenilirliği, sistemin hasar durumunu veya parçaların ortaya çıkmaması istenen davranışlarını belirlemek için kullanılan sınır durum fonksiyonları yardımıyla hesaplanır. Sınır durum fonksiyonu, sistem kapasitesi ile sistem cevabı arasındaki fark olarak tanımlanır.

Bir sistemin güvenilirliği hesaplanırken analitik yöntemler (birinci derece güvenilirlik yöntemi [4], ikinci derece güvenilirlik yöntemi [5], vb.) ve simülasyon temelli yöntemler (Monte Carlo Simülasyonu - MCS [6], önem örnekleme (importance sampling) [7], vb.) gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Analitik yöntemler, simülasyon temelli yöntemlere kıyasla az sayıda sınır durum fonksiyonu (limit state function, LSF) hesabı gerektirir ancak, her zaman doğru sonuç vermeyebilir. Simülasyon temelli yöntemlerin dezavantajı ise yüksek güvenilirlik seviyeleri için çok sayıda benzetim (simülasyon) yapılmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Yüksek güvenilirliğe sahip sistemlerde kuyruk olasılığı modelleme yöntemi, analitik ya da Monte Carlo Simülasyonu gibi yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek için kullanılmaktadır.

Kuyruk modelleme yöntemi ile güvenilirlik hesabı, sınır durum fonksiyonuna ait kümülatif dağılım fonksiyonunun kuyruk bölgesinin benzeştirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemdeki amaç belirli bir eşik değeri seçerek kuyruk bölgesini belirleyerek bu bölgeye genelleştirilmiş Pareto dağılımı gibi bir olasılık modeli uygulamaktır. Bu şekilde sınır durum fonksiyonunu sadece kuyruk kesimlerinde hesaplayarak işlem maliyetini azaltmak mümkündür [8].

Ancak, problemdeki rassal değişken sayısının artması, kuyruk modelleme yönteminin performansını düşürmektedir. Bu engeli ortadan kaldırmak için sınır durum fonksiyonunun değerlendirilmesinde Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemi kullanılabilir. Markov zinciri, mevcut durum verildiğinde, gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız olduğu bir stokastik süreç olarak tanımlanmaktadır [9]. Bu tez kapsamında, klasik kuyruk modellemenin (KKM) olumsuz etkilerinden kurtulmak amacıyla Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modellemesi (MZMC-KM) yöntemi önerilmiştir. Metropolis - Hastings algoritması kullanılarak uygulanan MZMC yöntemi, direkt örneklemenin kolay yapılamadığı durumlarda bir hedef olasılık dağılımından örnekleme noktaları serisi oluşturmak için kullanılmaktadır. MZMC-KM yönteminde, kendisinden direkt örneklemenin kolayca yapılamadığı hedef olasılık dağılımı, sınır durum fonksiyonu olasılık dağılımının kuyruk bölgesidir.

## 1.1 Tez İçeriği

Bu tez kapsamında, yatay eksenli bir rüzgâr türbini probleminin Klasik Kuyruk Modellemesi ve Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı Kuyruk Modellemesi yöntemleri kullanılarak güvenilirlik tahmini yapılmıştır. Kullanılan yöntemlerde güvenilirlik tahmini yapılırken, güvenilirlik indisinin veya logaritmasının polinom tabanlı yaklaşımları (lineer ve karesel) kullanılmış ve dışkestirim (extrapolation) yoluyla güvenilirlik hesaplanmıştır.

Tez kapsamında MZMC ile kuyruk bölgesinden örnekleme ve güvenilirlik tahmini yapabilen bir MATLAB programı geliştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, geliştirilen MZMC-KM yönteminin performansının incelenmesi ve teklif dağılımında kullanılan ölçek parametresinin ( $k$ ) optimum değerinin belirlenmesidir. Bu amaçla MZMC-KM yöntemi değişken sayıları farklı örnek problemlere uygulanmış ve değişken sayıları ile

$k$  parametresi arasında ne tür bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bu ilişki, daha sonra rüzgâr türbini probleminde de kullanılarak doğruluğu teyit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında izlenen prosedür şu şekildedir. Birinci bölümde, rüzgâr türbinleri ve güvenilirlik kavramından genel olarak bahsedilmiş ve tezdeki çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölüm, çalışmalarda kullanılan güvenilirlik tahmini yöntemlerinden Monte Carlo Simülasyonu, Klasik Kuyruk Modellemesi, Metropolis - Hastings algoritması kullanılarak uygulanan Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modellemesi hakkındaki literatür araştırmalarını ve bu yöntemlerin adımlarını içermektedir. Ayrıca bu bölümde, MZMC-KM yöntemindeki teklif dağılımı ölçek parametresinin optimizasyonu için kullanılan yanıt yüzey yönteminden de bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, güvenilirlik tahmini çalışmalarında kullanılan değişken sayıları farklı on adet örnek problem açıklanmıştır. Rassal değişkenleri ve sınır durum fonksiyonları verilen bu problemlerin güvenilirlik tahmin sonuçlarını içeren çizelgeler bir sonraki bölümde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, örnek problemlerden elde edilen KKM ve MZMC-KM yöntemlerinin karekök ortalama hata karesi (KOHK) sonuçları verilmiş ve yöntemler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Her problem için optimum  $k$  ( $k^*$ ) değerleri bulunmuş ve bunun sonucunda değişken sayısına bağlı olarak  $k^*$  için ampirik denklem elde edilmiştir.

Beşinci bölümde, kullanılan rüzgâr türbininin özelliklerinden, rassal değişkenlerinden ve rüzgâr türbininin performansının değerlendirilmesinde kullanılan pala elemanı momentum teorisinden bahsedilmiştir. Rüzgâr türbininin güvenilirliğinin diğer yöntemlerle kıyaslanabilmesi için Monte Carlo Simülasyonu ile güvenilirlik tahmini yapılmıştır. Problemin üç farklı durumu için KKM ve MZMC-KM sonuçları karşılaştırılmış ve değişken sayılarına bağlı olarak optimum  $k$  değerleri elde edilmiştir. Elde edilen  $k^*$  değerleri daha sonra ampirik denklemden elde edilen  $k^*$  değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Son bölüm olan altıncı bölümde, genel sonuçlar açıklanmış, irdelenmiş ve bu tez çalışmasına devam niteliğinde yapılabilecek çalışmalardan bahsedilerek tez çalışması sonlandırılmıştır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1 Monte Carlo Simülasyonu (MCS)

Monte Carlo Simülasyonu, mühendislik sistemlerinin olasılıksal analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. MCS, [0-1] aralığında rassal değişkenler kullanılarak stokastik ya da deterministik problemlerin çözümünde rastgele sayılar üreten bir algoritma ile çalışır [10].

Bir sistem için hasar olasılığının hesaplanabilmesi için Monte Carlo Simülasyonunun adımları aşağıda verilmiştir.

1. Olasılıksal dağılım fonksiyonuna göre rassal girdi değişkenlerinin değerleri oluşturulur.
2. Deterministik analiz yapılır ve sistemin hasara uğrayıp uğramadığı kontrol edilir.
3. 1. ve 2. adımlar  $N$  defa tekrarlanır ve hasara uğrayanların sayısı belirlenir,  $N_f$ .
4. Ortalama hasar olasılığı değeri ( $P_f$ ) ve sistem güvenilirliği ( $R$ ) aşağıdaki denklemlerden hesaplanır.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (2.1)$$

$$R = \frac{N - N_f}{N} \quad (2.2)$$

### 2.2 Klasik Kuyruk Modellemesi Yöntemi (KKM)

#### 2.2.1 Giriş

Kuyruk olasılığı modelleme yöntemi, ilgilenilen sınır durum fonksiyonuna ait kümülatif dağılım fonksiyonunun bilinen bir dağılıma (Örneğin; Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı (GPD)) benzeştirilerek, hasar olasılığı ve güvenilirlik indisi hesabı

için bu dağılımın parametrelerinin kullanılmasına dayanmaktadır. Kuyruk modelleme yönteminin temel esası kuyruk eşdeğerliğidir [8].

Dağılım fonksiyonları  $F(x)$  ve  $G(x)$  aşağıdaki eşitliği sağladığı takdirde kuyruk eşdeğerliğine sahiptir.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - F(x)}{1 - G(x)} = 1 \quad (2.3)$$

$M_n$  rassal değişkeninin  $X_1, X_2, \dots, X_n$  gibi  $n$  tane aynı  $F$  olasılık dağılımına sahip, bağımsız rassal değişkenli bir dizinin en büyük değeri olduğu düşünülürse,  $M_n$ 'nin kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} F_n(z) &= Pr \{M_n \leq z\} = Pr\{X_1 \leq z, \dots, X_n \leq z\} \\ &= Pr\{X_1 \leq z\} \times \dots \times Pr\{X_n \leq z\} \\ &= \{F(z)\}^n \end{aligned} \quad (2.4)$$

$F$  olasılık dağılımı genellikle bilinmediği için  $M_n$ 'nin olasılık dağılımını Denklem (2.4) kullanarak hesaplamak mümkün değildir. Dolayısıyla  $F_n$  için sadece uç değerler için elde edilmiş yaklaşık modeller incelenmektedir.  $\{a_n > 0\}$  ve  $\{b_n\}$  sabitlerine sahip diziler için aşağıdaki dönüşüm yapılır.

$$M_n^* = \frac{M_n - b_n}{a_n} \quad (2.5)$$

Fisher ve Tippet tarafından 1928'de oluşturulan uç tipi teorem (extremal type theorem) kullanılarak  $M_n^*$  için olası limit dağılım aralıkları elde edilir [11].  $\{a_n > 0\}$  ve  $\{b_n\}$  sabitlerine sahip bir dizide,  $H$  çakışık olmayan bir dağılım fonksiyonu ve  $n$  değeri sonsuza giderken (2.6)'da verilen koşul sağlandığında;

$$Pr \left\{ \frac{M_n - b_n}{a_n} \leq z \right\} \rightarrow H(z) \quad (2.6)$$

$H$  dağılım fonksiyonu aşağıdaki dağılım gruplarından birine dahil olacaktır.

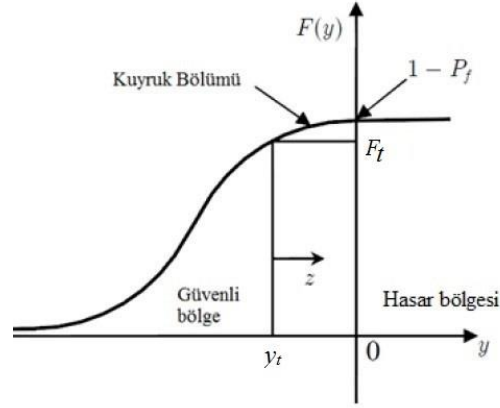
$$\begin{aligned}
H(z) &= \exp\left\{\exp\left[-\left(\frac{z-b}{a}\right)\right]\right\}, -\infty < z < \infty \\
H(z) &= \begin{cases} 0, & z \leq b \\ \exp\left\{-\left(\frac{z-b}{a}\right)^{-\alpha}\right\}, & z > b \end{cases} \\
H(z) &= \begin{cases} 1, & z \geq b \\ \exp\left\{-\left[\left(\frac{z-b}{a}\right)^\alpha\right]\right\}, & z > b \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Bu gruptaki dağılımlar sırayla I, II. ve III. tip uç değer dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılımlar Gumbel, Frechet ve Weibull dağılımı olarak bilinirler. Bu denklemlerdeki  $a$  ve  $b$  katsayıları büyüklük ve konum parametreleri,  $\alpha$  ise şekil parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu dağılımlar tek bir model grubuna dönüştürüldüğünde modelin dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$H(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \tag{2.8}$$

### 2.2.2 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 değişkenlerin vektörünü göstermektedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi,  $y_t$  büyüklüğündeki yüksek bir eşik değer üzerinde kalan bölge, kuyruk bölgesi olarak adlandırılır ve genelleştirilmiş Pareto dağılımı kullanılarak modellenabilir [8].



Şekil 2.1 :  $y_t$  eşik değeri kullanılarak oluşturulan kuyruk modellemesi [8].

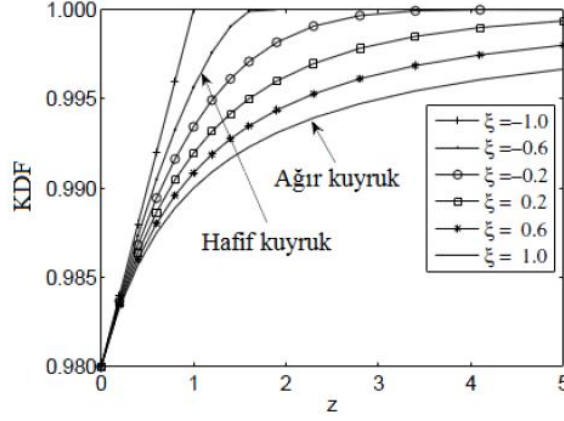
GPD,  $F_t(z)$  olarak gösterilen koşullu aşım dağılımına benzeştirilir. Burada,  $z=y-y_t$  olarak tanımlanır.  $F_t(z)$  benzetimi aşağıda verilmiştir.

$$F_z(z) \approx \hat{F}_{\xi, \sigma}(z),$$

$$\hat{F}_{\xi, \sigma}(z) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} z\right)_+^{-\frac{1}{\xi}} & \text{eğer } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{z}{\sigma}\right) & \text{eğer } \xi = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

$F_t(z)$  benzetiminde kullanılan  $\xi$  ve  $\sigma$ , sırasıyla şekil ve ölçek parametreleridir. Şekil parametresi, dağılımın ağırlığı hakkında bilgi verir.  $\xi > 0$  olduğunda Pareto tipi kuyruk olarak adlandırılan ağır kuyruk durumu,  $\xi = 0$  iken üstel tip kuyruk olarak adlandırılan orta kuyruk durumu,  $\xi < 0$  iken ise Beta tipi kuyruk olarak adlandırılan hafif kuyruk durumu ortaya çıkar [8]. Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruk tipleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.





Şekil 2.2 : Farklı şekil parametrelerine sahip kuyruk dağılımları [8].

Koşullu aşım dağılımı fonksiyonu ile  $F(y)$  kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$F_z(z) = \frac{F(y) - F(y_t)}{1 - F(y_t)} = \frac{F(y) - F_t}{1 - F_t} \quad (2.10)$$

Eşik değerin üzerindeki  $F(y)$  fonksiyonunun koşullu aşım dağılımı fonksiyonu  $F_t(z)$  cinsinden gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$F(y) = F_t + (1 - F_t)F_z(y - y_t) \quad (2.11)$$

$F(y)$  elde edildikten sonra, hasar olasılığı ( $P_f$ ) ve buna bağlı olarak güvenilirlik indisi ( $\beta$ ) aşağıda verilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_f = 1 - F(y = 0) = (1 - F_t) \left\langle 1 - \frac{\xi}{\sigma} y_t \right\rangle_+^{-\frac{1}{\xi}} \quad (2.12)$$

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (2.13)$$

$\Phi(\cdot)$ , standart normal rassal değişkenin kümülatif dağılım fonksiyonunu belirtmektedir [8].

Klasik kuyruk modellemesi yönteminin adımları aşağıda verilmiştir.

1. Sınır durum fonksiyonu  $y(x)$  'nin  $N$  adet örneği Monte Carlo simülasyonu (veya Latin hiperküpü örnekleme) ile oluşturulur. Yapısal problemlerde, rassal girdi değişkenlerinin örnekleri verilen dağılım şekline göre oluşturulmaktadır. Sonrasında, bu rassal değişkenler kullanılarak sınır durum fonksiyonu değerleri hesaplanır. Bu analizler genellikle işlem maliyeti yüksek simülasyonlarla gerçekleştirildiğinden (örneğin; sonlu elemanlar analizi),  $N$  değeri kabul edilebilir işlem maliyetine göre seçilir. Bu çalışmada, örneklem sayısı,  $N = 500$  alınmıştır.
2. Bir eşik değeri seçilir ve seçilen bu değere göre kuyruk bölgesi tanımlanır. Örneğin, eğer  $F_t=0,90$  seçilirse kuyruk bölgesindeki örneklem sayısı  $N_t = (1 - F_t) * N = 50$  olarak bulunur. Uygun eşik değeri seçimi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Boos, bu konuda yaptığı çalışmalarda, toplam veri sayısı ( $N$ ), 50 ile 500 arasındayken ( $50 \leq N \leq 500$ ) kuyruk bölgesindeki ( $N_t$ ) veri sayısının toplam veri sayısına oranının 0,2 ve  $N$ , 500 ile 5000 arasındayken ( $500 < N \leq 5000$ ) ise bu oranın 0,1 olması gerektiğini ileri sürmüştür [12]. Hasofer'in bu konudaki çalışmalarında ise kuyruk bölgesinde bulunması gereken veri sayısı,  $N_t$  ile toplam veri,  $N$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [13].

$$N_t \approx 1.5\sqrt{N} \quad (2.14)$$

Caers ve Maes ise optimum  $N_t$  'nin, ön yükleme metodu (bootstrap method) ile elde edilen ortalama karesel hatayı minimize edecek şekilde bulunabileceğini öne sürmüşlerdir [14].

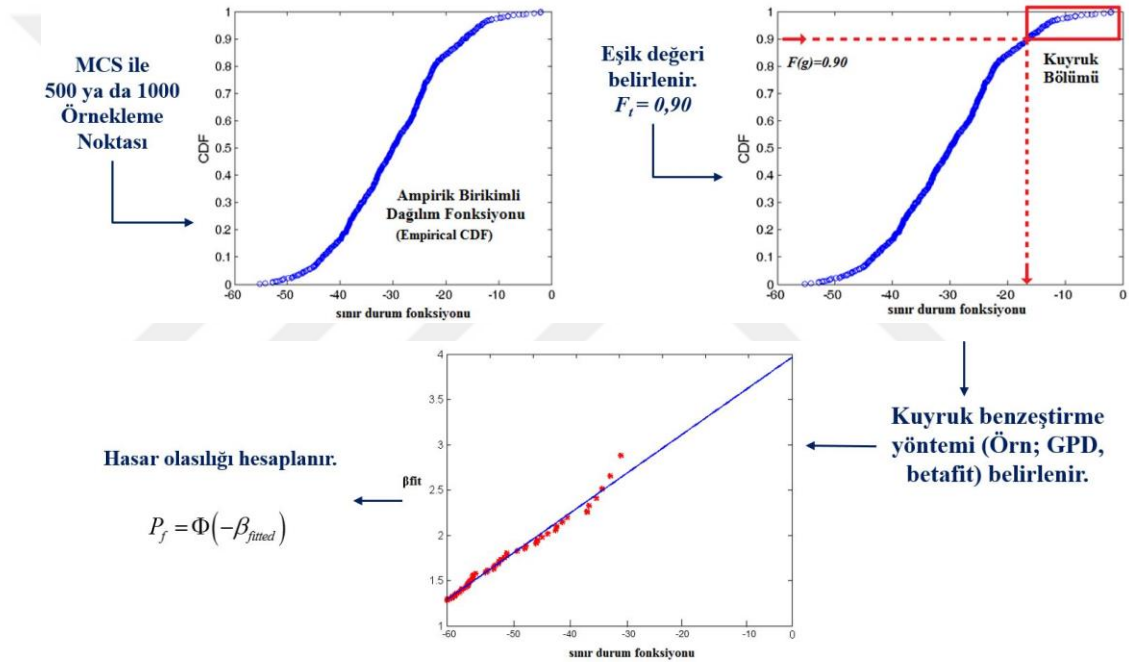
Bu tez kapsamında, daha önceki çalışmalar referans alınarak  $N=500$  örneklem için optimum eşik değeri  $F_t=0,90$  alınmış ve  $N_t=50$  bulunmuştur [15].

3. GPD'de ölçek ve şekil parametreleri hesaplanır. Bu parametreler belirlenirken genellikle En Büyük Olabilirlik Kestirimi (Maximum Likelihood Estimation [16]) ve En Küçük Kareler Regresyonu Yöntemi (Least Square Regression Method [17]) kullanılır. Eğer GPD, genelleştirilmiş uç değer dağılımı veya başka uygun dağılım kuyruk modeli olarak kullanılırsa kuyruk model

parametreleri En Büyük Olabilirlik Kestirimi ve En Küçük Kareler Regresyonu Yöntemi ile bulunabilir.

Güvenilirlik indisinin veya logaritmasının polinom tabanlı yaklaşımı kullanılırsa kuyruk parametreleri genellikle En Küçük Kareler Regresyonu Yöntemi ile bulunur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, Betafit Yöntemi adı verilen güvenilirlik indisinin veya logaritmasının polinom tabanlı yaklaşımları (lineer ve karesel) kullanılmaktadır.

KKM yönteminin uygulaması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Klasik kuyruk modellemesi yöntemi.

KKM yöntemi etkili bir güvenilirlik tahmin yöntemi olsa da, kuyruk modellemenin etkinliği daha da artırılabilir. Bu tezde, Metropolis-Hastings (MH) algoritması ile Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yönteminin klasik kuyruk modellemesi ile birleştirildiği yöntem önerilmiştir.

## 2.3 Markov Zinciri Monte Carlo Yöntemi (MZMC)

Markov zinciri, mevcut durum verildiğinde, gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız olduğu stokastik süreç olarak tanımlanmaktadır. Markov Zinciri Monte Carlo yaklaşımı Markov zinciri kullanarak Monte Carlo integrasyonunun yapıldığı bir yöntemdir [18]. MZMC yöntemindeki ilk adım, istenilen bölgede bir başlangıç noktası bulmaktır. Markov zinciri, denklem (2.15)'te verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}\Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n, \dots, X_1 = x_1) \\ = \Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n)\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}\Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n, \dots, X_1 = x_1) \\ = \Pr(X_{n+1} = x | X_n = x_n, \dots, X_{n-m} = x_{n-m})\end{aligned}$$

Genel olarak kullanılan iki MZMC algoritması bulunmaktadır. Bunlar; Gibbs Örnekleme ve Metropolis - Hastings algoritmasıdır [18].

### 2.3.1 Gibbs örnekleme

Gibbs örnekleme, "Metropolis ve Metropolis - Hastings algoritması"nın özel bir durumudur. Modeldeki her parametre ve onların örneği için tam şartlı dağılımlar içinde birleşik sonsal dağılımın ayrıştırılmasını gerektiren bir yöntemdir.

Gibbs örnekleme algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir [19].

1.  $t=0$  anında bir  $\theta^{(0)} = (\theta_1^{(0)}, \dots, \theta_k^{(0)})$  başlangıç değeri seçilir.
2.  $\theta$ 'nin her bileşeni,

$$\pi(\theta_1 | \theta_2^{(t)}, \dots, \theta_k^{(t)}, y)' \text{ den } \theta_1^{(t+1)},$$

$$\pi(\theta_2 | \theta_1^{(t+1)}, \theta_3^{(t)}, \dots, \theta_k^{(t)}, y)' \text{ den } \theta_2^{(t+1)},$$

.....

$$\pi(\theta_k | \theta_1^{(t+1)}, \dots, \theta_{k-1}^{(t+1)}, y)' \text{ den } \theta_k^{(t+1)}$$

şeklinde elde edilir.

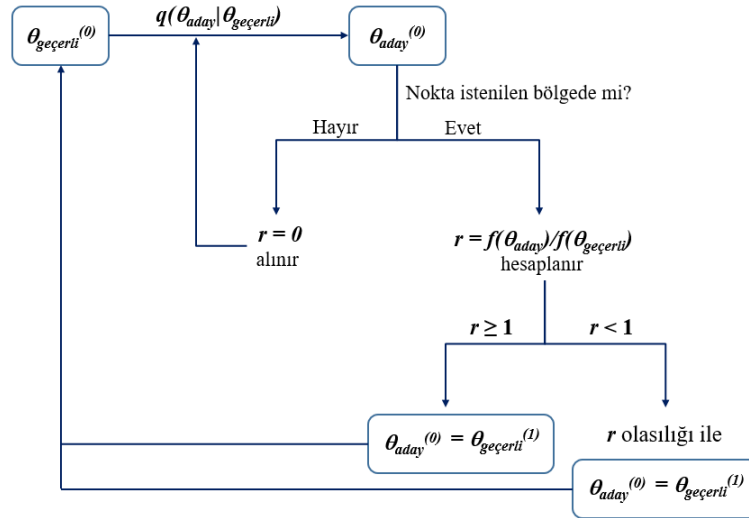
3.  $t = t + 1$  alınır ve eğer  $t < T$  ( $T$  istenilen örnekleme genişliği) ise 2. adıma gidilir. Aksi durumda işlem bitirilir.

### 2.3.2 Metropolis – Hastings algoritması

Metropolis - Hastings algoritması, direkt örneklemenin kolay olmadığı durumlarda bir hedef olasılık dağılımından örnekleme noktaları serisi oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir.

Metropolis – Hastings algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir (bkz. Şekil 2.4) [20].

1. Başlangıç noktası, geçerli nokta ( $\theta_{geçerli}^{(0)}$ ) başlangıç değeri seçilir.
2. Geçerli nokta etrafında, bir teklif dağılımı (proposal distribution)  $q(\theta_{aday}|\theta_{geçerli})$  temel alınarak rastgele adım atılır ve bir aday nokta ( $\theta_{aday}$ ) belirlenir.
3. Aday noktanın istenilen bölgede olup olmadığı değerlendirilir. Aday nokta istenilen bölgedeysse 4. adıma geçilir, değilse aday noktanın birleşik olasılık yoğunluk dağılımı değeri sıfır olarak alınır ( $r=0$ ) ve 6. adıma geçilir.
4. Aday noktanın birleşik olasılık yoğunluk dağılımının, geçerli noktanın birleşik olasılık yoğunluk dağılımına oranı  $r = f(\theta_{aday})/f(\theta_{geçerli})$  hesaplanır. Eğer  $r \geq 1$  ise, aday nokta örnekleme noktası olarak kabul edilir. Eğer  $r < 1$  ise,  $r$  olasılığı ile aday nokta örnekleme noktası olarak kabul edilirken,  $(1-r)$  olasılığı ile geçerli nokta örnekleme noktası olarak kabul edilir.
5. Kabul edilen örnekleme noktası, bir sonraki adımda geçerli nokta olarak kullanılır.
6. İstenilen sayıda örnekleme noktası oluşturulana kadar yeni aday noktalar oluşturmak için 2. adıma geri dönlür.



Şekil 2.4 : MZMC için Metropolis – Hastings algoritması.

MZMC yönteminin etkinliği seçilen teklif dağılımına ve kullanılan dağılım parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler atılan rastgele adımların aralığını kontrol eder. Büyük adımlar atıldığında; örnekleme uzayının büyük kısmının kapsanması sağlanarak ayırık veya zayıf bağlı hasar bölgelerinin teşhisi mümkün olur, ancak bu durum örnekleme dizisindeki yinelenmiş nokta sayısı artırır. Küçük adımlar atıldığında ise; noktaların tekrarlanma ihtimali azalır ancak hem birbirini takip eden örnekleme noktaları arasında korelasyon oluşur hem de ayırık veya zayıf bağlı hasar bölgelerinin teşhisi mümkün olmayabilir. Dolayısıyla, optimum adım büyüklüğünün belirlenmesi gerekir [21].

Teklif parametrelerinin seçimi genellikle deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilir. Bu uygulama, problemlerin işlem maliyetleri göz önüne alındığında pratik olmamaktadır. Literatürde bu parametrelerin optimum değerlerinin bulunması üzerine çalışmalar mevcuttur, ancak genel geçer bir yöntem bulunmamakta ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir. Rosenthal çalışmasında, hedef dağılımın  $n_{var}$  boyutlu kovaryans matrisine sahip bir normal dağılım  $N(0, \Sigma)$  olması durumunda, teklif dağılımının da normal dağılım  $N(0, \Sigma_p)$  olması gerektiğini ve optimum kovaryans matrisinin Denklem (2.16) ile hesaplanabileceğini göstermiştir [22].

$$\Sigma_p = \frac{2,38^2}{n_{var}} \Sigma \quad (2.16)$$

#### **2.4 Geliştirilen Yöntem: Markov Zinciri Monte Carlo Tabanlı Kuyruk Modelleme Yöntemi (MZMC-KM)**

Bu tezde, performansı problemdeki rassal değişken sayısından fazla etkilenmeyecek, Markov Zinciri Monte Carlo yöntemi ile Kuyruk Modelleme yönteminin bir arada kullanımına dayalı yeni bir yöntem geliştirilmiştir. İncelenen tüm problemlerde, önceden yapılan çalışmalar dikkate alınarak sınır durum fonksiyonu  $N=500$  adet alınmıştır [15, 23]. Bu sınır durum fonksiyonlarının ilk kısmı, sınır durum fonksiyonunun eşik değerinin belirlenmesinde ve MZMC örnekleme için başlangıç noktalarının bulunmasında kullanılır. İkinci kısım ise, kümülatif dağılım fonksiyonunun kuyruk kısmından MZMC yoluyla daha sonraki örnekleme için kullanılır.

İlk kısımda, oluşturulan sınır durum fonksiyonlarının sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, değişkenlerin olasılık dağılımına göre rassal değişken uzayında MCS ile 100 örnekleme noktası oluşturulur. Daha sonra fonksiyon değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve bu fonksiyonların eşik değeri  $F_t$  ile belirlenir. Seçilen eşik değerine göre son 10 örnek kuyruk örnekleme olup, bu örnekler MZMC örnekleme için başlangıç noktası olarak kullanılır.

İkinci kısımdaki, sınır durum fonksiyonlarının sayısı ise 400 olarak belirlenmiştir. Her başlangıç noktasından başlanarak, kümülatif dağılım fonksiyonunun kuyruk bölgesinden MZMC yönteminin Metropolis- Hastings algoritması yoluyla 40 adet örnekleme noktası oluşturulur.

MZMC yönteminde teklif dağılımı olarak sıfır ortalamaya sahip normal dağılım kullanılır. Rosenthal [22] tarafından önerilen teklif dağılım formülü hedef dağılım normal olduğunda uygundur. Ancak, kuyruk kısmının olasılık dağılımı her zaman normal olmayabilir. Bu nedenle, bu çalışmada Rosenthal tarafından önerilen teklif dağılım formülü, teklif dağılımının kovaryans matrisini hesaplamak için aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir.

$$\Sigma_p = k^2 \frac{2,38^2}{n_{var}} \Sigma \quad (2.17)$$

Formüldeki  $k$  parametresi herhangi bir değer alabilmektedir. Bölüm 4'te detayları verilen çalışmalarda farklı sayıda değişkene sahip çeşitli örnek problemler için  $k$ 'nin optimum değeri ve bu değer ile rassal değişken sayıları ( $n_{var}$ ) arasında yaklaşık bir ilişki elde edilmiştir. Bu optimizasyon işlemi ve bu işlemde vekil model olarak kullanılan yanıt yüzey yöntemi Bölüm 2.5'te açıklanmıştır.

Kullanılan yöntem sonunda kuyruk bölgesinde toplam 410 adet örneklem elde edilir. Bu örneklere göre güvenilirlik indisinin veya logaritmasının polinom tabanlı yaklaşımları (lineer ve karesel) oluşturulur ve dışkestirim (extrapolation) yoluyla güvenilirlik tahmini gerçekleştirilir (Betafit Yöntemi) [24].

Betafit yönteminde,

- MCS yöntemi ile 500 adet sınır durum fonksiyonu hesabı yapılarak değerler küçükten büyüğe sıralanır.

- Bu değerlere karşılık gelen ampirik birikimli olasılık değerleri  $P_i = \frac{i}{N+1}$  formülü ile elde edilir.
- Elde edilen bu değerler,  $\beta_i = \Phi^{-1}(P_i)$  formülü ile güvenilirlik indisi değerlerine dönüştürülür.
- Güvenilirlik indisi  $\beta$  ile sınır durum fonksiyonu  $Y$  arasında  $\beta(Y)$  formunda polinom tabanlı ilişkiler kurulur.

Bu yöntemde, sınır durum fonksiyonu,  $Y$  genellikle negatif değer aldığı için  $\ln(Y)$  hesabı mümkün olmamaktadır. Bu sorundan kurtulmak için,  $\beta$  ile  $\ln(z)$  arasında ilişki kurulması durumu ele alınmıştır, burada  $z = Y - y_t$  olarak tanımlanmaktadır ve kuyruk örneklemeleri için  $z$  daima pozitif değer almaktadır.  $\beta(z)$  formunda elde edilen fonksiyonel ilişkide  $z = -y_t$  kullanılarak güvenilirlik tahmini yapılabilmektedir. Güvenilirlik indisi  $\beta$  ile  $z$  arasında kurulan polinom tabanlı ilişkiler aşağıda verilmiştir.

a)  $\beta$  ile  $z$  arasında lineer ilişki:  $\beta_1(z) = c_0 + c_1 z$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{lin-lin}^L = \beta_1(z = -y_t)$

b)  $\beta$  ile  $z$  arasında karesel ilişki:  $\beta_2(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{lin-lin}^Q = \beta_2(z = -y_t)$

c)  $\ln(\beta)$  ile  $z$  arasında lineer ilişki:  $\ln \beta_3(z) = c_0 + c_1 z$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{log-lin}^L = \exp[\ln \beta_3(z = -y_t)]$

d)  $\ln(\beta)$  ile  $z$  arasında karesel ilişki:  $\ln \beta_4(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{log-lin}^Q = \exp[\ln \beta_4(z = -y_t)]$

e)  $\beta$  ile  $\ln(z)$  arasında lineer ilişki:  $\beta_5(z) = c_0 + c_1 \ln z$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{lin-log}^L = \beta_5(z = -y_t)$

f)  $\beta$  ile  $\ln(z)$  arasında karesel ilişki:  $\beta_6(z) = c_0 + c_1 \ln z + c_2 (\ln z)^2$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{lin-log}^Q = \beta_6(z = -y_t)$

g)  $\ln(\beta)$  ile  $\ln(z)$  arasında lineer ilişki:  $\ln \beta_7(z) = c_0 + c_1 \ln z$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{log-log}^L = \exp[\ln \beta_7(z = -y_t)]$

h)  $\ln(\beta)$  ile  $\ln(z)$  arasında karesel ilişki:  $\ln \beta_8(z) = c_0 + c_1 \ln z + c_2 (\ln z)^2$

Bu ilişki kullanılarak yapılan güvenilirlik tahmini  $\beta_{log-log}^Q = \exp[\ln \beta_8(z = -y_t)]$



## **2.5 Optimizasyon**

### **2.5.1 Giriş**

Optimizasyon, bir problemin amaç fonksiyonunu belirli kısıtlar altında problem için verilen tasarım değişkenlerini sistematik bir biçimde değiştirerek en küçüklemek (minimize) veya en büyükmek (maksimize) için kullanılan yöntemdir. Mühendislik sistemlerinde tasarım değişkenleri, geometrik özellikler ya da malzeme özellikleri olabilir. Amaç fonksiyonu da sistemin ağırlık, verim, maliyet gibi optimize edilmek istenen yanıtıdır. Gerçek hayatta kullanılan sistemler belli kısıtlara göre tasarlanmaktadır. Bu kısıtlar, problem çözümünde kısıt fonksiyonları olarak tanımlanır [25].

Mühendislik sistemlerinin, optimizasyonunda hesapsal maliyeti düşürmek için vekil modeller kullanılmaktadır.

### **2.5.2 Vekil modeller**

Vekil modeller, mühendislik sistemlerinde tasarım değişkenleri ile sistem yanıtları arasında matematiksel bir ilişki kuran yaklaşık modellerdir. Polinom yanıt yüzey [26], Kriging [27] ve Yapay Sinir Ağları [28] en yaygın kullanılan vekil modellerden bazılarıdır [29].

### **2.5.3 Yanıt yüzey yöntemi (Response surface methodology)**

Yanıt yüzey yöntemi; süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için ampirik model oluşturmada kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin toplanmış halidir. Yöntem, sürecin kalite özelliklerini ve performansının ölçüsünü etkileyen çok sayıda girdinin olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılır. Yapılan deney tasarımları ile oluşturulan çeşitli bağımsız değişkenlerden (girdi değişkenleri) etkilenen bir yanıtı (çıktı değişkeni) optimize etmek amaçlanır [30]. Yöntem, deney tasarımı yöntemleri ile elde edilen bu verilere polinomların uydurulması ile oluşturulmaktadır [31]. Genellikle ikinci dereceden polinomlar kullanılsa da, yeterli deney tasarımı yapıldığı takdirde yüksek dereceli polinomların da kullanıldığı görülür.

Polinomun derecesi arttıkça hesaplanması gereken katsayı sayısı ve kullanılması gereken örneklem sayısı da artmaktadır. Bu durum işlem maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

Yanıt yüzey yönteminde lineer polinom kullanılarak oluşturulan model aşağıda verilmiştir. Bu denklemde  $x_i$  tasarım değişkenleri,  $n$  tasarım değişkeni sayısı,  $\beta_0$  sabit terim,  $\beta_i$  fonksiyon parametreleri ve  $\varepsilon$  deneysel hataları göstermektedir [32].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.18)$$

Burada, veriye en uygun  $\beta$  bulma işlemine regresyon ve  $y$  fonksiyonuna da yanıt yüzey denmektedir.

İkinci derece polinomlar kullanılarak yanıt yüzey modelinin doğruluğunu artırmak mümkündür. İkinci derece polinomla oluşturulan model aşağıda gösterilmiştir. Denklemdeki  $\beta_{ij}$  terimi etkileşim çarpanlarının katsayısını göstermektedir [32].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.19)$$

### 3. ÖRNEK PROBLEMLER

Klasik kuyruk modelleme ve Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modelleme yönteminin doğruluk derecelerinin karşılaştırılması için kullanılan örnek problemler ve değişken sayıları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Örnek problemler ve değişken sayıları.

Örnek Problem	Problem Adı	Değişken Sayısı
1	İki değişkenli doğrusal örnek	2
2	Branin-Hoo	2
3	Camelback	2
4	Titreşim sönümleyici	2
5	Merkezi çatlaklı plaka	4
6	Dönen disk	6
7	Rosenbrock (6 değişkenli)	6
8	Dixon-Price (6 değişkenli)	6
9	Rosenbrock (9 değişkenli)	9
10	Dixon-Price (12 değişkenli)	12

Çalışmalarda kullanılan örnek problemler bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

#### 3.1 Örnek Problem 1: İki Değişkenli Doğrusal Örnek Problem

Bu örnek problemde, bir mekanik sistemin performansı iki adet rassal değişkenle ilişkilendirilmiştir. Bu değişkenlerden ilki sistemin yanıtı (response,  $R$ ), ikincisi ise sistemin kapasitesi (capacity,  $C$ ) olarak belirlenmiştir. Örnek olarak; statik yüklemeye altındaki bir bağlantı elemanı için,  $R$  malzeme üzerindeki gerilme değerine,  $C$  değeri ise malzemenin mukavemetine karşılık gelmektedir. Bu rassal değişkenlerin olasılık dağılımları, ortalama ve standart sapmaları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Örnek problem 1 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
$R$	Normal	$\mu_R$	6
$C$	Normal	100	8

Problemdeki sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = R - C \quad (3.1)$$

Bu problemde,  $R$  ve  $C$  rassal değişkenleri normal dağılıma sahip olduğundan  $Y$  fonksiyonu da normal dağılıma sahiptir.  $Y$  fonksiyonu pozitif değerler aldığı anda sistemin cevabı kapasitesinden fazla olacağı için sistemin emniyetsiz olduğu anlaşılmaktadır.

Bu problem için farklı  $\mu_R$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indislerinin analitik hesabı aşağıda verilen formül kullanılarak yapılabilir:

$$\beta = \frac{\mu_C - \mu_R}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_R^2}} = \frac{100 - \mu_R}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 10 - \frac{\mu_R}{10} \quad (3.2)$$

Bu çalışmada, üç farklı  $\mu_R$  değeri kullanılmış ve farklı güvenilirlik seviyeleri için  $k$  parametresinin güvenilirlik indisi tahminine etkisi incelenmiştir. Her  $\mu_R$  değeri için elde edilen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Örnek problem 1 için farklı  $\mu_R$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$\mu_R$	Güvenilirlik İndisi
70	3,00
60	4,00
50	5,00

### 3.2 Örnek Problem 2: Branin-Hoo Problemi

Branin-Hoo fonksiyonu  $x_1$  ve  $x_2$  rassal değişkenleri cinsinden

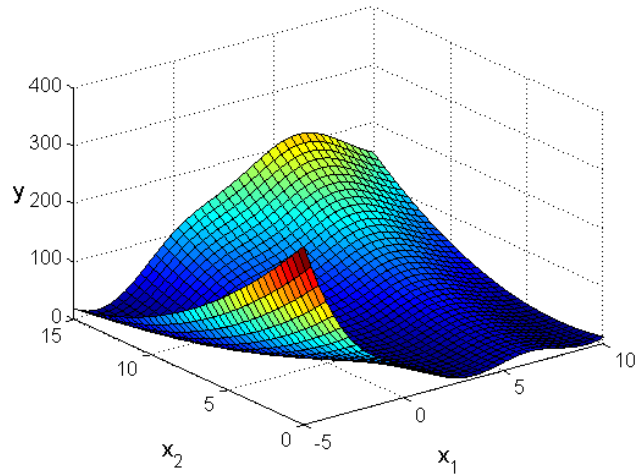
$$y_{bh}(x_1, x_2) = \left( x_2 - \frac{5.1x_1^2}{4\pi^2} + \frac{5x_1}{\pi} - 6 \right)^2 + 10 \left( 1 - \frac{1}{8\pi} \right) \cos(x_1) + 10 \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Fonksiyondaki  $x_1$  ve  $x_2$  rassal değişkenlerinin olasılık dağılımları, ortalama ve standart sapmaları Çizelge 3.4’te verilmiştir. Rassal değişkenlerin  $x_1 \in [-5, 10]$  ve  $x_2 \in [0, 15]$  aralığındaki değerleri için Branin-Hoo fonksiyonu Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4 : Örnek problem 2 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
$x_1$	Normal	2,5	2,5
$x_2$	Normal	7,5	2,5



Şekil 3.1 : Branin-Hoo fonksiyonu.

Branin-Hoo problemi için sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = y_{bh}(x_1, x_2) - y_{crit} \quad (3.4)$$

Denklemdaki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Bu örnek problemler ve müteakip örnek problemler için güvenilirlik indisi değerleri  $10^9$  örnekleme yapılan MCS ile hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 : Örnek problem 2 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
190	3,03
380	4,00
850	5,00

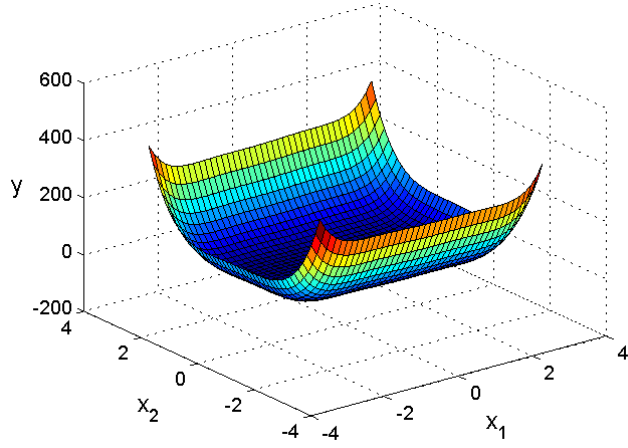
### 3.3 Örnek Problem 3: Camelback Problemi

Camelback fonksiyonu  $x_1$  ve  $x_2$  rassal değişkenleri cinsinden

$$y_{cb}(x_1, x_2) = \left(4 - 2.1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2 \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Fonksiyondaki  $x_1$  ve  $x_2$  rassal değişkenleri standart normal dağılıma sahip oldukları için, ortalama değerleri 0 ve standart sapma değerleri 1'dir. Rassal değişkenlerin  $x_1, x_2 \in [-3, 3]$  aralığındaki değerleri için Camelback fonksiyonu Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Camelback fonksiyonu.

Camelback problemi için sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = y_{cb}(x_1, x_2) - y_{crit} \quad (3.6)$$

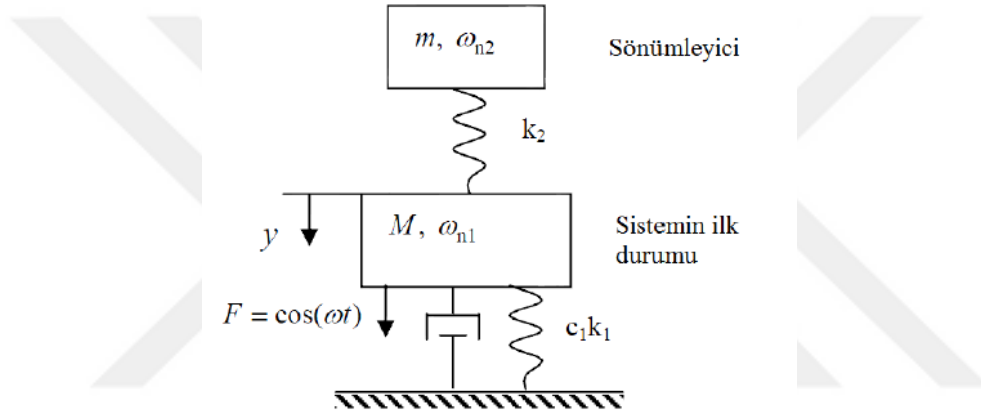
Denklemdaki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Örnek problem 3 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
400	2,95
1400	4,00
5000	5,05

### 3.4 Örnek Problem 4: Titreşim Sönümleyici Problemi

Titreşim sönümleyici problemi Şekil 3.3'te gösterilen tek serbestlik dereceli sönümlü dinamik bir sistemdir [16]. Bu problemde, orijinal sistem harmonik bir kuvvet ile harekete geçirilir ve sistemin titreşimi sönümleyici ile indirgenir. Titreşimin genliği sistemin şu parametrelerine bağlıdır:  $R = m/M$  (sönümleyici kütlelerinin tüm sistem kütlelerine oranı),  $\zeta$  (orijinal sistemin sönümleme oranı),  $b_1 = \omega_{n1}/\omega$  (sistemin doğal frekansının uyarılma frekansına oranı),  $b_2 = \omega_{n2}/\omega$  (sönümleyicinin doğal frekansının uyarılma frekansına oranı).



Şekil 3.3 : Titreşim sönümleyici.

Titreşim sönümleyici probleminin fonksiyonu  $b_1$  ve  $b_2$  rassal değişkenleri cinsinden,

$$y(b_1, b_2) = \frac{\left| 1 - \left( \frac{1}{b_2} \right)^2 \right|}{\sqrt{\left[ 1 - R \left( \frac{1}{b_1} \right)^2 - \left( \frac{1}{b_1} \right)^2 - \left( \frac{1}{b_2} \right)^2 + \left( \frac{1}{b_1 b_2} \right)^2 \right]^2 + 4\zeta^2 \left[ \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_1 b_2^2} \right]^2}} \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $y(b_1, b_2)$  sistemin genliğinin sistemin yarı-statik tepki genliğine oranını vermektedir. Fonksiyondaki  $R$  ve  $\zeta$  terimleri deterministik kabul edilmiş ve değerleri  $R = 0,01$  ve  $\zeta = 0,01$  olarak alınmıştır.  $b_1$  ve  $b_2$  rassal

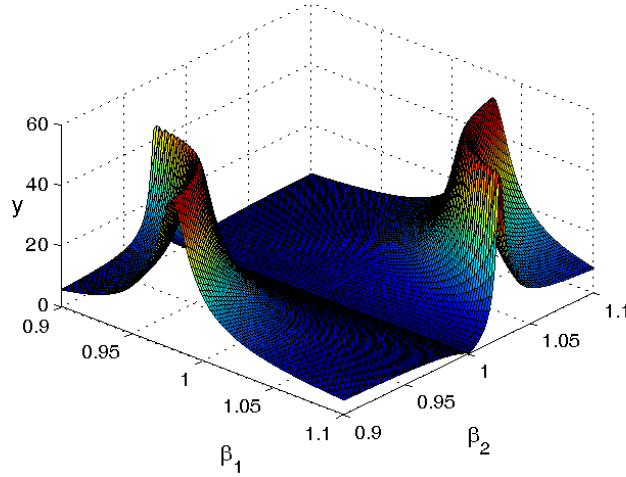


değişkenlerinin olasılık dağılımları, ortalama ve standart sapmaları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Örnek problem 2 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
$b_1$	Normal	1	0,025
$b_2$	Normal	1	0,025

Rassal değişkenlerin  $b_1, b_2 \in [0,9, 1,1]$  aralığındaki değerleri için titreşim sönümleyici sisteminin normalize edilmiş genliği Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Şekilden problemin sınır durum fonksiyonu doğrusallıktan oldukça uzak olduğu ve rassal değişken uzayında birden fazla kuyruk bölgesi bulunduğu görülmektedir.



Şekil 3.4 : Titreşim sönümleyicinin normalize edilmiş genliği.

Titreşim sönümleyici problemi için sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = y(b_1, b_2) - y_{crit} \quad (3.8)$$

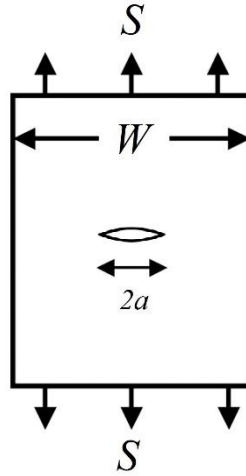
Denklemdaki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Örnek problem 4 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
48	3,03
52	3,42
54	4,46

### 3.5 Örnek Problem 5: Merkezi Çatlaklı Plaka Problemi

Bu problemde,  $2a$  uzunluğunda merkezi çatlak içeren bir plakanın aksel yüklemeye altındaki güvenilirliği incelenmiştir. Plaka, Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Burada  $a$  çatlak yarı uzunluğu,  $W$  plaka genişliği,  $S$  plakadaki dış gerilme yüklemesi ve  $K_{IC}$  ise kırılma tokluğu olup, bu değişkenlerin tamamı rassal değişken olarak alınmıştır. Bu rassal değişkenlerin olasılık dağılımları, ortalama ve standart sapmaları Çizelge 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.5 : Merkezi çatlaklı plaka.

Çizelge 3.9 : Örnek problem 5 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
$a$ [mm]	Normal	25	0,75
$W$ [mm]	Normal	500	5
$S$ [MPa]	Normal	100	100
$K_{IC}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	Normal	$\bar{K}_{IC}$	0,1 $\bar{K}_{IC}$

Bu problem için sınır durum fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$Y = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} S \sqrt{\pi a} - K_{IC} \quad (3.9)$$

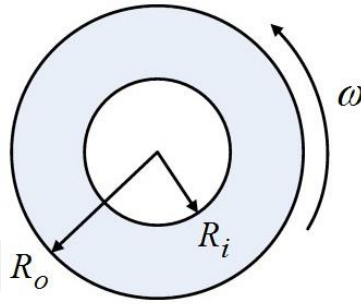
Denklemdaki kırılma tokluğunun ortalaması (  $\bar{K}_{IC}$  ) için farklı değerler kullanılarak farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $\bar{K}_{IC}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Örnek problem 5 için farklı  $\bar{K}_{IC}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$\bar{K}_{IC}$	Güvenilirlik İndisi
44	3,01
52	4,01
63	5,01

### 3.6 Örnek Problem 6: Dönen Disk Problemi

Şekil 3.6’da gösterilen  $\omega$  açısal hızı ile dönen diskin iç yarıçapı  $R_i$ , dış yarıçapı  $R_o$ ’dur. Disk malzemesinin özkütlesi  $\rho$ , kopma dayanımı  $S_u$  ve malzeme kullanım faktörü  $\alpha_m$ ’dir. Problemdaki rassal değişkenlerin olasılık dağılımları, ortalama ve standart sapmaları Çizelge 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.6 : Dönen disk geometrisi.

Çizelge 3.10 : Örnek problem 6 için rassal değişkenlerin dağılımları ve dağılım parametreleri.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
$\alpha_m$	Normal	0,9377	0,0459
$S_u$ [lb/in <sup>2</sup> ]	Normal	220.000	5.000
$\omega$ [rpm]	Normal	21.000	1.000
$\rho$ [lb/in <sup>3</sup> ]	Normal	0,2900	0,0058
$R_o$ [in]	Normal	24,000	0,5000
$R_i$ [in]	Normal	8,000	0,3000

Bu problem için sınır durum fonksiyonu, diskin parçalanma marjininin ( $M_b$ ) seçilen bir  $c$  eşik değerinden küçük olması durumu dikkate alınarak aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$Y = M_b - c; \quad M_b = \sqrt{\alpha_m S_U / \left[ \frac{\rho (2\pi\omega)^2 (R_o^3 - R_i^3)}{3(385.82)(R_o - R_i)} \right]} \quad (3.10)$$

Denklemdaki  $c$  eşik değeri için farklı değerler kullanılarak farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $c$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Örnek problem 6 için farklı  $c$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$c$	Güvenilirlik İndisi
0,38	3,06
0,36	4,05
0,34	5,08

### 3.7 Örnek Problem 7: Rosenbrock Problemi (6 değişkenli)

Rosenbrock fonksiyonu  $x$  rassal değişkenler vektörü cinsinden

$$y_{rb}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m-1} \left[ (1 - x_i)^2 + 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 \right] \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu problemde  $m=6$  kullanılmıştır. Bu problem için rassal değişkenlerin tamamı normal dağılıma sahip olup, ortalama değerleri ve standart sapmaları 2,5 olarak alınmıştır. Problemin sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = y_{rb}(\mathbf{x}) - y_{crit} \quad (3.12)$$

Denklemdaki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Örnek problem 7 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
1,7	3,03
3,4	4,03
6,3	5,03

### 3.8 Örnek Problem 8: Dixon-Price Problemi (6 değişkenli)

Dixon-Price fonksiyonu  $x$  rassal değişkenler vektörü cinsinden

$$y_{dp}(\mathbf{x}) = (x_1 - 1)^2 + \sum_{i=2}^m m(2x_i^2 - x_{i-1})^2 \quad (3.13)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu problemde  $m=6$  kullanılmıştır. Bu problem için rassal değişkenlerin tamamı normal dağılıma sahiptir. Problemin sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = y_{dp}(\mathbf{x}) - y_{crit} \quad (3.14)$$

Denklemdaki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için farklı güvenilirlik seviyeleri elde edilebilmektedir.  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Örnek problem 8 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
3,5	3,00
8,4	4,02
18	5,04

### 3.9 Örnek Problem 9: Rosenbrock Problemi (9 değişkenli)

Yukarıda tanımlanan Rosenbrock probleminde  $m=6$  yerine  $m=9$  kullanılmıştır. Denklemdeki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için elde edilen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.15'te verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Örnek problem 9 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
2	3,02
3,8	4,04
7	5,09

### 3.10 Örnek Problem 10: Dixon-Price Problemi (12 değişkenli)

Yukarıda tanımlanan Dixon-Price probleminde  $m=6$  yerine  $m=12$  kullanılmıştır. Denklemdeki  $y_{crit}$  teriminin farklı değerleri için elde edilen güvenilirlik indisi değerleri Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.15 : Örnek problem 10 için farklı  $y_{crit}$  değerlerine karşılık gelen güvenilirlik indisi değerleri.

$y_{crit}$	Güvenilirlik İndisi
9	3,05
19	4,02
40	5,07



#### 4. ÖRNEK PROBLEMLERDEN ELDE EDİLEN BULGULAR

Bölüm 3'te detayları verilen tüm problemlere klasik kuyruk modellemesi (KKM) yönteminde  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  yaklaşımları uygulanmış ve bu sekiz yaklaşımın içinden en doğru tahmini yapan dışkestirim yaklaşımı belirlenmiştir. En doğru tahmini yapan yaklaşım belirlenirken, güvenilirlik indisinin analitik yöntemlerle elde edilen gerçek değerine ( $\beta_{act}$ ) veya  $10^9$  örnekleme Monte Carlo benzetimi ile tahmin edilen ve gerçek değerine oldukça yakın olan değere ( $\hat{\beta}_{act}$ ) en yakın sonucu veren (karekök ortalama hata karesi en düşük olan) tahmine bakılmıştır. Farklı örnek problemler ve farklı güvenilirlik seviyeleri için, farklı dışkestirim yaklaşımlarının doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir. İşlem sırasında  $N=500$  adet örnekleme noktası kullanılmış ve buna bağlı olarak eşik değeri ( $F_r$ ) 0,90 olarak alınmıştır. Bu işlemler rastgele örnekleme etkilerini azaltmak amacıyla 10.000 kez tekrarlanmıştır. Bu bölümde anlatılan tüm çalışmalar MATLAB programında yürütülmüştür.

Çalışmanın ilk aşamasında belirlenen bu yaklaşımlar daha sonra Markov Zinciri Monte Carlo ile kuyruk modelleme (MZMC-KM) yönteminde kullanılmıştır. Güvenilirlik tahmini için KKM yöntemi ile güvenilirlik tahmininde en doğru sonucu veren yaklaşım kullanılmış ve normal teklif dağılımında kullanılan  $k$  parametresinin sekiz farklı değeri için güvenilirlik indisi tahmini yapılmıştır. Sonuçlar KKM sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki tüm karşılaştırmalar karekök ortalama hata karesi (KOHK) değerleri cinsinden yapılmıştır. KOHK, aşağıda verilen denklemden hesaplanmaktadır.

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.1)$$

Sonraki aşamada ise; KKM ve MZMC-KM yöntemleri için en doğru güvenilirlik tahminini veren dışkestirim yaklaşımları ayrı ayrı belirlenmiştir. Bunun sonucunda,

KKM için en uygun yaklaşımın MZMC-KM için en uygun dışkestirim yaklaşımından farklı olabileceği görülmüştür.

Son olarak, her iki aşama için de MZMC-KM yönteminde adım büyüklüğünü belirleyen, teklif dağılımındaki  $k$  parametresinin güvenilirlik indisi tahminine etkisi incelenmiş ve bu parametrenin optimum değerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. İncelenen 8 adet  $k$ 'dan en doğru sonucu veren  $k$  değerinin bir alt ve bir üst değerleri arasında 0,05 aralıkla artan  $k$  değerleri ele alınmış ve güvenilirlik tahmini yapılarak karekök ortalama hata kareleri hesaplanmıştır. Ardından, bu  $k$  değerleri ile hesaplanan KOHK değerleri arasında ikinci derece polinom yanıt yüzeyler oluşturulmuş ve oluşturulan yanıt yüzeyler kullanılarak  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır.

#### 4.1 Örnek Problem 1 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 1 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $\mu_R$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{lin-lin}^L$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 : Örnek problem 1 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$\mu_R$	$\beta_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
70	3,00	<b>0,237</b>	0,337	0,813	0,446	0,465	0,398	0,805	0,376
60	4,00	<b>0,388</b>	1,038	1,702	1,113	1,825	3,263	1,664	0,889
50	5,00	<b>0,548</b>	2,175	2,622	1,872	4,968	34,603	2,554	1,467

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapan yaklaşım belirlenmiştir.

MZMC-KM yöntemi ile yapılan güvenilirlik tahmininde teklif dağılımında kullanılan ölçek ( $k$ ) parametresi önemli rol oynamaktadır. Bu parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'ya sekiz farklı değer verilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2'de verilen

sonuçlara göre en doğru güvenilirlik tahmini  $k$  parametresi 0,5 değerine sahipken elde edilmiştir.

Çizelge 4.2 : Örnek problem 1 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

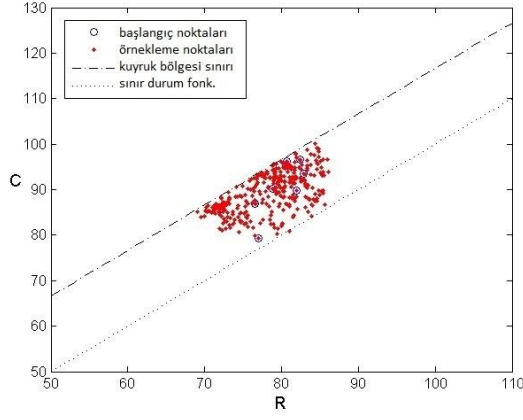
$\mu_R$	$\beta_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
70	3,00	0,441	0,279	<b>0,231</b>	0,234	0,263	0,298	0,327	0,392
60	4,00	0,700	0,429	<b>0,344</b>	0,363	0,399	0,467	0,515	0,634
50	5,00	0,966	0,589	<b>0,473</b>	0,494	0,553	0,631	0,739	0,875

Teklif dağılımında kullanılan  $k$  parametresi, o bölgede atılan adımın büyüklüğünü belirlediğinden, örnekleme noktalarının kuyruk bölgesindeki dağılımında rol oynar.  $k$ 'nın bu noktaların dağılımındaki etkisini gözlemleyebilmek için Örnek problem 1'de  $\mu_R=70$  iken çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan sekiz farklı  $k$  değeri için tekrarlanmayan örnekleme noktalarının sayıları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Kuyruk bölgesindeki noktaların dağılımları ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

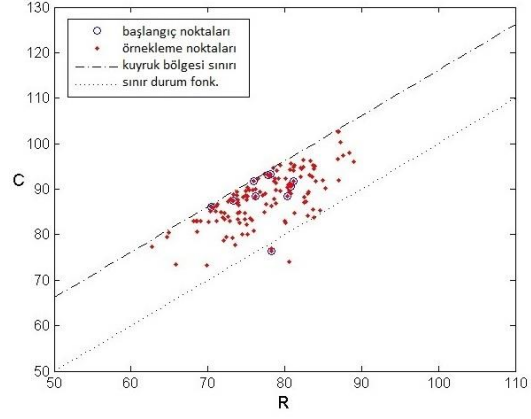
Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1'den görüldüğü gibi,  $k$  parametresi arttıkça rassal değişken uzayında geniş adımlar atarak örnekleme yapmayı mümkün kılar. Bu istenen bir durumdur. Ancak, bununla birlikte tekrarlanan noktaların sayıları da artış gösterir ve bu durum kabul edilen örnekleme noktalarının sayısının azalmasına yol açar. Bu pozitif ve negatif etkilerden dolayı, güvenilirlik tahmininin doğru şekilde yapılabilmesi için uygun  $k$  parametresinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında incelenen tüm problemlerde,  $k$ 'nın en uygun değerinin bulunması amaçlanmıştır.

Çizelge 4.3 :  $k$  parametresinin kuyruk bölgesindeki örneklem sayısına etkisi.

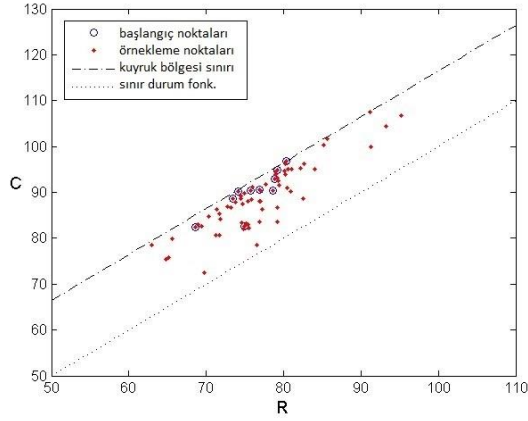
Teklif dağılımı ölçek parametresi, $k$	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2
Tekrarlanmayan örnek sayısı	321	229	141	94	68	51	41	29
Kuyruk modeli oluşturmada kullanılan örnek sayısı	410	410	410	410	410	410	410	410



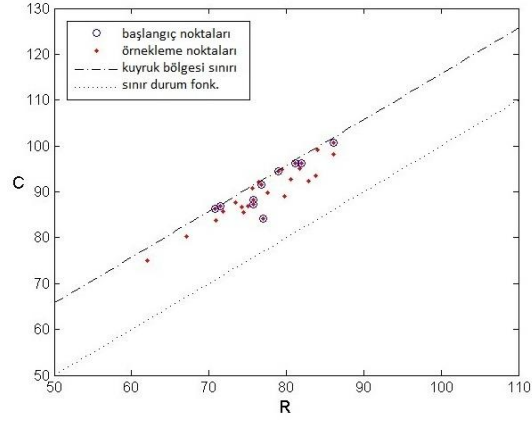
(a)  $k = 0,1$



(b)  $k = 0,5$



(c)  $k = 1$



(d)  $k = 2$

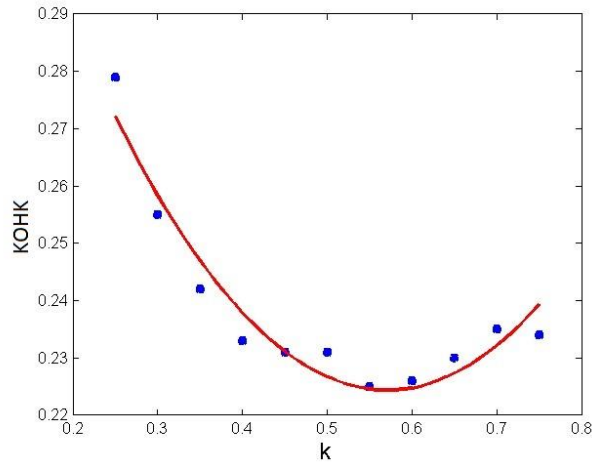
Şekil 4.1 :  $k$  parametresine göre kuyruk bölgesindeki örnekleme dağılımları.

Örnek Problem 1 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahmini  $k=0,5$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $[0,25, 0,75]$  arasında  $0,05$  aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.4).

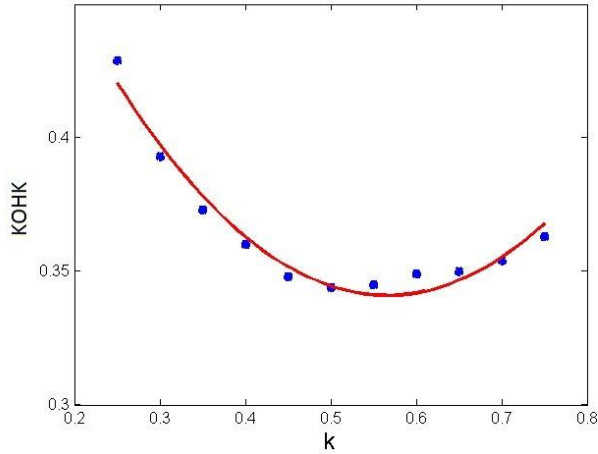
Çizelge 4.4 : Örnek problem 1 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$\mu_R$	$\beta_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
70	3,00	0,279	0,255	0,242	0,233	0,231	0,231	<b>0,225</b>	0,226	0,230	0,235	0,234
60	4,00	0,429	0,393	0,373	0,360	0,348	<b>0,344</b>	0,345	0,349	0,350	0,354	0,363
50	5,00	0,589	0,534	0,507	0,486	0,476	<b>0,473</b>	0,475	0,476	0,484	0,491	0,494

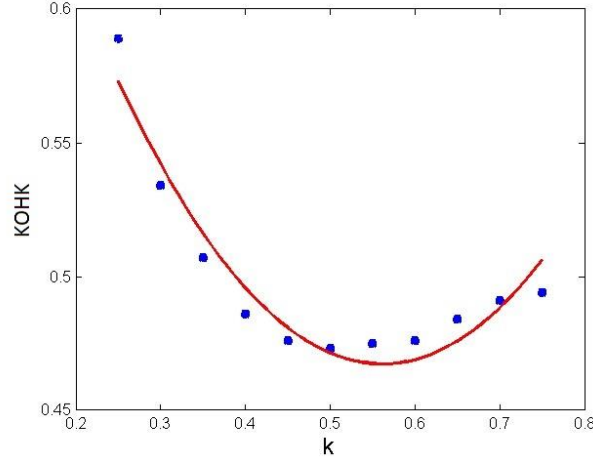
Optimum  $k$ 'nın bulunması için son adım olarak, incelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında ikinci derece polinom yanıt yüzeyler oluşturulmuştur (bkz. Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Oluşturulan yanıt yüzeyler kullanılarak  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 1 için,  $\mu_R = 70$  iken  $k^*=0,5707$ ,  $\mu_R = 60$  iken  $k^*=0,5662$  ve  $\mu_R = 50$  iken  $k^*=0,5613$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2 : Örnek problem 1'de  $\mu_R = 70$  için  $k$  ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzeyi.



Şekil 4.3 : Örnek problem 1'de  $\mu_R = 60$  için  $k$  ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzeyi.



Şekil 4.4 : Örnek problem 1’de  $\mu_R = 50$  için  $k$  ile KOHK arasında oluşturulan yanıt yüzeyi.

MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.5’te karşılaştırılmıştır. Bu örnek problemde tüm güvenilirlik seviyeleri için MZMC-KM yönteminin KKM yönteminden daha doğru sonuç verdiği gözlenmektedir. Ayrıca KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım olan  $\beta_{lin-lin}^L$  yaklaşımının MZMC-KM yöntemi için de en doğru sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.5 : Örnek problem 1 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$\mu_R$	$\beta_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
70	3,00	0,237	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,225</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
60	4,00	0,388	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,344</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
50	5,00	0,548	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,473</b>	$\beta_{lin-lin}^L$

Bu bölümde, Örnek problem 1 için detayları verilen çalışmalar tez kapsamında kullanılan tüm problemlere uygulanmıştır.

#### 4.2 Örnek Problem 2 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 2 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar  $y_{crit} = 190$  ve  $y_{crit} = 380$  iken  $\beta_{log-log}^Q$ ,  $y_{crit} = 850$  iken ise  $\beta_{lin-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.6 : Örnek problem 2 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
190	3,03	0,359	0,421	0,802	0,406	0,838	0,543	0,785	<b>0,333</b>
380	4,00	2,189	3,969	1,534	0,681	18,628	43,1x10 <sup>3</sup>	1,432	<b>0,509</b>
850	5,00	8,506	32,104	2,305	<b>0,908</b>	11,2x10 <sup>3</sup>	7,2 x10 <sup>65</sup>	2,076	1,692

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapanı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ ’nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Örnek problem 2 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
190	3,03	0,344	0,284	<b>0,271</b>	0,278	0,303	0,333	0,365	0,430
380	4,00	0,551	0,523	0,493	<b>0,480</b>	0,483	0,507	0,530	0,574
850	5,00	0,717	0,671	0,643	<b>0,639</b>	0,663	0,708	0,761	0,856

Örnek Problem 2 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,5$  ve  $k=0,75$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ ’ya en düşük güvenilirlik seviyesine sahip olan  $y_{crit} = 190$ ’da  $[0,25, 0,75]$  arasında, diğer iki güvenilirlik seviyesinde ise  $[0,5, 1]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 : Örnek problem 2 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
190	3,03	0,284	0,275	0,273	0,273	<b>0,265</b>	0,271	0,271	0,273	0,275	0,277	0,278
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
380	4,00	0,493	0,493	0,485	0,484	0,482	<b>0,480</b>	0,483	0,480	0,485	0,482	0,483
850	5,00	0,643	0,633	<b>0,630</b>	0,633	0,636	0,639	0,644	0,642	0,655	0,656	0,663

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 2 için,  $y_{crit} = 190$  iken  $k^*=0,5051$ ,  $y_{crit} = 380$  iken  $k^*=0,7499$  ve  $y_{crit} = 850$  iken  $k^*=0,6458$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.9'da karşılaştırılmıştır. Bu problem için, Örnek problem 1'den farklı olarak KKM'den elde edilen sonuçlara göre her güvenilirlik seviyesi için en doğru tahmini yapan yaklaşımın MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu vermediği görülmektedir.

Çizelge 4.9 : Örnek problem 2 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
190	3,03	0,333	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,265</b>	$\beta_{log-log}^Q$
380	4,00	0,509	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,480</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
850	5,00	0,908	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,630</b>	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.3 Örnek Problem 3 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 3 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{lin-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.



Çizelge 4.10 : Örnek problem 3 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^O$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^O$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^O$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^O$
400	2,95	0,726	0,491	0,622	<b>0,266</b>	2,022	0,810	0,584	0,266
1400	4,00	4,641	19,281	1,390	<b>0,566</b>	818,2	4431,1	1,230	0,717
5000	5,05	21,756	$337 \times 10^3$	2,166	<b>0,764</b>	$2,6 \times 10^{15}$	$3,5 \times 10^{64}$	1,822	2,403

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yaparı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.11 'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Örnek problem 3 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
400	2,95	0,307	0,229	<b>0,211</b>	0,219	0,232	0,243	0,251	0,280
1400	4,00	0,504	0,423	<b>0,406</b>	0,407	0,423	0,437	0,465	0,494
5000	5,05	0,706	0,564	<b>0,533</b>	0,553	0,592	0,636	0,676	0,747

Örnek Problem 3 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahmini  $k=0,5$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $[0,25, 0,75]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12 : Örnek problem 3 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
400	2,95	0,229	0,221	0,216	0,212	0,214	<b>0,211</b>	0,214	0,214	0,215	0,215	0,219
1400	4,00	0,423	0,413	0,405	0,406	0,400	0,406	<b>0,395</b>	0,400	0,399	0,402	0,407
5000	5,05	0,564	0,551	0,542	0,537	<b>0,532</b>	0,553	0,541	0,539	0,548	0,554	0,553

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 3 için,  $y_{crit} = 400$  iken  $k^*=0,5368$ ,  $y_{crit} = 1400$  iken  $k^*=0,5639$  ve  $y_{crit} = 5000$  iken  $k^*=0,5036$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir.

MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.13'te karşılaştırılmıştır. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru

tahmini yapan yaklaşım olan  $\beta_{lin-log}^Q$  yaklaşımının MZMC-KM yöntemi için de en doğru sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.13 : Örnek problem 3 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
400	2,95	0,266	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,211</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
1400	4,00	0,566	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,395</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
5000	5,05	0,764	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,532</b>	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.4 Örnek Problem 4 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 4 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.14'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar  $y_{crit} = 48$  iken  $\beta_{log-log}^Q$ ,  $y_{crit} = 52$  ve  $y_{crit} = 54$  iken ise  $\beta_{lin-lin}^L$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.14 : Örnek problem 4 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
48	3,03	0,370	0,408	0,733	0,390	0,977	0,580	0,703	<b>0,329</b>
52	3,42	<b>0,434</b>	0,815	1,101	0,717	1,248	1,101	1,064	0,617
54	4,46	<b>1,179</b>	1,870	2,128	1,724	1,317	2,204	2,086	1,599

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapanı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Örnek problem 4 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
48	3,03	0,422	0,202	<b>0,199</b>	0,224	0,287	0,371	0,643	0,899
52	3,42	0,860	0,438	<b>0,376</b>	0,435	0,511	0,583	0,653	0,830
54	4,46	5,915	1,409	<b>1,045</b>	1,235	1,729	2,166	3,873	13,689

Örnek Problem 4 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahmini  $k=0,5$  iken yapılmıştır. Optimum değerin bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $[0,25, 0,75]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16 : Örnek problem 4 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
48	3,03	0,200	0,193	<b>0,191</b>	0,193	0,198	0,199	0,203	0,203	0,208	0,220	0,224
52	3,42	0,438	0,412	0,390	0,381	0,377	<b>0,376</b>	0,392	0,394	0,397	0,417	0,435
54	4,46	1,074	1,066	1,074	1,045	<b>1,010</b>	1,045	1,030	1,028	1,078	1,077	1,079

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 4 için,  $y_{crit} = 48$  iken  $k^*=0,3722$ ,  $y_{crit} = 52$  iken  $k^*=0,4933$  ve  $y_{crit} = 54$  iken  $k^*=0,4925$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.17'de karşılaştırılmıştır. Bu problem için, KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar ile MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu veren yaklaşımların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17 : Örnek problem 4 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
48	3,03	0,329	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,191</b>	$\beta_{lin-lin}^Q$
52	3,42	0,434	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,376</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
54	4,46	1,179	$\beta_{log-lin}^L$	<b>1,010</b>	$\beta_{log-lin}^L$

#### 4.5 Örnek Problem 5 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 5 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^O$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^O$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^O$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^O$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.18’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $\bar{K}_{IC}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{lin-lin}^L$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.18 : Örnek problem 5 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$\bar{K}_{IC}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^O$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^O$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^O$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^O$
44	3,01	<b>0,241</b>	0,350	0,826	0,456	0,504	0,452	0,819	0,388
52	4,01	<b>0,396</b>	1,003	1,712	1,126	1,859	4,847	1,671	0,901
63	5,01	<b>0,546</b>	2,265	2,631	1,862	5,285	12,178	2,561	1,447

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapamı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19 : Örnek problem 5 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$\bar{K}_{IC}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
44	3,01	0,524	0,330	0,250	<b>0,247</b>	0,271	0,308	0,357	0,453
52	4,01	0,851	0,527	0,381	<b>0,378</b>	0,410	0,484	0,549	0,730
63	5,01	1,175	0,726	0,544	<b>0,532</b>	0,569	0,667	0,775	1,024

Örnek Problem 5 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahmini  $k=0,75$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $[0,5, 1]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.20).

Çizelge 4.20 : Örnek problem 5 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$\bar{K}_{IC}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
44	3,01	0,254	0,249	0,243	0,246	<b>0,241</b>	0,248	0,253	0,253	0,262	0,261	0,270
52	4,01	0,382	0,386	0,373	0,373	<b>0,369</b>	0,377	0,378	0,390	0,396	0,404	0,410
63	5,01	0,539	0,524	0,523	<b>0,512</b>	0,520	0,521	0,531	0,539	0,547	0,558	0,575

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 5 için,  $\bar{K}_{IC} = 44$  iken  $k^*=0,6669$ ,  $\bar{K}_{IC} = 52$  iken  $k^*=0,6690$  ve  $\bar{K}_{IC} = 63$  iken  $k^*=0,6737$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir.

MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.21’de karşılaştırılmıştır. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım olan  $\beta_{lin-lin}^L$  yaklaşımının MZMC-KM yöntemi için de en doğru sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.21 : Örnek problem 5 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$\bar{K}_{IC}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
44	3,01	<b>0,241</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,241</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
52	4,01	0,396	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,369</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
63	5,01	0,546	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,512</b>	$\beta_{lin-lin}^L$

#### 4.6 Örnek Problem 6 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 6 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $c$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{lin-lin}^L$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.22 : Örnek problem 6 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$c$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
0,38	3,06	<b>0,241</b>	0,365	0,880	0,496	0,452	0,471	0,873	0,424
0,36	4,05	<b>0,431</b>	0,973	1,767	1,188	1,481	2,456	1,731	0,971
0,34	5,08	<b>0,650</b>	1,936	2,726	1,990	3,762	36,154	2,664	1,615

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapanı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.23 : Örnek problem 6 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$c$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
0,38	3,06	0,547	0,356	0,259	<b>0,250</b>	0,266	0,301	0,355	0,472
0,36	4,05	0,799	0,521	0,393	<b>0,376</b>	0,405	0,463	0,539	0,709
0,34	5,08	1,085	0,707	0,567	<b>0,539</b>	0,571	0,643	0,737	0,961

Örnek Problem 6 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahmini  $k=0,75$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $[0,5, 1]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.24).

Çizelge 4.24 : Örnek problem 6 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$c$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
0,38	3,06	0,261	0,255	0,251	0,248	<b>0,247</b>	0,250	0,250	0,251	0,255	0,256	0,270
0,36	4,05	0,393	0,387	0,381	<b>0,374</b>	0,380	0,376	0,377	0,383	0,386	0,400	0,402
0,34	5,08	0,561	0,546	0,551	0,543	0,540	<b>0,539</b>	0,549	0,551	0,554	0,561	0,584

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 6 için,  $c = 0,38$  iken  $k^*=0,7255$ ,  $c = 0,36$  iken  $k^*=0,7168$  ve  $c = 0,34$  iken  $k^*=0,7030$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.25'te karşılaştırılmıştır. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru

tahmini yapan yaklaşım olan  $\beta_{lin-lin}^L$  yaklaşımının MZMC-KM yöntemi için de en doğru sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.25 : Örnek problem 6 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$c$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
0,38	3,06	<b>0,241</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	0,247	$\beta_{lin-lin}^L$
0,36	4,05	0,431	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,374</b>	$\beta_{lin-lin}^L$
0,34	5,08	0,650	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,539</b>	$\beta_{lin-lin}^L$

#### 4.7 Örnek Problem 7 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 7 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.26'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{log-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.26 : Örnek problem 7 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
1,7	3,03	0,484	0,425	0,754	0,346	1,281	0,553	0,727	<b>0,284</b>
3,4	4,03	1,919	3,740	1,556	0,788	19,218	$44,3 \times 10^3$	1,454	<b>0,506</b>
6,3	5,03	5,132	19,056	2,401	1,275	1221	$29,4 \times 10^{15}$	2,218	<b>0,827</b>

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapanı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.27 : Örnek problem 7 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
1,7	3,03	0,341	0,292	0,269	<b>0,262</b>	0,266	0,275	0,293	0,340
3,4	4,03	1,078	0,668	<b>0,553</b>	0,570	0,636	0,779	0,913	1,436
6,3	5,03	1,037	1,030	1,006	0,981	0,960	<b>0,948</b>	0,956	1,001

Örnek Problem 7 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,75$ ,  $k=0,5$  ve  $k=1,25$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya en düşük güvenilirlik seviyesine sahip olan  $y_{crit} = 1,7$ 'de  $[0,5, 1]$  arasında,  $y_{crit} = 3,4$ 'te  $[0,25, 0,75]$  arasında ve  $y_{crit} = 6,3$ 'te  $[1, 1,5]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.28).

Çizelge 4.28 : Örnek problem 7 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
1,7	3,03	0,269	0,266	0,266	0,264	0,261	0,262	<b>0,259</b>	0,263	0,265	0,261	0,266
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
3,4	4,03	0,629	0,622	0,596	0,579	0,562	0,553	<b>0,547</b>	0,554	0,559	0,560	0,570
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=1,0$	$k=1,05$	$k=1,1$	$k=1,15$	$k=1,2$	$k=1,25$	$k=1,3$	$k=1,35$	$k=1,4$	$k=1,45$	$k=1,5$
6,3	5,03	0,960	0,964	0,955	0,960	0,956	<b>0,948</b>	0,950	0,952	0,955	0,949	0,956

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 7 için,  $y_{crit} = 1,7$  iken  $k^*=0,7922$ ,  $y_{crit} = 3,4$  iken  $k^*=0,5869$  ve  $y_{crit} = 6,3$  iken  $k^*=1,2685$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.29'de karşılaştırılmıştır. Bu problem için, KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar ile MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu veren yaklaşımların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.



Çizelge 4.29 : Örnek problem 7 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
1,7	3,03	0,284	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,259</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
3,4	4,03	<b>0,510</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,547	$\beta_{log-log}^Q$
6,3	5,03	<b>0,827</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,948	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.8 Örnek Problem 8 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 8 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.30’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar  $y_{crit} = 3,5$  ve  $y_{crit} = 8,4$  iken  $\beta_{log-log}^Q$   $y_{crit} = 18$  iken ise  $\beta_{lin-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.30 : Örnek problem 8 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
3,5	3,00	0,577	0,442	0,704	0,310	1,536	1,305	0,674	<b>0,267</b>
8,4	4,02	2,780	6,569	1,493	0,681	46,441	$3,2 \times 10^6$	1,370	<b>0,533</b>
18	5,04	8,157	44,728	2,330	<b>1,100</b>	$8 \times 10^4$	$1,69 \times 10^{28}$	2,101	1,149

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapamı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31 : Örnek problem 8 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
3,5	3,00	0,340	0,269	0,241	<b>0,239</b>	0,246	0,256	0,282	0,328
8,4	4,02	0,586	0,533	0,513	0,497	<b>0,497</b>	0,509	0,526	0,595
18	5,04	0,899	0,855	0,830	0,811	<b>0,808</b>	0,811	0,820	0,896

Örnek Problem 8 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,75$  ve  $k=1$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya en düşük güvenilirlik seviyesine sahip olan  $y_{crit} = 3,5$ 'te  $[0,5, 1]$  arasında,  $y_{crit} = 8,4$ 'te ve  $y_{crit} = 18$ 'de  $[0,75, 1,25]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.32).

Çizelge 4.32 : Örnek problem 8 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
3,5	3,00	0,241	<b>0,238</b>	0,239	0,240	0,240	0,239	0,242	0,241	0,241	0,245	0,246
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1,0$	$k=1,05$	$k=1,1$	$k=1,15$	$k=1,2$	$k=1,25$
8,4	4,02	0,497	0,499	<b>0,495</b>	0,495	0,497	0,497	0,502	0,499	0,503	0,504	0,509
18	5,04	0,811	0,810	0,811	0,808	0,809	0,808	0,806	<b>0,806</b>	0,806	0,810	0,811

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 8 için,  $y_{crit} = 3,5$  iken  $k^*=0,6373$ ,  $y_{crit} = 8,4$  iken  $k^*=0,9032$  ve  $y_{crit} = 18$  iken  $k^*=1,032$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.33'te karşılaştırılmıştır. Bu problem için, KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar ile MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu veren yaklaşımların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.33 : Örnek problem 8 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
3,5	3,00	0,267	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,238</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
8,4	4,02	0,533	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,495</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
18	5,04	1,100	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,806</b>	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.9 Örnek Problem 9 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 9 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.34'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM'den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{log-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.34 : Örnek problem 9 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
2,0	3,02	0,439	0,414	0,756	0,356	1,129	0,610	0,732	<b>0,289</b>
3,8	4,04	1,724	3,178	1,582	0,818	15,749	428,783	1,487	<b>0,526</b>
7,0	5,09	4,761	16,895	2,470	1,337	826,720	$10,6 \times 10^{16}$	2,292	<b>0,829</b>

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapamı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.35'te verilmiştir.

Çizelge 4.35 : Örnek problem 9 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
2,0	3,02	0,348	0,305	0,278	<b>0,272</b>	0,274	0,280	0,299	0,358
3,8	4,04	1,102	0,700	0,569	<b>0,565</b>	0,644	0,759	0,896	1,433
7,0	5,09	1,103	1,094	1,074	1,043	1,019	<b>1,003</b>	1,006	1,062

Örnek Problem 9 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,75$  ve  $k=1,25$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $y_{crit} = 2$ 'de ve  $y_{crit} = 3,8$ 'de  $[0,5, 1]$  arasında, en yüksek güvenilirlik seviyesine sahip olan  $y_{crit} = 7$ 'de ise  $[1, 1,5]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.36).

Çizelge 4.36 : Örnek problem 9 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
2,0	3,02	0,278	0,278	0,278	0,275	0,276	0,272	<b>0,271</b>	0,275	0,272	0,275	0,274
3,8	4,04	0,569	0,554	<b>0,553</b>	0,572	0,563	0,565	0,574	0,594	0,593	0,612	0,615
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=1$	$k=1,05$	$k=1,1$	$k=1,15$	$k=1,2$	$k=1,25$	$k=1,3$	$k=1,35$	$k=1,4$	$k=1,45$	$k=1,5$
7,0	5,09	0,965	0,959	0,956	0,954	0,955	0,951	0,950	0,955	0,955	<b>0,949</b>	0,957

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 9 için,  $y_{crit} = 2,0$  iken  $k^*=0,8521$ ,  $y_{crit} = 3,8$  iken  $k^*=0,5801$  ve  $y_{crit} = 7,0$  iken  $k^*=1,315$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.37’de karşılaştırılmıştır. Bu problem için, KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar ile MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu veren yaklaşımların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.37 : Örnek problem 9 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
2,0	3,02	0,289	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,271</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
3,8	4,04	<b>0,526</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,553	$\beta_{log-log}^Q$
7,0	5,09	<b>0,829</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,949	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.10 Örnek Problem 10 için KKM ve MZMC-KM Sonuçları

Örnek problem 10 için KKM yönteminde uygulanan  $\beta_{lin-lin}^L$ ,  $\beta_{lin-lin}^Q$ ,  $\beta_{log-lin}^L$ ,  $\beta_{log-lin}^Q$ ,  $\beta_{lin-log}^L$ ,  $\beta_{lin-log}^Q$ ,  $\beta_{log-log}^L$  ve  $\beta_{log-log}^Q$  dışkestirim yaklaşımlarının KOHK değerleri Çizelge 4.38’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre her  $y_{crit}$  değeri için en küçük KOHK değerini veren yaklaşımlar koyu fontla gösterilmiştir. Bu problem için KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşım  $\beta_{log-log}^Q$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.38 : Örnek problem 10 için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^O$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^O$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^O$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^O$
9,0	3,05	0,571	0,482	0,757	0,342	1,568	0,740	0,726	<b>0,284</b>
19	4,02	2,379	5,134	1,520	0,712	28,029	$30,6 \times 10^3$	1,408	<b>0,521</b>
40	5,07	7,342	34,733	2,379	1,152	$5,5 \times 10^4$	$6,63 \times 10^{30}$	2,161	<b>1,072</b>

Sonraki aşamada, probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yaparı belirlenmiştir.  $k$  parametrenin etkisini incelemek için  $k$ 'nın değişimine bağlı KOHK değerleri Çizelge 4.39'da verilmiştir.

Çizelge 4.39 : Örnek problem 10 için MZMC-KM tahminlerinin  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,1$	$k=0,25$	$k=0,5$	$k=0,75$	$k=1$	$k=1,25$	$k=1,5$	$k=2$
9,0	3,05	0,363	0,305	0,275	<b>0,267</b>	0,272	0,283	0,309	0,378
19	4,02	0,631	0,576	0,547	<b>0,524</b>	0,528	0,530	0,559	0,647
40	5,07	0,954	0,901	0,873	0,852	<b>0,834</b>	0,848	0,883	0,982

Örnek Problem 10 için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,75$  ve  $k=1$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya  $y_{crit} = 9$ 'da ve  $y_{crit} = 19$ 'da  $[0,5, 1]$  arasında, en yüksek güvenilirlik seviyesine sahip olan  $y_{crit} = 40$ 'ta ise  $[0,75, 1,25]$  arasında 0,05 aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 4.40).

Çizelge 4.40 : Örnek problem 10 için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
9,0	3,05	0,275	0,276	0,273	0,271	0,271	0,267	<b>0,267</b>	0,268	0,270	0,272	0,272
19	4,02	0,547	0,541	0,535	0,535	0,531	0,524	0,529	0,527	<b>0,523</b>	0,523	0,528
$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1,0$	$k=1,05$	$k=1,1$	$k=1,15$	$k=1,2$	$k=1,25$
40	5,07	0,852	0,853	0,845	0,839	0,842	<b>0,834</b>	0,839	0,839	0,839	0,843	0,848

İncelenen bu değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değeri hesaplanmıştır. Örnek problem 10 için,  $y_{crit} = 9,0$  iken  $k^*=0,7988$ ,  $y_{crit} = 19$  iken  $k^*=0,9611$  ve  $y_{crit} = 40$  iken  $k^*=1,0366$  değerleri optimum değer olarak belirlenmiştir.

MZMC-KM ile KKM yöntemlerinin doğruluk dereceleri Çizelge 4.41’de karşılaştırılmıştır. Bu problem için, KKM’den elde edilen sonuçlara göre en doğru tahmini yapan yaklaşımlar ile MZMC-KM yönteminde en doğru sonucu veren yaklaşımların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.41 : Örnek problem 10 için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$y_{crit}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım
9,0	3,05	0,284	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,267</b>	$\beta_{lin-log}^Q$
19	4,02	<b>0,521</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,523	$\beta_{lin-log}^Q$
40	5,07	1,072	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,834</b>	$\beta_{lin-log}^Q$

#### 4.11 Optimum $k$ Değerinin Bulunması

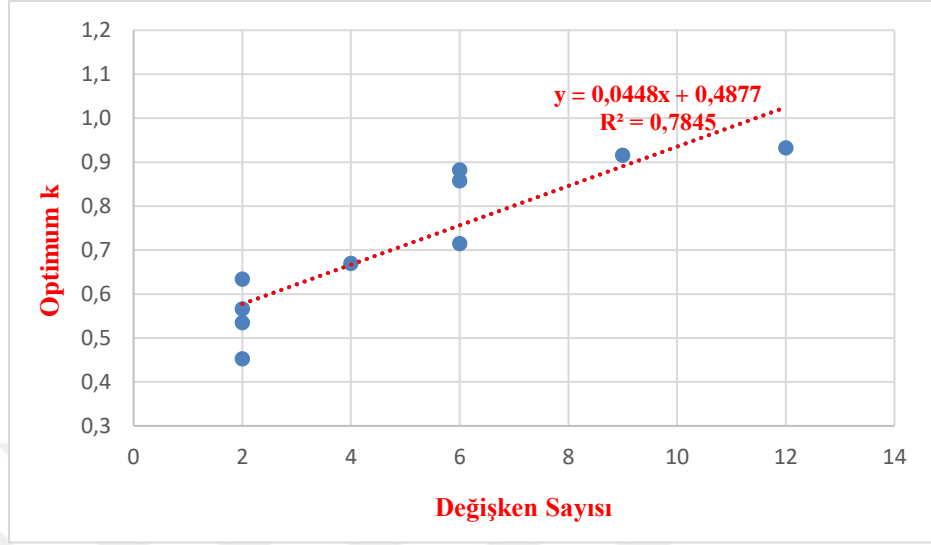
$k$  parametresi ile KOHK değerleri arasında oluşturulan yanıt yüzeyler sonucu tüm örnek problemler için  $k$  parametresinin optimum değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan optimum  $k$  değerleri Çizelge 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.42 : Tüm örnek problemler için düşük, orta ve yüksek güvenilirlik seviyeleri için hesaplanan optimum  $k$  değerleri.

Örnek Problem	Değişken Sayısı	$\beta_{düşük}$ için $k$	$\beta_{orta}$ için $k$	$\beta_{yüksek}$ için $k$	Ortalama $k$
<b>1</b>	2	0,5707	0,5662	0,5613	0,5661
<b>2</b>	2	0,5051	0,7499	0,6458	0,6336
<b>3</b>	2	0,5368	0,5639	0,5036	0,5348
<b>4</b>	2	0,3722	0,4933	0,4925	0,4527
<b>5</b>	4	0,6669	0,6690	0,6737	0,6699
<b>6</b>	6	0,7255	0,7168	0,7030	0,7151
<b>7</b>	6	0,7922	0,5869	1,2685	0,8825
<b>8</b>	6	0,6373	0,9032	1,0320	0,8575
<b>9</b>	9	0,8521	0,5801	1,3150	0,9157
<b>10</b>	12	0,7988	0,9611	1,0366	0,9322

Çizelge 4.42’de verilen sonuçlara göre teklif dağılımındaki  $k$  parametresinin optimum değerinin ele alınan örnek problemdeki rassal değişken sayısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Problemdeki rassal değişken sayısı arttıkça optimum  $k$  değeri artmaktadır (bkz. Şekil 4.5). Ele alınan örnek problemlerdeki rassal değişken adeti

$(n_{\text{var}})$  ile optimum  $k$  değeri ( $k^*$ ) arasındaki ilişki kullanılarak  $k^* = 0,4877 + 0,0448n_{\text{var}}$  ampirik denklemi elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : Optimum  $k$  değerinin problemdeki rassal değişken sayısına göre değişimi.



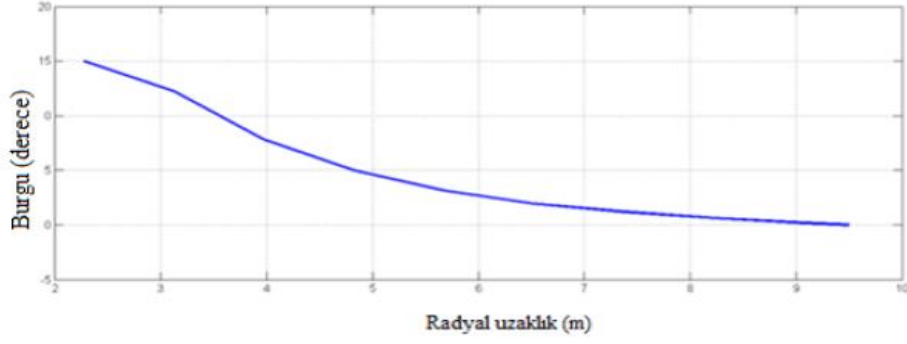


## 5. RÜZGÂR TÜRİNİ İÇİN KKM VE MZMC-KM İLE YAPILAN GÜVENİLİRLİK TAHMİNLERİ

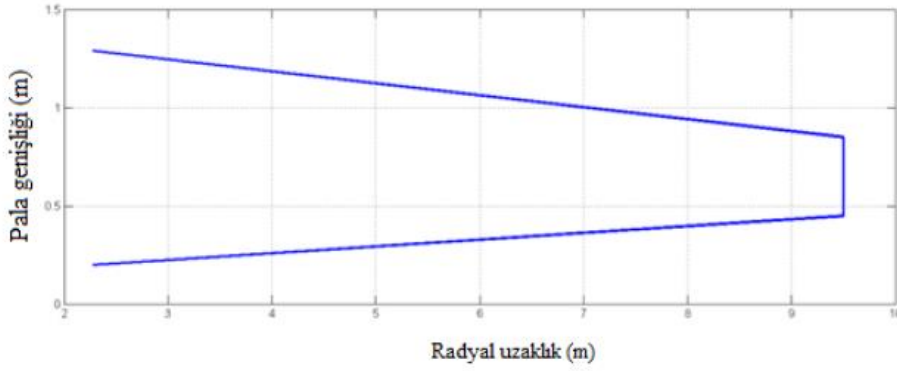
Bu bölümde Risoe rüzgâr türbininin güvenilirlik tahmini KKM ve MZMC-KM yöntemleri kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Risoe rüzgâr türbini, kanatları hem bükülmüş hem de konikleştirilmiş bir yapıya sahip olan Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) Sürdürülebilir Enerji Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen 100 kW güç üretebilen yatay eksenli bir rüzgâr türbinidir [33]. Risoe rüzgâr türbininin genel özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Rüzgâr türbini palalarının burgu açısı ve incelme değişimi sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir [34].

Çizelge 5.1 : Risoe rüzgâr türbininin genel özellikleri [34].

Pala Sayısı	3
Türbin Çapı	19 m
Dönme Hızı	47,5 rpm
Devreye Giren Rüzgâr Hızı	4 m/s
Kontrol Tipi	İrtifa
Anma Gücü	100 kW
Kök Uzantısı	2,3 m
Pala Ayar Açısı	1,8 derece
Maksimum Burgu Açısı	15 derece
Pala Kök Veter Uzunluğu	1,09 m
Pala Uç Veter Uzunluğu	0,45 m
Kanat Profili	NACA 63-4xx serisi



Şekil 5.1 : Risoe rüzgâr türbini palalarının radyal uzaklık boyunca burgu açısı değişimi.



Şekil 5.2 : Risoe rüzgâr türbini palalarının radyal uzaklık boyunca incelme değişimi.

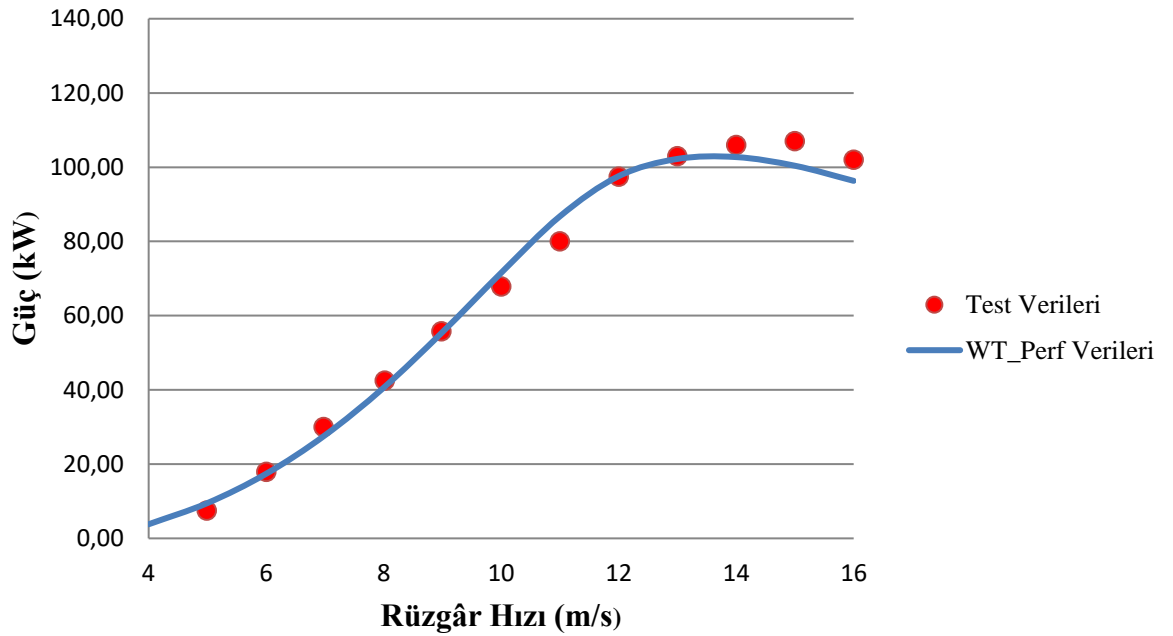
Rüzgâr türbini için yapılan güvenilirlik tahmini ve sonuçlar bir sonraki bölümde ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır.

### 5.1 Rüzgâr Türbini için Bulgular

Bu çalışmada Risoe rüzgâr türbininin kanatlarının aerodinamik performansı dikkate alınmıştır. Türbininin aerodinamik performansı, rüzgâr hızı maksimum güç rüzgâr hızı olan 13.5 m/s'deyken rüzgâr türbininin 100 kW üretebilmesiyle ölçülmüştür.

Rüzgâr türbininin ürettiği güç Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) geliştirdiği ücretsiz bir yazılım olan, pala elemanı momentum teorisine (BEM Theory) dayanan WT\_Perf ile hesaplanmıştır. PEMT, rüzgâr

türbinlerinin aerodinamik performansını değerlendirmek için kullanılan en eski ve en yaygın yöntemlerden biridir. Pala elemanı teorisi ve momentum teorisinin bileşiminden oluşan bu teori, birçok varsayıma dayanmasına rağmen, düşük rüzgâr hızları için kabul edilebilir sonuçlar vermektedir [35]. Bu teoride akışın; sürekli, homojen, kararlı, sıkıştırılmaz, aksisimetrik olduğu varsayımı yapılmakta ve türbülans etkisi ihmal edilmektedir [36]. Pala elemanı momentum teorisi ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde açıklanmıştır. WT\_Perf aracılığıyla elde edilen veriler ile Risoe rüzgâr türbini test verileri karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



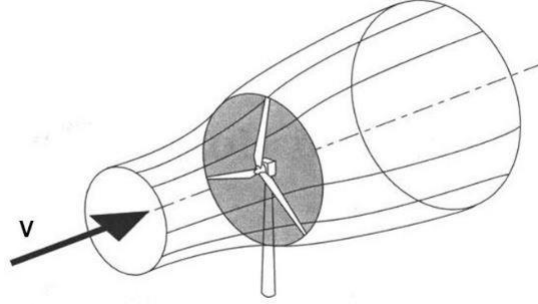
Şekil 5.3 : WT\_Perf verileri ile Risoe rüzgâr türbini test verileri.

Şekil 5.3'ten görüldüğü gibi WT\_Perf'in performansının, düşük rüzgâr hızları için oldukça iyi olduğu ve maksimum güç rüzgâr hızı olan 13,5 m/s için, WT\_Perf performansının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

## 5.2 Pala Elemanı Momentum Teorisi (PEMT)

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisinden kinetik enerji elde etmek için kullanılan sistemlerdir. Rüzgârın hızı, türbin içinden geçerken kinetik enerjisinin soğurulması nedeniyle yavaşlar. Türbin dışındaki hızı değişmeyen rüzgâr kütlelerinin türbin içindeki

rüzgâr kütlelerinden ayrıldığı varsayımı yapılır. Akış alanının ayrılmış kısmı Şekil 5.4'te verildiği gibi yukarı ve aşağı doğru uzanan uzun bir akış tüpü şeklindeki sınır yüzeyle yapılmaktadır.



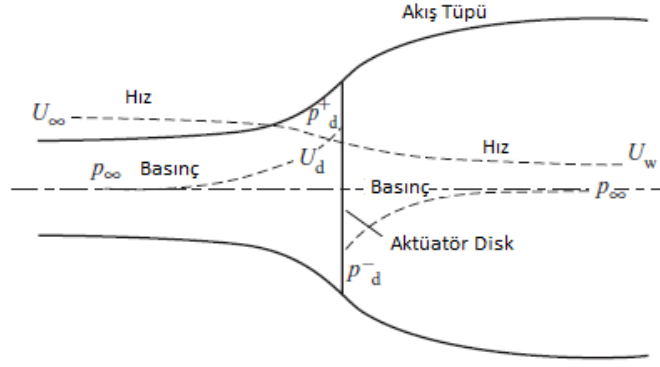
Şekil 5.4 : Rüzgâr türbini boyunca oluşmuş akış tüpü [35].

Pervane veya rüzgâr türbini palalarındaki yerel kuvvetleri hesaplamak için kullanılan Pala Elemanı Momentum Teorisi (şerit teorisi), pala elemanı teorisi ve momentum teorisinin birleşiminden oluşmaktadır [35].

PEMT için oldukça basit fakat kullanışlı bir yaklaşım olan Rankine-Froude "momentum" veya "aktüatör diski" modeli (1865, 1889) esas alınabilir [37]. Rüzgâr türbininin kararlı hal durumu için kullanılan klasik analiz, Betz ve Glauert (1930) tarafından geliştirilmiştir. Bu bölümde, Betz Limiti'nin bir rüzgâr türbini için uygulanması açıklanmaktadır [38].

### 5.2.1 Aktüatör disk konsepti (Betz limiti)

Rüzgâr türbinlerindeki temel aerodinamik akış aktüatör disk konsepti ile tanımlanmaktadır. Bu konseptte göre, rüzgâr türbininin aktüatör disk olduğu düşünülür (bkz. Şekil 5.5). Bu kavramı lineer momentum teorisi ile açıklamak için akışın homojen, kararlı ve sıkıştırılmaz olduğu, itki kuvvetinin disk alanı boyunca sabit tutulduğu, pala sayısının sonsuz olduğu ve girdap oluşmadığı varsayımları yapılmış, ayrıca yüzeysel sürüklenme kuvveti ihmal edilmiştir [36].



Şekil 5.5 : Rüzgâr türbininin aktüatör disk modeli [35].

Birim zamanda akış tüpünün belirli bir kesit alanından geçen hava kütlesi  $\rho A_1 U_1$  ile gösterilir. Bu gösterimde;  $\rho$  havanın yoğunluğu,  $A$  kesit alanı ve  $U_1$  akış hızına karşılık gelmektedir.  $A_d$ , aktüatör diskin alanı olmak üzere; kütle akış hızı tüp boyunca değişmeyeceği için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (5.1)$$

Aktüatör diskte, tüp içindeki serbest akış hızı bir hız değişimine neden olur. Diskteki akış doğrultusunda hız;

$$U_d = U_\infty (1 - a) \quad (5.2)$$

ile ifade edilir.  $a$  indüklenmiş hızın aksel indüksiyon faktörünün boyutsuzlaştırılmış formu veya içeriye akış faktörü olarak tanımlanmaktadır. Havanın hızı aktüatör diskten geçerken değişir. Hız değişiminden kaynaklanan momentum değişim oranı aşağıdaki denklemden bulunmaktadır.

$$(U_\infty - U_w) \rho A_d U_d \quad (5.3)$$

Momentumdaki bu değişimi yaratan kuvvet ise, disk etrafındaki basınç farkından kaynaklanmaktadır.

$$(p_d^+ - p_d^-) = (U_\infty - U_w) \rho A_d U_\infty (1 - a) \quad (5.4)$$

Bernoulli denklemi, diskin giriş ve çıkışındaki hızlar için ayrı ayrı uygulandığında bu basınç farkına ulaşılır.

$$U_w = (1 - 2a)U_\infty \quad (5.5)$$

Rüzgârdan elde edilen güç, aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır ve güç katsayısı ( $C_p$ ), elde edilen gücün kullanılabilir güce oranı olarak tanımlanır.

$$P = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (5.6)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} = 4a(1 - a)^2 \quad (5.7)$$

$C_p$  maksimum değere ulaştığında, aşağıdaki denklemden maksimum güç bulunmaktadır.

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (5.8)$$

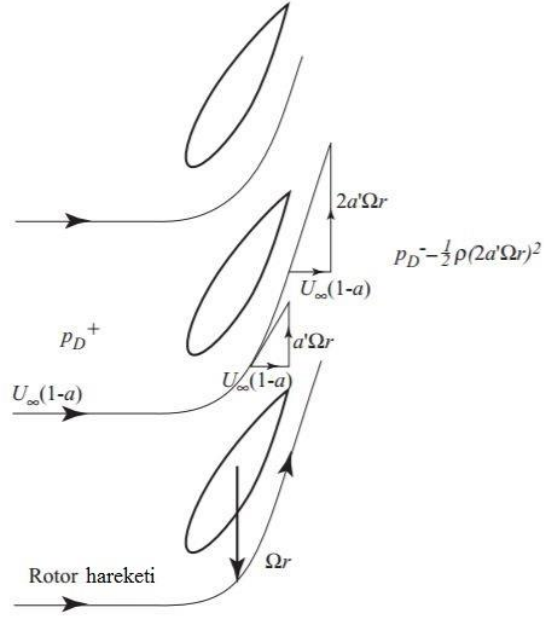
Burada,  $a=1$  iken  $C_p=0$  olacağından, kabul edilebilir tek çözüm için  $a=1/3$  olmaktadır.

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (5.9)$$

Maksimum güç katsayısı, Betz limiti olarak da bilinmektedir.

### 5.2.2 Açısal momentum (Momentum teorisi)

Lineer momentum teorisine göre, akışta dönmenin olmadığı varsayımı yapılmaktadır. Ancak, normalde dönme durumundaki rüzgâr türbininin rotasyonu açısal momentum oluşturur ve bu açısal momentum türbin torku ile ilişkilendirilebilir. Türbin diskinden havanın geçmesiyle oluşan tork, bu torka eşit şiddette ve ters yönde bir tork ihtiyacı doğurur. Bu durum havanın, türbin ile zıt yönde dönmesine ve açısal momentum kazanmasına sebep olur. Hava, girdap bölümündeki dönme yönüne teğet ve aksenal serbest akış hızına paralel olacak şekilde hız bileşenlerine sahip olur. Teğet hız bileşeni, kinetik enerjiyi artırmaktadır [35].



Şekil 5.6 : Türbin diski arkasındaki hız [35].

Teğet hız bileşeni, kinetik enerjiyi artırmaktadır. Bu hızın değişimini belirtmek için teğetsel indüksiyon faktörü,  $a'$  kullanılmaktadır. Diskin aşağı yöndeki teğetsel hız değeri aşağıda verilmiştir.

$$w = 2a'\Omega r \quad (5.10)$$

Açısal hızla hareket eden bir kontrol hacmi kullanıldığında palalar boyunca oluşan basınç farkı için bir ifade türetilebilir. Disk boyunca, açısal hız  $\Omega$ 'dan  $\Omega + 2a'\Omega$ 'ya yükselir. Teğetsel ve eksenel hızlar tüm radyal konumlarda aynı değildir. İndüklenen her iki hız bileşeninin değişmesini mümkün kılmak için, türbin diskinin  $r$  yarıçaplı,  $\delta r$  radyal genişlikli ve  $\delta A$  alanlı halka şeklinde bir parçası düşünülür. Halkadaki tork, halkadan geçen havanın açısal momentum değişim oranına eşittir [35].

*Tork = Kütle akış hızı x Teğetsel Hız Değişimi x Yarıçap*

$$\delta Q = \rho \delta A_a U_\infty (1-a) 2a' \Omega r^2 \quad (5.11)$$

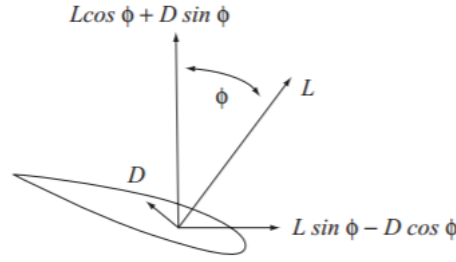
$$\delta P = \delta Q \cdot \Omega \quad (5.12)$$

$\delta Q$ , şaft üzerine etkiyen torku ve  $\delta P$  türbinden elde edilen güç değerini ifade etmektedir.

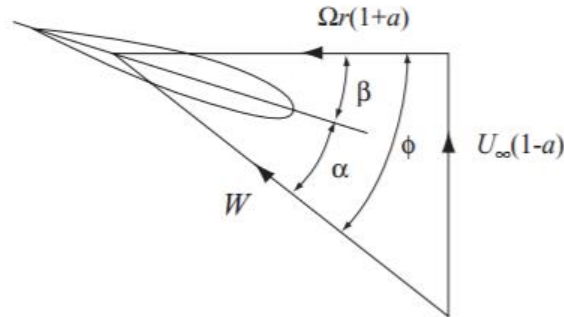
### 5.2.3 Pala elemanı teorisi

Bir rüzgâr türbininin palaları üzerindeki kuvvetler, taşıma ve sürüklenme katsayılarının ve hücum açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Palanın, pala elemanları adı verilen  $N$  bölüme ayrıldığı varsayılır. Pala Elemanı teorisini açıklamak için bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar; pala elemanları arasında etkileşimin olmaması, kanat boyunca hız bileşenlerinin ihmal edilmesi ve pala elemanlarına etkiyen kuvvetin belirlenmesi için yalnızca pala elemanı profiline taşıma ve sürüklenme özelliklerinin kullanılmasıdır.

Pala elemanı analizinde, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri bileşenleri bağıl rüzgâr hızı yönüne dik ve paraleldir (bkz. Şekil 5.7). Her biri  $R$  yarıçapına,  $c$  pala genişliğine ve  $\beta$  eğim açısına sahip  $N$  adet pala elemanından oluşan bir türbin ele alınmıştır. Pala elemanları, Şekil 5.8'den gösterildiği gibi  $\Omega$  açısal hızında ve  $U_\infty$  rüzgâr hızında,  $(1+a')$   $\Omega r$  teğetsel hızla ve  $(1-a)$   $U_\infty$  aksenal hızla hareket etmektedir.



Şekil 5.7 : Pala elemanına etkiyen kuvvetler [35].



Şekil 5.8 : Pala elemanı hız bileşenleri [35].



Pala elemanını üzerindeki bileşke bağlı hız aşağıda verilmiştir.

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (5.13)$$

Bağlı hız, elemana dönme düzlemi ile arasında bir açı oluşturarak etki eder.

Bu açının bulunması için Şekil 5.7'den aşağıdaki denklem türetilebilir.

$$\tan\phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1-a')} = \frac{(1-a)}{(1-a')\lambda_r} \quad (5.14)$$

Her pala elemanı için dönme düzlemine normal etkileyen net kuvvet aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\delta F = B(l\cos\phi + d\sin\phi)\delta r \quad (5.15)$$

Her pala elemanında oluşan tork da aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\delta Q = Br(l\cos\phi - d\sin\phi)\delta r \quad (5.16)$$

#### 5.2.4 Pala elemanı momentum teorisinin elde edilmesi

Pala Elemanı Momentum Teorisi (PEMT) ya da Şerit teorisi temel olarak, her bir pala elemanından ve momentum teorilerinden türetilen kuvvet ve tork ilişkilerini eşitleyerek aksenal ve teğetsel indüksiyon faktörlerini modellemeyi amaçlamaktadır. Dairesel yarıçap üzerine etki eden toplam kuvvet hem pala elemanı teorisi hem momentum teorisi ile bağımsız şekilde hesaplanır. PEMT hesaplaması Prandtl pala ucu basınç kaybı düzeltme faktörünü de içermektedir. İki teorideki kuvvet denklemleri eşitlendiğinde aksenal indüksiyon faktörü elde edilmektedir [35].

$$2\rho\delta AFU_{\infty}^2 a(1-a) = B(l\cos\phi + d\sin\phi)\delta r \quad (5.17)$$

$$\delta A = r\delta r \quad (5.18)$$

$$l = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c \quad (5.19)$$

$$d = d \frac{1}{2} \rho W^2 c \quad (5.20)$$

$$C_N = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (5.21)$$

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (5.22)$$

$\sigma'$ , yerel sağlamlık faktörüne karşılık gelmektedir.

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2\phi}{\sigma' C_N} + 1} \quad (5.23)$$

Teğetsel indüksiyon faktörünün elde edilmesi için iki teoriden de elde edilen tork denklemleri eşitlenir.

$$2\rho\delta AFU_\infty^2 a(1-a)2\Omega a' r^2 = Br(l\cos\phi + d\sin\phi)\delta r \quad (5.24)$$

$$C_{T_{an}} = C_l \sin\phi - C_d \cos\phi \quad (5.25)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin\phi \cos\phi}{\sigma' C_{T_{an}}} - 1} \quad (5.26)$$

İndüksiyon faktörleri hesaplandıktan sonra Denklem 5.26'dan rüzgâr türbini için güç hesabı yapılabilir.

### 5.3 Rüzgâr Türbini için Monte Carlo Simülasyonu ile Güvenilirlik Tahmini

Rüzgâr türbinleri sürekli olarak değişken yüklemelere maruz kalırlar. Güvenilirlik analizlerinde birçok yükleme durumunun ve rassal değişkenlerin sisteme etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri Monte Carlo Simülasyonudur.

Güvenilirlik hesabı için, Risoe rüzgâr türbininde normal dağılıma sahip olduğu varsayılan rassal değişkenler; türbin yarıçapı, dönme hızı, pala ayar açısı, maksimum burulma, pala kök veter uzunluğu ve pala uç veter uzunluğu olarak alınmıştır. Oluşturulan rassal değişkenler WT\_Perf yazılımında kullanılmış ve güç değerleri MATLAB aracılığıyla elde edilmiştir. Değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir [15].

Çizelge 5.2 : Risoe rüzgâr türbinindeki rassal değişkenler.

Rassal değişken	Dağılım	Ortalama	Standart Sapma
Türbin Yarıçapı	Normal	9,5 m	0,01 m
Dönme Hızı	Normal	47,5 rpm	0,03 rpm
Pala Ayar Açısı	Normal	1,8 derece	0,05 derece
Pala Kök Veter Uzunluğu	Normal	1,09 m	0,01 m

Risoe rüzgâr türbininin güvenilirlik tahmini, KKM ve MZMC-KM yöntemlerinden elde edilecek güvenilirlik tahmini sonuçlarıyla karşılaştırmak için ilk olarak Monte Carlo Simülasyonu (MCS) yapılmıştır.

MCS ile güvenilirlik tahmini yapılırken,  $N=10.000.000$  adet örnekleme noktası kullanılmıştır. Bu tez kapsamında problemin iki farklı durumu incelenmiştir. Bu durumların ilki; dört rassal değişkenli (türbin yarıçapı, dönme hızı, pala ayar açısı, pala kök veter uzunluğu), ikincisi ise üç rassal değişkenli (türbin yarıçapı, dönme hızı ve pala ayar açısı) problemlerdir. Problemden üç ve dört rassal değişken kullanıldığında elde edilen güvenilirlik indisi ve hasar olasılığı değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Üç ve dört rassal değişkenli durumlar için güvenilirlik indisleri ve hasar olasılığı değerleri.

Değişken Sayısı ( $n_{var}$ )	$\hat{\beta}_{act}$	$P_f$
4	3,69	$1,12 \times 10^{-4}$
3	4,92	$4,33 \times 10^{-7}$

Bölüm 4'de detayları verilen tüm yöntemler rüzgâr türbini problemine uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

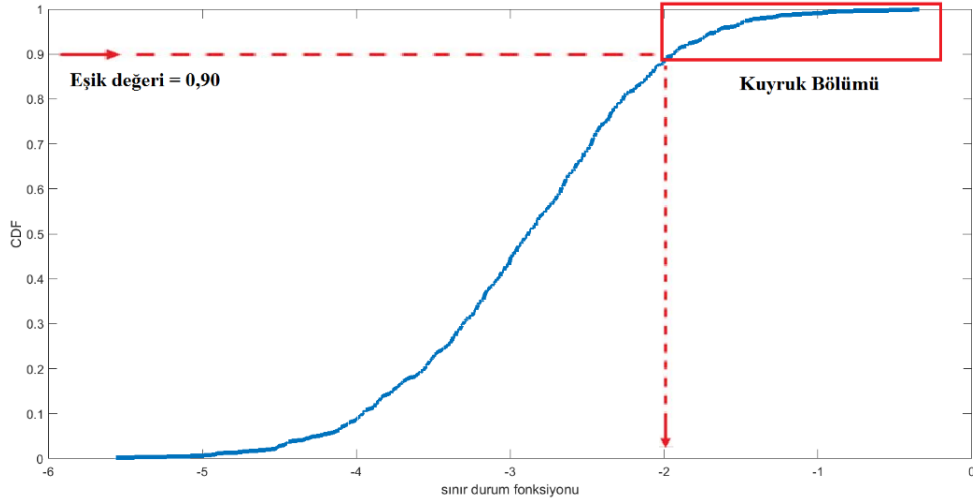
#### 5.4 Rüzgâr Türbini için KKM ile Güvenilirlik Tahmini

Risoe rüzgâr türbininin güvenilirlik tahmini için diğer yöntem olan KKM yöntemi uygulanmıştır. İşlem maliyetini minimuma indirebilmek için MCS analizleri sonucunda depolanan güç değerleri arasından rastgele  $N=500$  adet örnekleme noktası seçilerek sınır durum fonksiyonları hesaplanmış ve kuyruk modellenmesi yapılmıştır.

Bu işlemler rastgele örnekleme etkilerini azaltmak amacıyla 1.000'er kez tekrarlanmıştır. Kullanılan sınır durum fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$Y = P_{crit} - P(x) \quad (5.27)$$

Bu denklemde  $x$  değeri rassal değişken vektörünü temsil ederken,  $P_{crit}=100$  alınarak güvenilirlik tahmini yapılmıştır.



Şekil 5.9 : Rüzgâr türbini problemi için kümülatif dağılım fonksiyonu.

Rüzgâr türbini probleminin üç ve dört değişkenli hali için KKM ile yapılan güvenilirlik tahmini sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için klasik kuyruk modellemesi tahminlerinin karekök ortalama hata karesi değerleri.

$n_{var}$	$\hat{\beta}_{act}$	$\beta_{lin-lin}^L$	$\beta_{lin-lin}^Q$	$\beta_{lin-log}^L$	$\beta_{lin-log}^Q$	$\beta_{log-lin}^L$	$\beta_{log-lin}^Q$	$\beta_{log-log}^L$	$\beta_{log-log}^Q$
4	3,69	<b>0,376</b>	0,793	1,422	0,901	1,147	1,872	1,391	0,733
3	4,92	<b>0,557</b>	2,401	2,539	1,780	4,854	3323,2	2,469	1,379

Sonrasında probleme MZMC-KM yöntemi uygulanmış ve bu yöntem için sekiz yaklaşımdan en doğru tahmini yapanı belirlenmiştir. MZMC-KM ile KKM yöntemlerinden elde edilen KOHK değerleri Çizelge 5.5'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.5 : Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için KKM ve MZMC-KM tahminlerinin karekök ortalama hata karelerinin kıyaslanması.

$n_{var}$	$\hat{\beta}_{act}$	KKM	Yaklaşım	MZMC-KM	Yaklaşım	$k$
4	3,69	0,376	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,320</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	0,75
3	4,92	0,557	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,480</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	0,5

Sonuçlardan görüldüğü gibi rüzgâr türbini probleminde değişken sayısının azaltılması, hem güvenilirlik ( $\hat{\beta}_{act}$ ) değerinin artmasında hem de MZMC-KM yönteminin KKM yönteminden daha iyi performans göstermesinde etkili olmuştur.

Üç ve dört rassal değişkenli problem için, MZMC-KM yönteminde en doğru güvenilirlik tahminleri  $k=0,5$  ve  $k=0,75$  iken yapılmıştır. Optimum değer bulunabilmesi için, en doğru yaklaşım göz önünde bulundurularak  $k$ 'ya sırasıyla  $[0,25, 0,75]$  arasında ve  $[0,5, 1]$  arasında,  $0,05$  aralıklarla artan değerler verilmiş ve güvenilirlik tahmini yapılarak KOHK sonuçları karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6 : Üç rassal değişkenli ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için MZMC-KM tahminlerinin belirtilen aralıktaki  $k$  parametresine bağlı karekök ortalama hata karesi değerleri.

$n_{var}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$	$k=0,8$	$k=0,85$	$k=0,9$	$k=0,95$	$k=1$
4	3,69	0,338	0,336	0,326	0,330	<b>0,316</b>	0,320	0,338	0,328	0,349	0,362	0,351
$n_{var}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k=0,25$	$k=0,3$	$k=0,35$	$k=0,4$	$k=0,45$	$k=0,5$	$k=0,55$	$k=0,6$	$k=0,65$	$k=0,7$	$k=0,75$
3	4,92	0,632	0,561	0,543	0,522	0,491	0,480	0,475	<b>0,472</b>	0,491	0,474	0,489

Rüzgâr türbini probleminin bu iki durumu için ele alınan değerler ile hesaplanan KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu  $k$  parametresinin optimum değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.7'de, hesaplanan bu optimum değerler, bölüm 4'teki örnek problemlerin analizleri sonucu oluşturulan  $k^*=0,4877 + 0,0448n_{var}$  denklemi kullanılarak elde edilen yaklaşık değerler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.7 : Optimum  $k$  değerlerinin yaklaşık değerlerle karşılaştırılması.

$n_{var}$	$\hat{\beta}_{act}$	$k^*$	$k^* = 0,4877 + 0,0448n_{var}$
4	3,69	0,689	0,667
3	4,92	0,603	0,622

Çizelge 5.7’de verilen sonuçlar incelendiğinde optimum  $k$  değerlerinin  $k^* = 0,4877 + 0,0448n_{var}$  denkleminden elde edilen  $k$  değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, elde edilen bu denklemin problemin değişken sayısına bağlı olarak,  $k$  parametresinin optimum değerini yaklaşık olarak belirlemekte kullanılabileceğini ispatlamaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Metropolis – Hastings algoritması ile çalıştırılan Markov Zinciri Monte Carlo (MZMC) yöntemi ile Kuyruk Modelleme yönteminin bir arada kullanımına dayalı yeni bir yöntem olan Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modellemesi (MZMC-KM) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem KKM’de sınır durumu fonksiyonlarının hesabı sırasında, sadece eşik değerinin üstünde kalan yani kuyruk bölgesindeki fonksiyonların kullanılıp diğerlerinin atılması ve bu durumun işlem maliyetini arttırması dezavantajının üstesinden gelmek için oluşturulmuştur. Geliştirilen yöntemde, ilk adım kuyruk bölgesinde bir başlangıç noktası bulmaktır, sonrasında bu bölgede MZMC ile müteakip örnekleme noktalarıyla bir seri oluşturulur. Bu durum, sınır durum fonksiyonlarının kuyruk bölgesinde hesaplanmasını ve güvenilirlik tahmininin daha düzgün şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır.

İlk olarak, Klasik Kuyruk Modellemesi ve Markov Zinciri Monte Carlo tabanlı kuyruk modellemesi yöntemleri değişken sayıları farklı on adet sayısal örnek probleme uygulanmış ve karesel ortalama hata kareleri cinsinden sonuçlar karşılaştırılmıştır. KOHK, hem gerçek değerden sapmaları hem de verilerin birbirinden sapmalarını içermesi sebebiyle kıyaslama ölçütü olarak seçilmiştir. KKM yönteminde  $N=500$  adet örnekleme noktası oluşturulmuş ve eşik değeri  $F_t=0,90$  seçilmiştir. Elde edilen verilere göre, dört ya da daha az sayıda rassal değişkene sahip örnek problemlerde MZMC-KM yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Altı değişkenli örnek problemler için geliştirilen yöntemin çoğunlukla KKM’den daha doğru olduğu görülürken problemdeki rassal değişken sayısının artması MZMC-KM’nin KKM’ye göre üstün olan performansını düşürmektedir.

Tez kapsamında yatay eksenli rüzgâr türbini probleminin iki farklı durumu incelenmiştir. Bunlardan ilki dört rassal değişkene sahip yatay eksenli rüzgâr türbini problemidir. Problemdeki rassal değişkenler; türbin yarıçapı, dönme hızı, pala ayar açısı, pala kök veter uzunluğudur. Problemin ikinci durumunda ise, pala kök veter

uzunluğu rassal değişkeni sabit tutulmuş ve değişken sayısı üçe indirilmiştir. Rüzgâr türbini problemine güvenilirlik tahmini için ilk olarak Monte Carlo Simülasyonu uygulanmıştır. Analiz, rastgele örnekleme etkilerini azaltmak amacıyla 10.000.000 adet örnekleme noktası kullanılarak yapılmıştır. Ortalama güç değeri kullanılarak kritik güç değeri için güvenilirlik indisleri ( $\hat{\beta}_{act}$ ) hesaplanmıştır. Sonraki aşamada, problemin iki farklı rassal değişken sayısına sahip olduğu durumlara sırasıyla KKM ve MZMC-KM yöntemleri uygulanmış ve MCS ile hesaplanan  $\hat{\beta}_{act}$  değerleri ile aralarındaki karesel ortalama hata kareleri hesaplanmıştır. Buna göre, problemin üç ve dört değişkenli durumlarında MZMC-KM yönteminin KKM yönteminden daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda, geliştirilen yöntemin yanı sıra, MZMC yöntemindeki teklif dağılımına ölçek parametresi ( $k$ ) eklenmiş ve bu parametrenin optimum değerinin bulunması amaçlanmıştır. Tüm problemlerde her güvenilirlik seviyesi için  $k$ 'nın en doğru sonucu verdiği aralıklar belirlenmiş ve yanıt yüzey yöntemi kullanılarak bu aralıktaki  $k$  değerleri ile KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu optimum değerler hesaplanmıştır. Çalışma sonunda, problemdeki rassal değişken sayısı arttıkça optimum  $k$  değerinin de artış gösterdiği görülmüştür. Problemin güvenilirlik seviyesiyle optimum  $k$  değeri arasında herhangi bir korelasyona rastlanmamıştır.

Örnek problemlerden elde edilen optimum  $k$  değerleri ile problemlerin rassal değişken sayıları arasında yaklaşık bir ilişki kurulmuş ve  $k^* = 0,4877 + 0,0448n_{var}$  ampirik denklemi elde edilmiştir.

Tezin son aşamasında, üç ve dört rassal değişkenli rüzgâr türbini problemi için MZMC-KM yönteminde  $k$ 'nın en doğru sonucu verdiği aralıklar belirlenmiş ve bu aralıktaki  $k$  değerleri ile KOHK değerleri arasında oluşturulan ikinci derece polinom yanıt yüzeyler sonucu optimum değerler hesaplanmıştır. Örnek problemlerin analizi sonucu rassal değişken sayıları ile teklif dağılımı ölçek parametresi arasında kurulan yaklaşık ilişki rüzgâr türbini problemi için de kullanılmış ve problemde elde edilen optimum değerler ile karşılaştırılmıştır (bkz. Çizelge 5.7). Bu karşılaştırma sonucunda ampirik denklemden elde edilen değerler ile yanıt yüzey yönteminden elde edilen



değerlerin birbirleriyle örtüştüğü görülmüş ve rassal değişken sayısı ile optimum  $k$  değerleri arasında kurulan ilişkinin iyi sonuç verdiği anlaşılmıştır.

Bu tez kapsamındaki çalışmalara ek olarak, yatay eksenli bir rüzgâr türbini kanadının geliştirilen MZMC-KM yöntemi kullanılarak aerodinamik performansının güvenilirliğinin ve kanat tasarımının optimizasyon çalışmaları yapılabilir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Eriksson S., Bernhoff H., Leijon M.** (2006), Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [2] **Toft, H. S., Sorensen, J. D.** (2011), Reliability-Based Design of Wind Turbine Blades, *Journal of Structural Safety*, 33, 333-342.
- [3] **Birolini, A.** (1999), Reliability Engineering, *Springer*, (Berlin).
- [4] **Tichy, M.** (1994), First-order Third-moment Reliability Method, *Structural Safety*, 16:189±200.
- [5] **Der Kiureghian A, Lin HZ, Hwang SJ.** (1987), Second-order Reliability Approximations, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 113(8):1208±25.
- [6] **Liu, J.S.** (2001), Monte Carlo Strategies in Scientific Computing, *Springer-Verlag*, (New York).
- [7] **Melchers, R.E.** (1989), Importance Sampling in Structural Systems, *Structural Safety*, Vol. 6, 3-10.
- [8] **Kim, N.H., Ramu, P., and Queipo, N.V.** (2006), Tail Modeling in Reliability-Based Design Optimization for Highly Safe Structural Systems, 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, *Structural Dynamics and Materials Conference*, Newport, RI, AIAA 2006-1825.
- [9] **Lam, P.** (2008), MCMC Methods: Gibbs Sampling and the Metropolis-Hastings Algorithm, *Bayesian Statistics in Political Science Research*.
- [10] **Mooney, C. Z.** (1997), Monte Carlo Simulation, *Sage Publications*, Vol. 116.
- [11] **Pickands, J.** (1975), Statistical Inference Using Extreme Order Statistics, *Annals of Statistics*, Vol 3, 119-131.
- [12] **Boos, D.** (1984), Using Extreme Value Theory to Estimate Large Percentiles, *Technometrics*, 26 (1) 33-39.
- [13] **Hasofer, A.** (1996), Non-Parametric Estimation of Failure Probabilities, *Mathematical Models for Structural Reliability*, Eds. F. Casciati, and B. Roberts, CRC Press, Boca Raton, FL, 195-226.
- [14] **Caers, J., and Maes, M.** (1998), Identifying Tails, Bounds, and End-Points of Random Variables, *Structural Safety*, Vol. 20, 1-23.

- [15] **Kandemir, N.** (2014), *Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbininin Kuyruk Olasılığı Modelleme Yöntemi ile Güvenilirlik Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] **Ramu, P.** (2007), *Multiple Tail Models Including Inverse Measures for Structural Design Under Uncertainties*, Doktora Tezi, University of Florida, Gainesville, FL.
- [17] **Ramu, P., Kim, N.H. ve Haftka, R.T.** (2007), 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.
- [18] **Lam, P.** (2008), MCMC Methods: Gibbs Sampling and the Metropolis-Hastings Algorithm, *Bayesian Statistics in Political Science Research*.
- [19] **Cengiz M., Terzi E., Şenel T., Murat N.** (2013), Lojistik Regresyonda Parametre Tahmininde Bayesci Bir Yaklaşım, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*.
- [20] **Au, S.K., Beck, J.L.** (1999), A new adaptive importance sampling scheme for reliability calculations, *Structural Safety*, Vol. 21, No. 2, pp. 135-158.
- [21] **Acar, E., Bayrak, G.** (2016), Reliability Estimation Using MCMC Based Tail Modeling, *17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, AIAA Aviation, (AIAA 2016-4412).
- [22] **Rosenthal, J.S.** (2011), Optimal Proposal Distributions and Adaptive MCMC, In Brooks, S., Gelman, A., Jones, G.L., and Meng, X-L, *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*, Chapman&Hall/CRC, ISBN: 978-1-4200-7941-8.
- [23] **Acar, E.** (2011), 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.
- [24] **Ramu, P., Kim, N.H. ve Haftka, R.T.** (2010), Multiple Tail Median Approach for High Reliability Estimation, *Structural Safety*, Vol. 32, pp. 124-137.
- [25] **Acar, E.**, 2014-2015 Akademik yılı bahar dönemi, MAK511 Makine Mühendisliğinde Eniyileme Teknikleri ve İleri Uygulamalar ders notları, TOBB ETÜ.
- [26] **Khuri, André I., and Siuli Mukhopadhyay.** (2010), Response Surface Methodology, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2.2, 128-149.

- [27] **Acar, E.** (2013), 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.
- [28] **Cochocki, A., and Unbehauen, Rolf.,** (1993), Neural Networks for Optimization and Signal Processing, *John Wiley & Sons, Inc.*
- [29] **Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R., & Tucker, P.K.** (2005), Surrogate-based Analysis and Optimization. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(1), 1-28.
- [30] **Carley, Kathleen M., Natalia Y. Kamneva, and Jeff Reminga.,** (2004), Response Surface Methodology, No. CMU-ISRI-04-136. Carnegie-Mellon Univ. Pittsburgh Pa School of Computer Science.
- [31] **Bezerra M.A., Escaleria, L.A., Oliveria E.P., Santelli E.R.,** (2008), Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry, *Talanta Cilt.76*, s.965-977.
- [32] **Anderson-Cook, C.M., Montgomery, D.C., Myers, R.H.** (2016), Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Design Experiments, *4<sup>th</sup> Edition, Wiley, NJ.*
- [33] **Risoe,** (2002), Guidelines or Design of Wind Turbines, Det Norske Veritas (DNV) and Wind Energy Department, Riso National Laboratory (Risoe).
- [34] **Ceyhan, Ö., Ortakaya, Y., Korkem, B., Sezer-Uzol, N., Tuncer, I.H.** (2009), Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by Using BEM Theory and Genetic Algorithm, *5th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, AIAC-2009-044.*
- [35] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.** (2001), *Wind Energy Handbook, Wiley, (New York).*
- [36] **Snel, H.** (2003), Review of Aerodynamics for Wind Turbines, *Wind Energy*, Vol. 6, pp 203-211.
- [37] **Hough, G. R., and Ordway, D. E.** (1964), The generalized actuator disk. No. TAR-TR-6401. THERM ADVANCED RESEARCH INC ITHACA NY.
- [38] **Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L.** (2010), Wind Energy Explained, *John Wiley and Sons.*



## EKLER

### EK 1: Tüm örnek problemler için KKM ve MZMC-KM yöntemlerinin KOHK değerleri

Çizelge Ek 1 Tüm örnek problemler için kullanılan yöntemlerin KOHK değerleri

Problem	Değişken Sayısı	Güvenilirlik İndisi	KKM için KOHK	KKM Yaklaşımı	MZMC-KM için KOHK	MZMC-KM Yaklaşımı	% Fark
1	2	$\beta = 3,00$	0,237	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,225</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-5,06
		$\beta = 4,00$	0,388	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,344</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-11,34
		$\beta = 5,00$	0,548	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,473</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-13,69
2	2	$\beta = 3,03$	0,333	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,265</b>	$\beta_{log-log}^Q$	-20,42
		$\beta = 4,00$	0,509	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,480</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-5,70
		$\beta = 5,00$	0,908	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,630</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-30,62
3	2	$\beta = 2,95$	0,266	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,211</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-20,68
		$\beta = 4,00$	0,566	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,395</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-30,21
		$\beta = 5,05$	0,764	$\beta_{lin-log}^Q$	<b>0,532</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-30,37
4	2	$\beta = 3,03$	0,329	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,191</b>	$\beta_{lin-lin}^Q$	-41,95
		$\beta = 3,42$	0,434	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,376</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-13,36
		$\beta = 4,46$	1,179	$\beta_{log-lin}^L$	<b>1,010</b>	$\beta_{log-lin}^L$	-14,33
5	4	$\beta = 3,01$	0,241	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,241</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	0,00
		$\beta = 4,01$	0,396	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,369</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-6,82
		$\beta = 5,01$	0,546	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,512</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-6,23
6	6	$\beta = 3,06$	<b>0,241</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	0,247	$\beta_{lin-lin}^L$	2,49
		$\beta = 4,05$	0,431	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,374</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-13,23
		$\beta = 5,08$	0,650	$\beta_{lin-lin}^L$	<b>0,539</b>	$\beta_{lin-lin}^L$	-17,08
7	6	$\beta = 3,03$	0,284	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,259</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-8,80
		$\beta = 4,03$	<b>0,510</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,547	$\beta_{log-log}^Q$	7,25
		$\beta = 5,03$	<b>0,827</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,948	$\beta_{lin-log}^Q$	14,63
8	6	$\beta = 3,00$	0,267	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,238</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-10,86
		$\beta = 4,02$	0,533	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,495</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-7,13
		$\beta = 5,04$	1,100	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,806</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-26,73
9	9	$\beta = 3,02$	0,289	$\beta_{log-log}^Q$	<b>0,271</b>	$\beta_{lin-log}^Q$	-6,23
		$\beta = 4,04$	<b>0,526</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,553	$\beta_{log-log}^Q$	5,13
		$\beta = 5,09$	<b>0,829</b>	$\beta_{log-log}^Q$	0,949	$\beta_{lin-log}^Q$	14,48

10	12	$\beta = 3,05$	0,284	$\beta_{\log-\log}^Q$	<b>0,267</b>	$\beta_{\text{lin}-\log}^Q$	-5,99
		$\beta = 4,02$	<b>0,521</b>	$\beta_{\log-\log}^Q$	0,523	$\beta_{\text{lin}-\log}^Q$	0,38
		$\beta = 5,07$	1,072	$\beta_{\log-\log}^Q$	<b>0,834</b>	$\beta_{\text{lin}-\log}^Q$	-22,20





## EK 2: Rüzgâr türbini problemi için MCS MATLAB kodu

```
function Riso_MC
clc, clear all

N=1000;
j=0;

%Girdiler
mu_R=9.5;           %Türbin Yarıçapı
mu_V=47.5;         %Dönme Hızı
mu_a=1.8;          %Pala Ayar Açısı
mu_tw=15;          %Maksimum Burulma
mu_k=1.09;         %Pala Kök Veter Uzunluğu
mu_u=0.45;         %Pala Uç Veter Uzunluğu

sigma_R=0.01;
sigma_V=0.03;
sigma_a=0.05;
sigma_tw=0.5;
sigma_k=0.01;
sigma_u=0.01;

%Rassal Değişkenler
x=rand(N,6);

R=icdf('Normal',x(:,1),mu_R,sigma_R);
V=icdf('Normal',x(:,2),mu_V,sigma_V);
a=icdf('Normal',x(:,3),mu_a,sigma_a);
tw=icdf('Normal',x(:,4),mu_tw,sigma_tw);
k=icdf('Normal',x(:,5),mu_k,sigma_k);
u=icdf('Normal',x(:,6),mu_u,sigma_u);
ws=13.5;

for i=1:N
    j=j+1

    generate_updated_input_Riso(k,u,tw,R(i),V(i),ws,a(i))
    ! WT_Perf Riso_updated.wtp
    [ws,p] = read_power_Riso;
    power(i,1) = p;
    A=[power];

end

mean_power = mean(power)
std_power = std(power)
var=(std_power^2)
skewness_power = skewness(power)
kurtosis_power = kurtosis(power)
hist(power)
histfit(power)

g=100;
beta = (mean_power-g)/std_power
```



### EK 3: Rüzgâr türbini problemi için KKM MATLAB kodu

```
function WindTurbine_CTM_BetaLin
clear all, clc

Nr=1000;
t=0;
for j=1:Nr
    t=t+1

N=500;
Fg=0.90;
Ns=N*Fg;

Pcrit=100; beta_real=1.92;

fid=fopen('MC_1e6.txt','r');
A=fscanf(fid,'%g\t%g\t%g\n');
fclose(fid);

power=randsample(A,N);

    y=Pcrit-power;
    Y=sort(y);

ytail=Y((Ns+1):N);

for i=1:(0.1*N)

P=(i+Ns)/(N+1);
beta_i(i)=icdf('Normal',P,0,1);
beta_tail=transpose(beta_i);

end

g=quantile(Y,Fg);
z=(ytail-g);

p1 = polyfit(z,beta_tail,1); % lin_lin
p2 = polyfit(log(z),beta_tail,1); % lin_log
p3 = polyfit(z,log(beta_tail),1); % log_lin
p4 = polyfit(log(z),log(beta_tail),1); % log_log

% predictions
beta_lin_lin(j) = polyval(p1,-g);
beta_lin_log(j) = polyval(p2,log(-g));
beta_log_lin(j) = exp(polyval(p3,-g));
beta_log_log(j) = exp(polyval(p4,log(-g)));

end

mean_beta_lin_lin=mean(beta_lin_lin)
mean_beta_lin_log=mean(beta_lin_log)
mean_beta_log_lin=mean(beta_log_lin)
mean_beta_log_log=mean(beta_log_log)

err_lin_lin = ((mean_beta_lin_lin-beta_real)/beta_real)*100
err_lin_log = ((mean_beta_lin_log-beta_real)/beta_real)*100
err_log_lin = ((mean_beta_log_lin-beta_real)/beta_real)*100
err_log_log = ((mean_beta_log_log-beta_real)/beta_real)*100

std_beta_lin_lin=std(beta_lin_lin)
std_beta_lin_log=std(beta_lin_log)
std_beta_log_lin=std(beta_log_lin)
std_beta_log_log=std(beta_log_log)
```



#### EK 4: Rüzgâr türbini problemi için MZMC-KM MATLAB kodu

```
function WindTurbine_MCMC_BetaLin
clear all, clc

ws=13.5;
d=6;
N=100;
Fg=0.90;
ka=1;
M=40;
Pcrit=100; beta_real=1.92;

Risoe_MC

mu_R=9.5;    mu_V=47.5;    mu_a=1.8;    mu_tw=15;    mu_k=1.09;
mu_u=0.45;
sigma_R=0.01; sigma_V=0.03; sigma_a=0.05; sigma_tw=0.5; sigma_k=0.01;
sigma_u=0.01;
fid=fopen('MC3_data.txt','r');
A=fscanf(fid,'%g\t%g\t%g\t%g\t%g\t%g\t%g\n',[7,100]);
A=A';
fclose(fid);

R=A(:,1); V=A(:,2); a=A(:,3); tw=A(:,4); k=A(:,5); u=A(:,6);
P=A(:,7);

    Y=Pcrit-P;

Arr=[R, V, a, tw, k, u, Y];

sorted = sortrows(Arr,7);
R_array=sorted(:,1);
V_array=sorted(:,2);
a_array=sorted(:,3);
tw_array=sorted(:,4);
k_array=sorted(:,5);
u_array=sorted(:,6);
Y_array=sorted(:,7);
Ystart=Y_array(91:100);
Rstart=R_array(91:100);
Vstart=V_array(91:100);
astart=a_array(91:100);
twstart=tw_array(91:100);
kstart=k_array(91:100);
ustart=u_array(91:100);

g=quantile(Y_array,Fg);

for i=1:10

    Xcurr=[Rstart(i,:),Vstart(i,:),astart(i,:),twstart(i,:),kstart(i,:),
ustart(i,:)];
    Xexp(i,:)=Xcurr;
    Ycurr=[Ystart(i,:)];
    Yexp(i,:)=Ycurr;

for s=1:M

u1=rand(6,1);

sigma1=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_R^2));
sigma2=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_V^2));
sigma3=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_a^2));
sigma4=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_tw^2));
sigma5=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_k^2));
sigma6=sqrt(((ka^2)*(2.38^2)/d)*(sigma_u^2));
```

```

dR(s)=icdf('Normal',u1(1),0,sigma1);
dV(s)=icdf('Normal',u1(2),0,sigma2);
da(s)=icdf('Normal',u1(3),0,sigma3);
dtw(s)=icdf('Normal',u1(4),0,sigma4);
dk(s)=icdf('Normal',u1(5),0,sigma5);
du(s)=icdf('Normal',u1(6),0,sigma6);

Xcand=Xcurr+[dR(s),dV(s),da(s),dtw(s),dk(s),du(s)];

fR_cand=pdf('Normal',Xcand(1),mu_R,sigma_R);
fV_cand=pdf('Normal',Xcand(2),mu_V,sigma_V);
fa_cand=pdf('Normal',Xcand(3),mu_a,sigma_a);
ftw_cand=pdf('Normal',Xcand(4),mu_tw,sigma_tw);
fk_cand=pdf('Normal',Xcand(5),mu_k,sigma_k);
fu_cand=pdf('Normal',Xcand(6),mu_u,sigma_u);

fR_curr=pdf('Normal',Xcurr(1),mu_R,sigma_R);
fV_curr=pdf('Normal',Xcurr(2),mu_V,sigma_V);
fa_curr=pdf('Normal',Xcurr(3),mu_a,sigma_a);
ftw_curr=pdf('Normal',Xcurr(4),mu_tw,sigma_tw);
fk_curr=pdf('Normal',Xcurr(5),mu_k,sigma_k);
fu_curr=pdf('Normal',Xcurr(6),mu_u,sigma_u);

R_cand=Xcand(1);
V_cand=Xcand(2);
a_cand=Xcand(3);
tw_cand=Xcand(4);
k_cand=Xcand(5);
u_cand=Xcand(6);

generate_updated_input_Riso(k_cand,u_cand,tw_cand,R_cand,V_cand,ws,a_cand)
! WT_Perf_Riso_updated.wtp
[ws,p] = read_power_Riso;
power(s,1) = p;
p_new = power;

Ycand=Pcrit-power;

if Ycand(s)<g % tail bölgesinde mi diye kontrol et, değilse r=0
    r=0;

else

r=(fR_cand*fV_cand*fa_cand*ftw_cand*fk_cand*fu_cand)/(fR_curr*fV_curr*fa_curr*
ftw_curr*fk_curr*fu_curr);

end

u2=rand;

if r>=1 %accept
    Xcurr=Xcand;
    Xexp=[Xexp;Xcurr];
    Ycurr=Ycand(s);
    Yexp=[Yexp;Ycurr];

elseif u2>r %reject
    Xcurr=Xcurr;
    Xexp=[Xexp;Xcurr];
    Ycurr=Ycurr;
    Yexp=[Yexp;Ycurr];

else
    Xcurr=Xcand; %accept
    Xexp=[Xexp;Xcurr];
    Ycurr=Ycand(s);
    Yexp=[Yexp;Ycurr];

```

```

end
end

Rexp=Xexp(:,1);
Vexp=Xexp(:,2);
aexp=Xexp(:,3);
twexp=Xexp(:,4);
kexp=Xexp(:,5);
uexp=Xexp(:,6);

end

Ytail=sort([Yexp(2:401);Ystart]);

z=Ytail-g;

for a=1:410

p=(a)/411;
P=Fg+(1-Fg)*p;

beta_a(a)=icdf('Normal',P,0,1);
beta_tail=transpose(beta_a);

end

p1 = polyfit(z,beta_tail,1); % lin_lin
p2 = polyfit(log(z),beta_tail,1); % lin_log
p3 = polyfit(z,log(beta_tail),1); % log_lin
p4 = polyfit(log(z),log(beta_tail),1); % log_log

% predictions
beta_lin_lin = polyval(p1,-g);
beta_lin_log = polyval(p2,log(-g));
beta_log_lin = exp(polyval(p3,-g));
beta_log_log = exp(polyval(p4,log(-g)));

```





## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Gamze Bayrak  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 18.07.1991, Eskişehir  
**E-posta** : gbayrak@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği Tam Burslu
- **Yüksek Lisans** : 2016, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği Tezli YL

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Tam Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2014	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Stajyer
2013	HAYS Sağlık Ürünleri İç ve Dış Ticaret LTD.ŞTİ. Ankara	Stajyer (AR-GE)
2012	Endel A.Ş. Bekel Kondanser Fabrikası Eskişehir	Stajyer (Üretim)

### YABANCI DİL:

İngilizce (YDS 86,25/100)

Almanca (Start Deutsch A2)

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

#### *Uluslararası Konferans Yayınları*

- Acar, E., **Bayrak, G.** (2016), Reliability Estimation Using MCMC Based Tail Modeling, 17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, AIAA Aviation, (AIAA 2016-4412).