

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDE WEİBULL DAĞILIMI İÇİN YENİ NESİL
PARAMETRE METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET EMRE ONAY

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRAH DOKUR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MEHMET KURBAN

BİLECİK, 2021

10408125

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDE WEİBULL DAĞILIMI İÇİN YENİ NESİL
PARAMETRE METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET EMRE ONAY

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRAH DOKUR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MEHMET KURBAN

BİLECİK, 2021

10408125

BEYAN

Rüzgar enerji sistemlerinde Weibull dağılımı için yeni nesil parametre metotlarının karşılaştırmalı analizi ve uygulaması adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırmalar Projesi (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmelidir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		☐	DESTEK ALINMAMIŞTIR
☒			
Destek alındı ise;			
Destekleyen Kurun:			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;			

Ahmet Emre ONAY

01/07/2021

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emrah DOKUR'a ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Mehmet KURBAN'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavı sırasında değerli jüri üyeleri Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alparslan ZEHİR ve Prof. Dr. Uğur YÜZGEÇ'e çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

Ahmet Emre ONAY

01/07/2021



ÖZET

RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDE WEİBULL DAĞILIMI İÇİN YENİ NESİL PARAMETRE METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE UYGULAMASI

Bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi kurulmadan önce bölgenin rüzgar hızı karakteristiği belirlenmeli ve analiz edilmelidir. Rüzgar hızı karakteristiğinin belirlenmesi, analizi, modellemesi ve tahmini için kullanılan en önemli yaklaşımlardan birisi olan iki parametrelili Weibull dağılımının parametrelerinin en uygun şekilde belirlenmesi için birçok farklı metot geliştirilmekte ve günümüzde halen araştırma konusu olarak yer almaktadır. . Parametre tahmin metotları kullanılarak iki parametrelili Weibull dağılımının şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri belirlenip , üzerinde çalışılan bir bölge için rüzgar hızı karakteristikleri en uygun şekilde modellenebilmektedir.

Bu çalışmada, Weibull dağılımı için literatürde iyi bilinen parametre tahmin metotlarının yanı sıra son yıllarda önerilen güncel yaklaşımlar da kullanılarak Türkiye'nin yüksek rüzgar hızı profiline sahip 10 bölgesi için karşılaştırmalı olarak analizler yapılmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirilen 11 adet parametre tahmin metotları sırasıyla Grafik Metot (GM), Maksimum Olabilirlik Metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu (MMLM), Enerji Örüntü Faktörü Metodu (EPFM), Rüzgar Enerjisi Yoğunlaştırma Metodu (WEIM), Justus Moment Metodu (JMM), Güç Yoğunluğu Metodu (PD), Lysen Metodu (LM), Moment Metodu (MOM), Mabchour Metodu (MMab) ve Alternatif Maksimum Olabilirlik Metodu (AML)'dur. Bu metotlardan WEIM 2020 yılında önerilirken yine EPFM, PD güncel metotlar olarak literatürde yer almaktadır. MMab ise 1999 yılında önerilmiş olmasına rağmen, literatürde çok fazla karşılaştırmada yer alamamıştır. Bu metotların tümünün birbirleriyle performans ve verimlilik karşılaştırılması 10 farklı bölge için yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Yapılan karşılaştırma üç şekilde gerçekleştirilmiştir; i) Metotlar tarafından tahmin edilen şekil ve ölçek parametreleri kullanılarak oluşturulan olasılık yoğunluk fonksiyonlarının gerçek rüzgar hız değerlerine uyumu incelenerek, ii) Metotlar tarafından tahmin edilen rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğuna uyumu karşılaştırılmış ve iii) İstatistikte de hata performans metriği olarak kullanılan Ortalama Karekök Hatası (RMSE), Belirleme Katsayısı (R^2), Chi-Kare Testi (χ^2) olmak üzere üç metodun ve bu tür çalışmalarda kullanılan Rüzgar Enerji Hatası (WEE) olmak üzere toplam 4 adet hata performans belirleme kriterinin kullanılmasıyla analizler Matlab yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ayrıca bölgelerin rüzgar enerji yoğunlukları da hesaplanmış ve bu değerler de grafikler halinde eklenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda her bölge için belirlenen en uygun metot çalışma sonunda belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda, uygun bir metodun bölgeden bölgeye değişiklik göstereceği ve tek bir metodun her bölge için aynı verimi gösteremeyeceği belirlenmiştir. Buna karşın çalışmanın geneline bakıldığında JMM için model performans başarımının yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Weibull Dağılımı, Parametre Tahmini, Yeni Nesil Metotlar



ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS AND APPLICATION OF NEW GENERATION PARAMETER METHODS FOR WEIBULL DISTRIBUTION IN WIND ENERGY SYSTEMS

The wind speed characteristics of a region must be determined and analyzed before installing any wind energy conversion system. Many different methods have been developed to determine the parameters of the two-parameter Weibull distribution, which is one of the most important approaches used for the determination, analysis, modeling, and estimation of the wind speed characteristic, and it is still a subject of research today. By using parameter estimation methods, the shape (k) and scale (c) parameters of the two-parameter Weibull distribution can be determined, and the wind speed characteristics can be modeled in the most appropriate way for a studied region.

In this study, some newly proposed methods have been used apart from the well-known parameter estimation methods to analyze and evaluate comparably for the data of 10 regions of Turkey with high wind energy profile. A total of 11 methods have been used in this study, namely, Graphical Method (GM), Maximum Likelihood Method (MLM), Modified Maximum Likelihood Method (MMLM), Energy Pattern Factor Method (EPFM), Wind Energy Intensification Method (WEIM), Justus Moment Method (JMM), Power Density Method (PD), Lysen Method (LM), Method of Moments (MOM), Mabchour's Method (MMab), and Alternative Maximum Likelihood Method (AML). Among these, while WEIM was proposed in 2020, the EPFM and PD methods are also proposed recently. And despite being proposed in 1999, MMab has not been compared in many studies in the literature. All the methods mentioned above have been compared to each other for performance and efficiency using the data for the 10 regions, and the results have been interpreted.

The comparison has been held out in three steps; i) By inspecting the fit that has been provided by the probability density functions which have been created by using the parameters that have been estimated by the methods, ii) By comparing the wind energy density which has been estimated by these methods to the actual wind energy densities of the studied regions, and iii) By using a total of 4 error performance metrics three of which are used in Statistics namely, Root Mean Squared Error (RMSE), Coefficient of Determination (R^2), Chi-Square Test (χ^2), and one other method which is used in these type of studies, called Wind Energy Error (WEE). The analyzes were carried out in a Matlab software environment.

The wind energy densities of the regions have also been calculated and added as graphs in this study. The inspection made have been carried out based on region. As a result of the analysis, the most appropriate method determined for each region was specified at the end of the study. On the other hand, when looking at the overall study, it was seen that the model performance success for JMM was high.

Keywords: Weibull Distribution, Parameter Estimation, Recently Proposed Methods



İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER TABLOSU	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
3. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ	10
3.1. Türbin Yapıları.....	10
3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	10
3.1.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	11
3.2. Rüzgar Hızı ve Gücü	13
3.3. Rüzgar Hızı Veri Seti	15
3.4. Rüzgar Hız Modellemesi ve Tahmini	17
4. İKİ PARAMETRELİ WEİBULL DAĞILIMI.....	20
4.1. Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	20
4.2. Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu	22
4.3. Weibull Parametre Tahmin Metotları.....	22
4.3.1. Grafik Metodu (GM).....	23
4.3.2. Maksimum Olabilirlik Metodu (MLM)	24
4.3.3. Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu (MMLM)	25
4.3.4. Enerji Örüntü Faktörü Metodu (EPFM)	25
4.3.5. Rüzgar Enerjisi Yoğunlaştırma Metodu (WEIM)	26
4.3.6. Justus Moment Metodu (JMM)	27
4.3.7. Güç Yoğunluğu Metodu (PD).....	28
4.3.8. Lysen Metodu (LM)	28
4.3.9. Moment Metodu (MOM)	29
4.3.10. Mabchour Metodu (MMab)	29
4.3.11. Alternatif Maksimum Olabilirlik Metodu (AML)	29
5. İSTATİSTİKSEL ANALİZ.....	31

5.1. Hata Performans Metrikleri.....	31
5.1.1. Ortalama Karekök Hatası (RMSE).....	31
5.1.2. Belirleme Katsayısı (R^2).....	31
5.1.3. Chi-Kare Testi (χ^2).....	32
5.1.4. Rüzgar Enerji Hatası (WEE)	32
6. ANALİZ, BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34
6.1. Amasra.....	35
6.1.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	35
6.1.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	37
6.1.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	37
6.2. Bandırma.....	38
6.2.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	38
6.2.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	40
6.2.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	41
6.3. Bozcaada.....	42
6.3.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	42
6.3.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	44
6.3.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	44
6.4. Çanakkale.....	45
6.4.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	45
6.4.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	47
6.4.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	48
6.5. Geyve	49
6.5.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	49
6.5.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	51
6.5.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	51
6.6. Gökçeada	52
6.6.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	52
6.6.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	54
6.6.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	55
6.7. Güney.....	56
6.7.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	56
6.7.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	58
6.7.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	58
6.8. Kumköy	59

6.8.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	59
6.8.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	61
6.8.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	62
6.9. Maden	63
6.9.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	63
6.9.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	65
6.9.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	66
6.10. Yunak.....	67
6.10.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu.....	67
6.10.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması	68
6.10.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması	69
6.11. Genel Karşılaştırma	70
7. SONUÇ	75
KAYNAKÇA	76
EKLER.....	81

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Türkiye 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar güç yoğunluğu haritası	2
Şekil 1.2. Türkiye 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızı haritası	2
Şekil 1.3. Türkiye kurulu RES haritası	3
Şekil 1.4. Yıllara göre kurulu güç	3
Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgar türbini bileşenleri ve farklı türleri.....	11
Şekil 3.2. Üç kanatlı bir rüzgar türbini bileşenleri	11
Şekil 3.3. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	13
Şekil 3.4. Farklı rüzgar hızlarına göre değişen güç eğrisi.....	14
Şekil 3.5. Rüzgar verisi alınan bölgeler	17
Şekil 4.1. Weibull şekil (k) parametresinin dağılıma etkisi ($c=5$ m/s için).....	21
Şekil 4.2. Weibull ölçek (c) parametresinin dağılıma etkisi ($k=2.5$ için)	21
Şekil 6.1. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Amasra)	35
Şekil 6.2. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	36
Şekil 6.3. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	37
Şekil 6.4. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Bandırma) ...	39
Şekil 6.5. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	39
Şekil 6.6. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	40
Şekil 6.7. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Bozcaada) ...	42
Şekil 6.8. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	43
Şekil 6.9. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	44
Şekil 6.10. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Çanakkale) ..	46
Şekil 6.11. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	46
Şekil 6.12. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	47
Şekil 6.13. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Geyve)	49
Şekil 6.14. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	50
Şekil 6.15. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	51
Şekil 6.16. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Gökçeada). ..	53
Şekil 6.17. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	53
Şekil 6.18. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	54
Şekil 6.19. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Güney)	56
Şekil 6.20. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	57
Şekil 6.21. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	58
Şekil 6.22. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Kumköy) ...	60

Şekil 6.23.	Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	60
Şekil 6.24.	Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	62
Şekil 6.25.	Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Maden).....	63
Şekil 6.26.	Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	64
Şekil 6.27.	Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	65
Şekil 6.28.	Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Yunak)	67
Şekil 6.29.	Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı	68
Şekil 6.30.	Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri.....	69
Şekil 6.31.	Çalışma yapılan bölgelerde tahmin metotlarının gösterdikleri uyum.....	71
Şekil 6.32.	Bölgelerin rüzgar enerji yoğunluğu ve metotların tahmini.....	72



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan bölgeler ve yıllık rüzgar enerji profillerine göre sıralaması	16
Tablo 6.1. Weibull parametre tahmin metotlarının Amasra bölgesi için performansı	36
Tablo 6.2. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Amasra)	38
Tablo 6.3. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	38
Tablo 6.4. Weibull parametre tahmin metotlarının Bandırma bölgesi için performansı	40
Tablo 6.5. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Bandırma)	41
Tablo 6.6. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	41
Tablo 6.7. Weibull parametre tahmin metotlarının Bozcaada bölgesi için performansı	43
Tablo 6.8. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Bozcaada)	45
Tablo 6.9. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	45
Tablo 6.10. Weibull parametre tahmin metotlarının Çanakkale bölgesi için performansı	47
Tablo 6.11. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Çanakkale)	48
Tablo 6.12. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	48
Tablo 6.13. Weibull parametre tahmin metotlarının Geyve bölgesi için performansı	50
Tablo 6.14. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Geyve)	52
Tablo 6.15. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	52
Tablo 6.16. Weibull parametre tahmin metotlarının Gökçeada bölgesi için performansı	54
Tablo 6.17. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Gökçeada)	55
Tablo 6.18. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	55
Tablo 6.19. Weibull parametre tahmin metotlarının Güney bölgesi için performansı	57
Tablo 6.20. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Güney)	59
Tablo 6.21. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	59
Tablo 6.22. Weibull parametre tahmin metotlarının Kumköy bölgesi için performansı	61
Tablo 6.23. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Kumköy)	62
Tablo 6.24. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	63
Tablo 6.25. Weibull parametre tahmin metotlarının Maden bölgesi için performansı	65
Tablo 6.26. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Maden)	66
Tablo 6.27. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	66
Tablo 6.28. Weibull parametre tahmin metotlarının Yunak bölgesi için performansı	68
Tablo 6.29. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Yunak)	69
Tablo 6.30. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması	70
Tablo 6.31. Çalışma yapılan bölgelerde metot bazında hata değerleri	73
Tablo 6.32. Alınan sonuçların bölge bazında görünümü (Rüzgar güç yoğunluğu değeri ile)	74

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

GM	: Grafik Metot
MLM	: Maksimum Olabilirlik Metodu
MMLM	: Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu
EPFM	: Enerji Örüntü Faktör Metodu
WEIM	: Rüzgar Enerji Yoğunlaştırma Metodu
JMM	: Justus Metodu
PD	: Güç Yoğunluğu Metodu
LM	: Lysen Metodu
MOM	: Moment Metodu
MMab	: Mabchour Metodu
AML	: Alternatif Maksimum Olabilirlik Metodu
MWSM	: Ortalama Rüzgar Hızı Metodu
SMMLM	: İkincil Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu
NEPFM	: Yeni Nesil Enerji Örüntü Faktör Metodu
RMSE	: Ortalama Karekök Hatası
WEE	: Rüzgar Enerji Hatası
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
CDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

1. GİRİŞ

Tarihin geçmiş dönemine bakıldığında, rüzgar enerjisinin kullanımının oldukça eski zamanlara kadar dayandığı görülmektedir. İnsanların rüzgar enerjisini kullanarak botlarda bir itme gücü oluşturmaları, M. Ö. 5000 yılına dayanmaktadır. Buna ek olarak, M.Ö. 200 yılına bakıldığında Çin’de basit bir mantığa dayanan rüzgar gücü ile çalışan su pompalarının kullanımı, İran ve Orta Doğu’da ise kamış kullanılarak oluşturulmuş kanatlara sahip yel değirmenlerinin tahıl öğütme amaçlı kullanımı görülmektedir. Sonrasında ise, rüzgar enerjisini kullanmanın yeni yollarının ortaya çıkmıştır. Çok yaygın bir biçimde gıda üretimi alanında kullanılan rüzgar pompaları ve yel değirmenlerinin teknolojisinden etkilenen tüccarlar bu bilgileri Orta Asya’dan Avrupa’ya taşımış, buradan da Hollandalıların rüzgar gücüyle çalışan pompaları kullanarak gölleri kurutup, yerleşim alanları oluşturmalarına kadar süreç ilerlemiştir. 1800’lü yılların sonlarına ve 1900’lü yılların başlarına doğru ise, elektrik üretimi amacıyla kullanılan küçük rüzgar türbinleri ortaya çıkmıştır (U.S. Energy Information Administration, 2020).

Rüzgar gücünün elektrik üretimi amacıyla kullanılması ise, enerji ihtiyacının genel olarak fosil yakıtlardan karşılanması nedeni ile, herhangi bir yenilenebilir enerji kaynağında olduğu gibi bir süre arka planda kalmış, ancak 1970’li yılların petrol sıkıntısı yenilenebilir kaynakları bir kez daha akıllara getiren bir etken olmuştur. Çevresel koşullar düşünülerek yapılan gelişmeler ve yasalar ise 2000’li yılların başlarında ortaya çıkmakla birlikte, yenilenebilir kaynaklarının önemi vurgulanmıştır. Tarih boyunca kullandığımız bir enerji olan rüzgar enerjisi, günümüzde birçok ülke ve bölgenin tercih ettiği yenilenebilir enerji kaynaklarının başlarında gelmeye başlamıştır (EDF Energy, 2020).

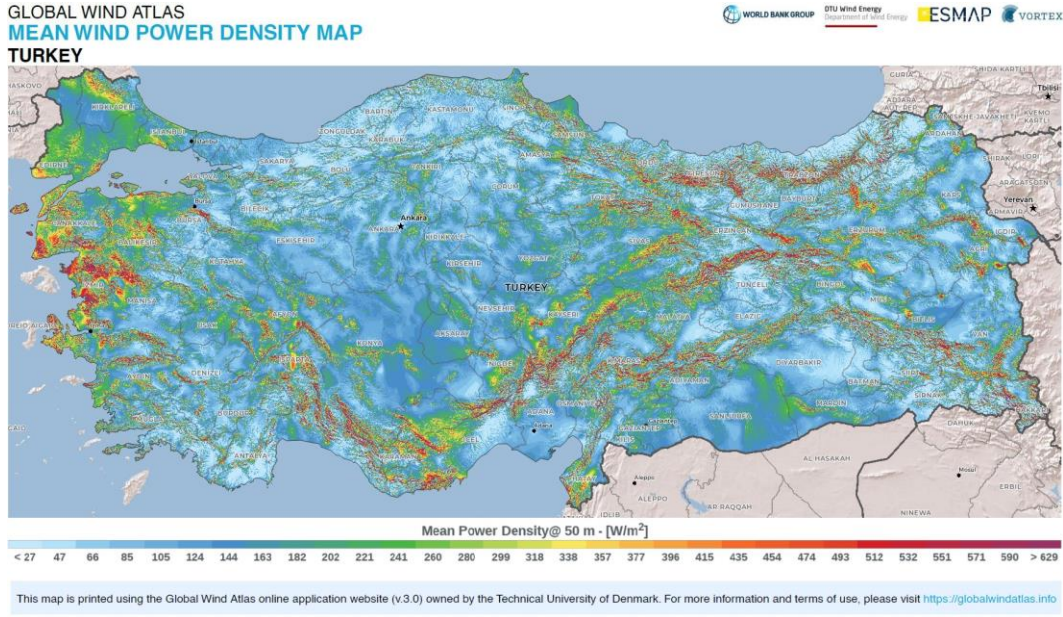
Günümüzde rüzgar enerjisinin durumu incelendiğinde ise, bu enerjinin kullanımının giderek arttığı görülebilmektedir. Örneğin rüzgar enerjisi;

- 2019 yılında AB’nin elektrik talebinin %15’inin karşılamıştır.
- Çin’de üçüncü en büyük enerji kaynağıdır.
- Dünya pazarında yeni güç kapasitesinin en büyük kaynağı olarak bilinmektedir.

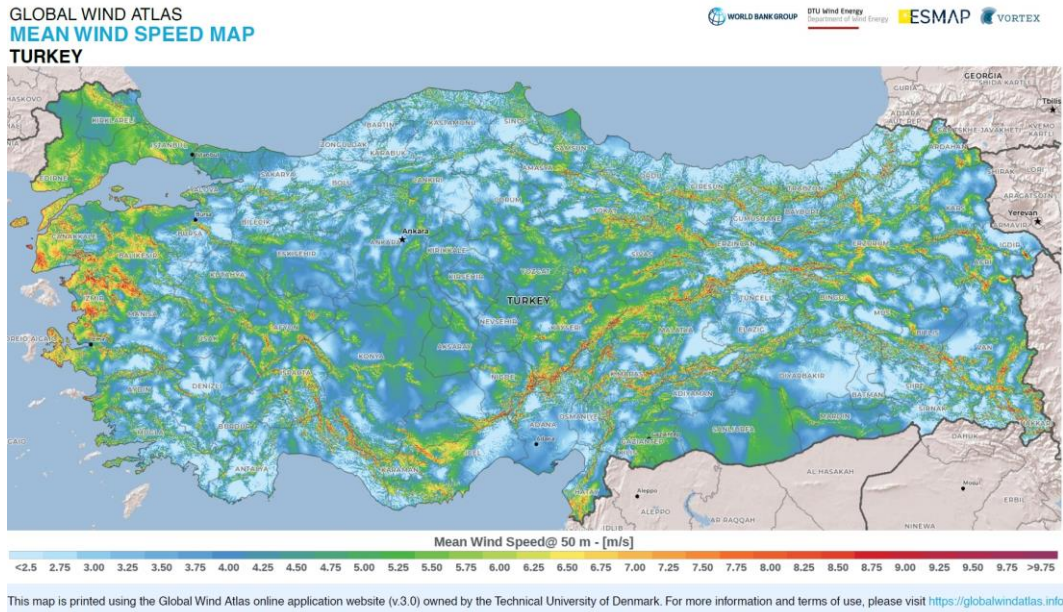
Rüzgar enerjisinin kümülatif kapasitesi 2019 yılında yapılmış 60.4 GW değerindeki ek kurulumla (bu değerin 54.2 GW’ı kıyı içi kurulumunu ifade etmektedir) 651 GW’a ulaşmıştır ve büyümeye devam etmektedir. COVID-19 salgınının etkisinde dahi olsa, 2020 yılının rüzgar enerjisi kurulumunda 76 GW değerinde yeni kurulumla rekor bir yıl olması

beklenmektedir. Önümüzdeki beş yıl içerisinde ise, 355 GW üzerinde kapasitenin eklenmesi öngörülmektedir (GWEC, 2020: 14).

Türkiye’de ise an itibariyle rüzgar enerjisinin toplam kurulu gücü 9559 MW ve bu gücün toplam kurulu güce oranı %9,79’dur. Yıllık elektrik üretimi ise 24022 GWh civarındadır (Enerji Atlası, 2021). Ayrıca Türkiye’ye ait rüzgar güç yoğunluğu ve rüzgar hızı haritası Şekil (1.1) ve (1.2)’de görülebilmektedir. Kurulum yapılan rüzgar enerji santrallerinin de yine bu haritada yoğunluğun fazla olduğu bölgelerde bulunduğu Şekil (1.3)’de incelenebilir.



Şekil 1.1. Türkiye 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar güç yoğunluğu haritası
Kaynak: (Global Wind Atlas,2021)

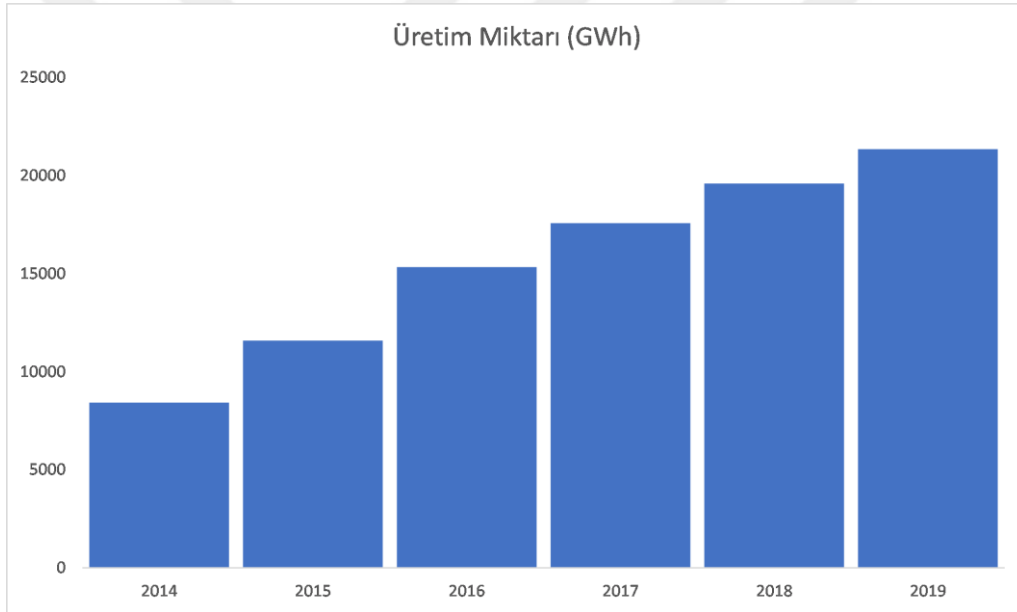


Şekil 1.2. Türkiye 50 metre yükseklik için ortalama rüzgar hızı haritası
Kaynak: (Global Wind Atlas,2021)



Şekil 1.3. Türkiye kurulu RES haritası
Kaynak: (TÜREB, 2021)

Yıllara göre ülkemizdeki rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu gücü Şekil 1.4’te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Yıllara göre kurulu güç
Kaynak: (TÜREB, 2021)

Şekil 1.4’ten de görülebileceği üzere, dünyada olduğu gibi, Türkiye’de de önemi oldukça artan rüzgar enerjisi, üzerine yoğunlaşılması ve gerekli eksikliklerin giderilerek, en verimli şekilde kullanılması gereken bir enerji türüdür.

Bu nedenle bu çalışma gerekli geliştirmelerden birisi olan rüzgar hız karakteristiğinin belirlenmesi, analizi ve tahminine odaklanmış ve bu işlem için kullanılan metotların verimlilik, doğruluk açısından karşılaştırmalarını yapmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, Türkiye’nin rüzgar enerji profili yüksek bölgelerine ait veriler kullanılarak yapılmış ve bu bölgelere ait genel bir sonuç ortaya çıkarılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bir önceki bölümde istatistiksel verilerle de belirtildiği üzere, önemi gittikçe artan bir kaynak olan rüzgar enerjisinin kurulumu, kullanımı, şebekeye entegrasyonu açısından gelecek dönemlerde bu kaynaktan alınacak olan enerjinin belirli yaklaşımlar kullanılarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Ülkemizde rüzgar enerji ve rüzgar hızı potansiyeli yüksek olan bölgelerde kurulmuş ve kurulacak olan rüzgar santrallerinin çalışması açısından bu santrallerin bulunduğu bölgenin gelecek dönem içerisinde alacağı rüzgar hızının belirlenmesi, anlık taleplerde bulunan bir sektör olan enerji dağıtım sektöründe önemli bir etkidir. Belirsiz planlamalar yerine, bu sisteme uygun bir rüzgar hızı modelinin oluşturulması, bu kritik ihtiyacın giderilmesi ve rüzgar enerjisine olan güvenin daha da artması ve bu enerjinin önündeki tereddütlerin kaldırılıp kullanımının daha da hızlı bir şekilde yaygınlaşması anlamına gelecektir.

Bu amaçla kullanılan birçok rüzgar hızı tahmin metotları bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar tez çalışması içerisinde detayları ile bahsedilmiştir. Kullanılan bu araçlar ile yeterli performans ve verimlilik alınması durumunda, çalışmanın yapıldığı bölgedeki rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri için gelecek dönem rüzgar hızı modellemesi yapılmış olacaktır. Bununla birlikte, belirli bir bölgedeki rüzgar hızının tahmininin rüzgar santralleri için önemi şu şekilde sıralanabilir;

- Depolanmış olan enerji kapasitesinin planlanması ve şebeke operasyonlarının yönetilmesi,
- Depolanmış enerji yerine rüzgardan üretilen anlık enerjinin kullanılması,
- Güç dengesinin tahsis edilmesi,
- Belirli rüzgar santrallerinde enerji pazarında elektrik ticaretinde bulunma amacıyla bir sonraki gün için planlama yapılması.

Bu nedenler, rüzgar hız tahminin önemini göstermektedir. Bu çalışmada ise, rüzgar hız karakteristiğinin belirlenmesi üzerinde durulmuş ve bu modelleme için kullanılan dağılımlardan birisi olan Weibull dağılımının parametre belirleme metotlarının verimlerinin belirtilen bölgelerdeki rüzgar hızı verileri kullanılarak karşılaştırması yapılmıştır.

Ayrıca, rüzgar güç tahminin geliştirilmesinin oldukça önemli ekonomik ve teknik avantajları bulunmaktadır. Enerji giderlerinin hesaplanması konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, tahmin konusunda yapılan hataların, rüzgar enerjisinin satılmasından edinilen

gelirin %10'u kadar bir zarara sebep olacağı görülmüştür (Soman vd., 2010: 1; Fabbri vd., 2005: 1440).

Çalışmanın amacı, bu metotlardan gerçek değere en yakın sonuçları sağlayan metodun belirlenmesidir. Buna göre, belirtilen bölgelerde rüzgar hız modeli için en yakın doğruluk sağlayacak olan metodun kullanımı, bölgedeki rüzgar enerji dönüşüm santralleri için oldukça önemli bir rol oynayacaktır.

Bu tez çalışmasında kullanılan rüzgar verileri, Türkiye'nin rüzgar potansiyeli yüksek olan 10 bölgesinden alınmıştır. Bunlar; Amasra, Bandırma, Bozcaada, Çanakkale, Geyve, Gökçeada, Güney, Kumköy, Maden ve Yunak bölgeleridir. Alınan rüzgar verisi, karşılaştırmanın doğruluğu açısından, aynı zaman dilimi içerisinde ve aynı yüksekliktedir. Bu zaman dilimi, 01.01.2017 – 31.12.2019 olmak üzere üç yıldır. Saatlik veriler olduğu için ise, 26280 saatlik rüzgar hızlarını içermektedir.

Bu çalışmada, belirtilen bölgelerin üç yıllık, saatlik ve 50 metre yükseklikteki rüzgar verileri kullanılarak, Weibull dağılımının parametre tahmin metotlarının performanslarının karşılaştırılabileceği bir ortam oluşturulmuştur. Verileri kullanılan bölgeler, aynı zamanda Türkiye'nin rüzgar potansiyeli yüksek olan bölgeleri de olduğu için, bu tez çalışması, bu bölgelerde faaliyette olan ve ilerde kurulması planlanan rüzgar santralleri için de belirtilen tahmin metotlarının hangisinin daha iyi performans sergilediği konusunda fikir verecek bir çalışma niteliğinde olacaktır.

Çalışma içerisinde ayrıca Weibull dağılımı dışında kullanılan diğer rüzgar hızı tahmin metotları da belirlenerek sınıflandırılmıştır. Ayrıca bu çalışma ve benzeri rüzgar hızı tespiti çalışmaları için gerekli rüzgar hız verisini sağlayan kaynaklar incelenmiş ve hangi tür verileri ne şartlarda sağladıkları da ayrıca belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, rüzgar enerji potansiyelinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi amacıyla Weibull parametrelerinin en uygun şekilde belirlenmesi için kullanılan birçok metod üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmaların derlendiği kaynaklar (Tonsie Djiela vd., 2020: 1) ve belirli çalışmalar da ayrıca incelenmiştir.

Seguro ve Lambert, rüzgar enerji analizi için kullanılan Weibull dağılımının parametre tahmin metodlarından Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM) ve Grafik metodlarını (GM) karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, MLM metodunun zaman serisine sahip rüzgar verisi için, MMLM'nun ise, frekans dağılımı formatında olan rüzgar verisi için kullanılmasını önermişlerdir (Seguro ve Lambert, 2000: 75).

Chang ise, Weibull parametre tahmini için kullanılan, Moment metodu (MOM), Justus Moment metodu (JMM), Grafik metodu (GM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM) ve Enerji Örüntü Faktörü metodu (EPFM) olmak üzere 6 metodu incelemiştir. Bu metodların karşılaştırmaları yapılarak, Grafik metodun gelişigüzel değişkenlerin kullanılması durumunda en kötü performansı sergilediği, ayrıca rüzgar hızının Weibull fonksiyonu ile iyi bir uyuma sergilemesi durumunda altı metodun da kabul edilebilir sonuçlar verdiği, ancak bu durum dışında MLM ve ardından ise MMLM'un iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Chang, 2011: 272).

Costa Rocha ve ark. yaptıkları çalışmada Grafik metodu (GM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Enerji Örüntü Faktörü metodu (EPFM), Moment metodu (MOM), Justus Moment metodu (JMM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM) ve Eşdeğer Enerji metodu (EEM) olmak üzere 7 metodun karşılaştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, diğerlerine göre daha az bilinen EEM'nun diğer metodlarla karşılaştırılması da incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, EEM'nun şekil ve ölçek parametrelerinin tespitinde verimli bir metod olduğu, EPFM ve GM metodlarının ise çalışma yapılan bölge için en düşük etkili metodlar olduğu, şekil ve ölçek parametresi tespitinde matematiksel iterasyon kullanan metodların daha düşük hatalar sunduğu ve rüzgar hızı verisinde düşük standart sapmanın olması durumunda verimin arttığı kanılarına varılmıştır (Costa Rocha vd., 2012: 395).

Saleh ve ark. ise, Süveyş Körfezi'ndeki rüzgar verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada Ortalama Rüzgar Hızı metodu (MWSM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM), Grafik metodu (GM) ve Güç

Yoğunluğu (PD) metotlarını kullanarak bir karşılaştırma yapmışlardır. Yaptıkları karşılaştırmalara göre, MWSM ve MLM metotlarının, çalışma yapılan bölge için rüzgar hızı tahmininde kullanılmasını önermişlerdir. (Saleh vd., 2012: 710).

Indhumathy ve ark. yaptıkları çalışmada Weibull dağılımı parametre tahmini için kullanılan Justus Moment metodu (JMM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM) ve Enerji Örüntü Faktörü (EPFM) metotlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, belirtilen metotların uygunluğunun kullanılan verinin büyüklüğü, dağılımı, formatı ve uyum testlerine göre farklılıklar gösterebileceğini ve çalışma yapılan bölgede ise EPFM'nun şekil ve ölçek parametrelerini belirlemede verimli sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Indhumathy vd., 2014: 8340).

Mouangue ve ark. ise, yaptıkları çalışmada Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik (MMLM) metotlarını karşılaştırmışlardır. Aldıkları sonuçlara göre, MMLM tarafından tahmin edilen parametreler kullanılarak oluşturulan Weibull dağılımının doğruluğunun daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Mouangue vd., 2014: 145).

Azad ve ark. yaptıkları çalışmada Grafik metodu (GM), Moment metodu (MOM), Standart Sapma metodu (JMM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Güç Yoğunluğu metodu (PD), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (MMLM) ve Eşdeğer Enerji (EEM) metotları olmak üzere 7 metodun karşılaştırmasını, göreceli yüzde hatası (RPE), ortalama karekök hatası (RMSE), ortalama yüzde hatası (MPE), ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) chi-kare testi (χ^2) ve varyans analizi olmak üzere 6 istatistiksel araç kullanarak yapmışlardır. Sonuç olarak ise, MOM ve MLM metotlarının Weibull dağılım eğrileri için gerekli şekil ve ölçek parametrelerinin belirlenmesinde en verimli metotlar olduğu kararına varmışlardır (Azad vd., 2014: 3056).

Carrillo ve ark. ise, Grafik metodu (GM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Moment metodu (MOM) ve Güç Yoğunluğu metodu (PD) ve önerdikleri yeni metodu (Parça Yoğunluğu Enerji metodu (PDEM)) karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, rüzgar güç dağılımı ve güç dağılımı grafikleri incelendiği zaman R^2 değerleri göz önüne alınırsa, önerilen PDEM'nun en iyi davranışı sergilediği, MOM'un ise dağılım uyumu konusunda R^2 ve RMSE değerleri göz önüne alındığı zaman en uygun davranışı gösterdiği belirtilmiştir (Carrillo vd., 2014: 2676).

Kidmo ve ark. yaptıkları çalışmada, JMM, EPFM, GM, MLM, MOM ve MMLM metotlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sonuçlara göre, rüzgar hızı dağılımının tahmini için kullanılan şekil ve ölçek parametrelerinin tahmininde EPFM ve ardından MOM en doğru ve verimli sonuçları vermişlerdir (Kidmo vd., 2015: 105).

Werapun ve ark ise, parametre tahmini için JMM, EPFM, MLM, MMLM ve GM metotlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucuna göre, EPFM diğer metotlara göre en iyi performansı sergilerken, GM istenen sonuçları sağlayamamıştır (Werapun vd., 2015: 976).

Islam ve ark., yaptıkları çalışmada Weibull dağılımı için kullanılan GM, JMM, EPFM metotlarını ve Rayl (Rayleigh) dağılımını Saint (Martin'island, Bangladeş) verileri için karşılaştırmışlar ve GM ve EPFM metotlarının en doğru sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. (Islam vd., 2016: 1).

Mohammadi ve ark. ise, GM, JMM, LM, EPFM, MLM ve MMLM olmak üzere 6 metodun karşılaştırmasını Kanada'da belirli bölgelerden alınmış aylık ve günlük rüzgar verilerini kullanarak yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise, JMM, LM, EPFM ve MLM olmak üzere dört metodun istenen sonuçlar verdiği, ancak GM'un zayıf sonuçlar gösterdiği sonucuna varılmış ve farklı rüzgar karakteristiğine sahip bölgeler için etkili tek bir metodun çıkmadığı da belirtilmiştir. (Mohammadi vd., 2016: 322).

Tizgui ve ark. yaptıkları çalışmada, saatlik rüzgar hızı verilerini kullanarak, GM, MLM, JMM, LM, EPFM, MMab ve MOM olmak üzere 7 metodun karşılaştırmasını yapmışlardır. Sonuçlara göre, MLM ve JMM metotları öne çıkmış, bu iki metodun ayrıca karşılaştırılması sonucunda ise, MLM metodu daha düşük hata gösterdiği için, bu metodun diğerlerine üstün olduğu kararına varılmıştır (Tizgui vd., 2017: 650).

Chaurasiya ve ark. ise, Kayathar (Tamil Nadu, Hindistan) bölgesinin rüzgar verilerini kullanarak GM, MOM, PD, JMM, LM, MLM, MMLM, GM ve AML olmak üzere 9 metodu karşılaştırmıştır. Aldıkları sonuçlara göre, MLM ve MMLM istenen performansı göstermiş, GM ve AMLM ise istenen sonuçları sağlayamamıştır (Chaurasiya vd., 2017: 2299).

Badawi ve ark. yaptıkları çalışmada, Filistin'in Gazze şeridine ait rüzgar verilerini kullanarak, MOM, JMM, MLM, MMLM, İkincil Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodu (SMMLM), GM ve EPFM olmak üzere 7 metodun karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmanın sonucuna göre parametre tahmininde en iyi performansı gösteren metot GM olarak belirlenmiştir. (Badawi vd., 2019: 284).

Sumair ve ark. ise, Pakistan'a ait altmış bölgeden alınmış üç yıllık 50 metre yüksekliğinde saatlik rüzgar verisini kullanarak, bu çalışmalarında önerdikleri Rüzgar Enerjisi Yoğunlaştırma metodunu (WEIM) daha önce önerilmiş olan MLM ve MMLM metotlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, WEIM en verimli metot olarak belirtilmiştir. (Sumair vd., 2020: 1715).

Türkiye'de ise, rüzgar enerji potansiyelinin birçok bölgede incelenmesine ve Weibull parametre tahminine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Akdağ ve Dinler, yaptıkları çalışmada Maden, Gökçeada, Çanakkale ve Bozcaada bölgeleri için GM, MLM, MOM ve PD metotlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, PD metodunun parametre tahmini için yeterli bir metot olduğu belirtilmiştir. (Akdağ ve Dinler, 2009: 1761).

Akinci ve ark. ise, Türkiye'nin Kırklareli bölgesinin rüzgar verileri kullanarak, Hurst parametre tahmini yapmıştır (Akinci vd., 2013).

Akdağ ve Güler, Türkiye'deki 13 farklı istasyondan aldıkları rüzgar verilerini kullanarak, GM, MLM, AML, MMLM, MOM, JMM, WAsP metodu WM ve PD metotlarını birbirleriyle ve bu çalışmalarında önerdikleri Yeni Nesil Enerji Örüntü Faktör Metodu (NEPFM) ile karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, yeni önerilen NEPFM'nun Weibull dağılımı parametrelerini tahmin etmede yeterli olduğu belirtilmiştir (Akdağ ve Güler, 2015: 1124).

Dokur, Ceyhan ve Kurban, yaptıkları çalışmada Türkiye'nin Gökçeada, Bozcaada, Bandırma, Bilecik, Yalova ve Sakarya bölgeleri için iki parametrelili Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Ters Weibull dağılımını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonucu olarak, Weibull dağılımı genel olarak uyumlu bulunurken, Ters Weibull dağılımının belirli bölgeler için dönemsel olarak verdiği sonuçlar iyi olarak belirtilmiştir (Dokur vd., 2019: 22).

3. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ

Rüzgar, güneş tarafından ısıtılan atmosfer, dünya yüzeyindeki farklılıklar ve dünyanın hareketi gibi sebeplerle oluşmaktadır. Rüzgar akımının düzeni yüzey farklılıkları, çevresel şartlar ve binalar gibi sebeplere bağlı olarak değişmektedir. Bu rüzgar akışı ya da hareket enerjisinin rüzgar türbinleri tarafından kullanılması ile elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Rüzgar enerji üretimi, rüzgarın enerjisinin kullanımı yoluyla mekanik güç ya da elektrik üretimi anlamına gelmektedir. Rüzgar türbinleri, rüzgar tarafından sağlanan kinetik enerjiyi mekanik güç ya da elektriğe dönüştürmektedirler. Bu mekanik güç kullanılarak tahıl öğütme, su pompalama ya da bir jeneratör vasıtasıyla elektrik üretme işlemi gerçekleşmektedir. Rüzgarın doğrusal hareketi, dairesel harekete dönüştürülerek, akım üreten bir jeneratöre aktarılır. Rüzgarın değişken miktardaki torku, bir dişli kutusu ve jeneratöre bağlı mil aracılığıyla elektriğe dönüştürülür.

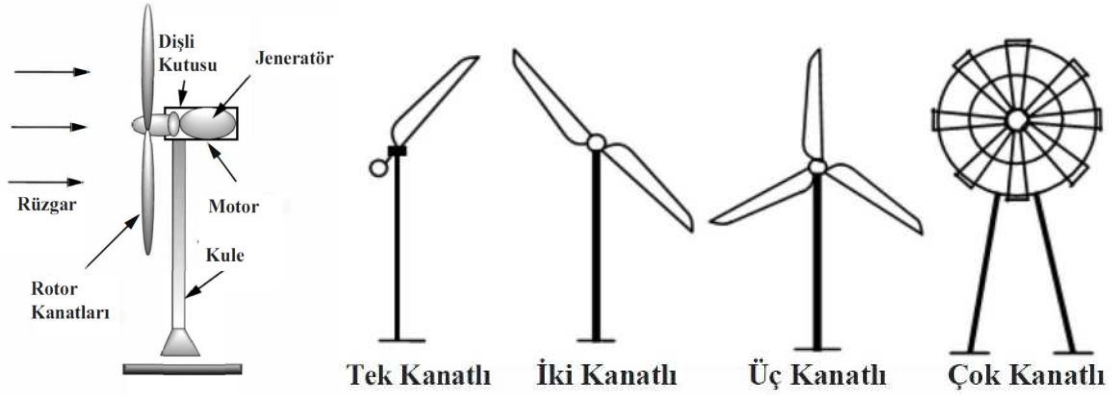
Enerji üretimi amaçlı kullanılan türbinler 50 ila 750 kW arasında olmakla birlikte, 50 kW ve altı güce sahip türbinler daha çok ev kullanımı için uygun görülmektedir. Rüzgar türbinleri çoğunlukla bir rüzgar tarlasına toplu şekilde kurulmaktadır. Tıpkı geleneksel güç santrallerinde olduğu gibi, bu rüzgar tarlalarından alınan elektrik de şebekeye verilerek talebi karşılamaktadır (Sumathi vd., 2015: 248).

3.1. Türbin Yapıları

Rüzgar türbinleri, yatay eksenli ve dikey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Yatay rüzgar türbinleri hem rüzgar yönünde hem de rüzgara karşı çalışabilmektedir. Ancak, çoğu rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin ise, Darrieus ve Savonius olmak üzere iki tipi bulunmaktadır.

3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

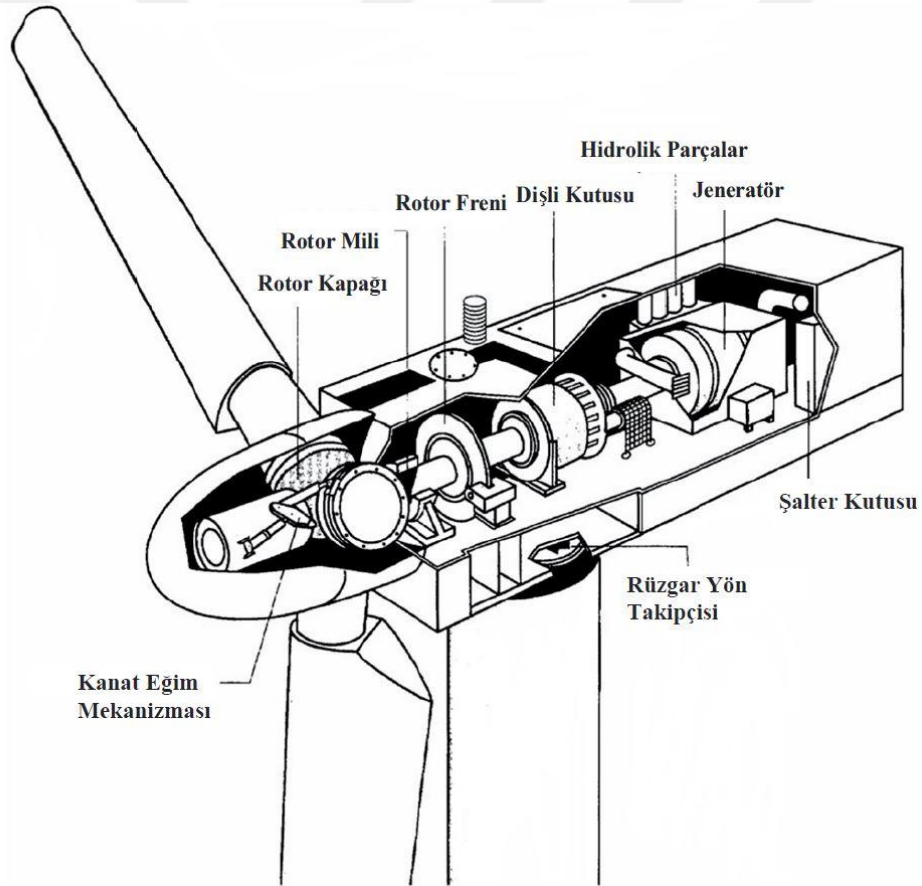
Ticari olarak kullanılan rüzgar enerji sistemlerinin neredeyse tümünde yatay tip rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Bu türbinlerin dönme eksenli yataydır. Bu tip türbinlerin avantajları ise, kanatların esnek hareket kontrolü kullanılarak rotor hızının ve güç çıktısının kontrol edilebilmesidir. Aynı zamanda kanatların açısının bu şekilde kontrol edilebilmesi, türbini yüksek rüzgar hızlarında aşırı hızlı hareket etmeye karşı korur. Şekil (3.1), yatay eksenli bir rüzgar türbinini göstermektedir (Rashid, 2015: 69).



Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgar türbini bileşenleri ve farklı türleri

Kaynak: (Masters, 2013: 310; Patel ve Damania, 2013: 1402)

Şekil (3.2)'de ise, bir yatay eksenli, üç kanatlı rüzgar türbininin bileşenleri görülebilmektedir.



Şekil 3.2. Üç kanatlı bir rüzgar türbini bileşenleri

Kaynak: (Wagner, 2018: 6)

3.1.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

1925 yılında Darrieus tarafından önerilen dikey rüzgar türbini buna bir örnektir. Bu türbinin kanatları kıvrımlıdır ve dikey bir eksen etrafında dönmektedir. Yatay eksenli

türbinlerle karşılaştırıldığı zaman ise, bu türbinde bulunan kanatlar daha karmaşıktır. Bu nedenle üretimi zordur. Savonious tipi türbin ise kanat ucu hızı oranı düşük ve güç verimi düşük bir türbin türüdür ve düşük güçlü rüzgar enerji sistemlerinde kullanılmaktadır (Rashid, 2015: 69).

Dikey eksenli türbinlerin yatay eksenlilere göre avantajları;

- Jeneratör ve dişli kutusu yerde olduğu için türbini kuleye yerleştirmek gerekmez ve dolayısı ile kula masrafı olmaz
- Bu sistem rüzgarı her açıdan aldığı için türbini rüzgar yönünde çevirmek için bir dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde alındığı için nakledilmesi daha kolaydır.

Dikey eksenli türbinlerin sakıncaları ise;

- Yere yakın oldukları için alt noktalarda rüzgar hızları düşük olacaktır,
- Düşük verime sahiptirler,
- Çalışmaya başlaması için ilk hareket verilmesi gerekir, bunun için ise ilk hareket motoru gerekmektedir,
- Ayakta durabilmesi için teller kullanılarak yere sabitlenmesi gerekmektedir,
- Türbin mili yatakları değiştirilme işlemi için tüm makinenin yere yatırılması gerekmektedir.

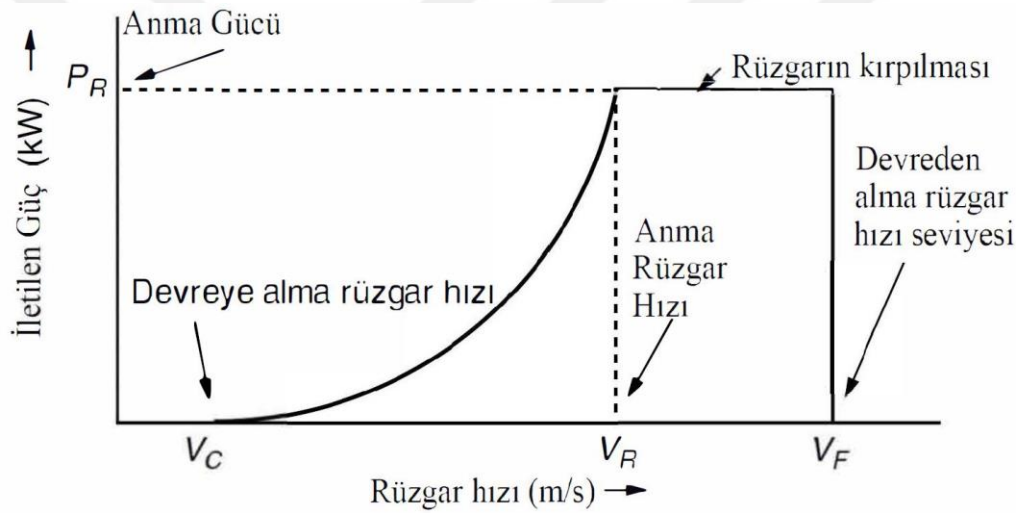
Bu dezavantajlar nedeniyle, dikey eksenli rüzgar türbinlerine çok ilgi gösterilmemektedir (Rashid, 2015: 70). Savonius ve Darrieus rotorlu rüzgar türbinleri, Şekil (3.3)'te görülebilmektedir.

Denklem (3.2) ve (3.3) birleştirilerek oluşturulan Denklem (3.4) önemli bir ilişki belirtmektedir.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.4)$$

Burada P_w değeri rüzgar gücünü (Watt), ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3) (15°C ve 1 atm için, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$), A rüzgarın geçtiği kesit alanını (m^2) ve v rüzgar hızını (m/s) belirtmektedir (Masters, 2013: 312).

Belirli bir rüzgar türbini için en önemli teknik bilgi, güç eğrisidir. Bu eğri, rüzgar hızı ve jeneratörün elektriksel çıktısı arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. İdeal bir eğri Şekil (3.4)'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Farklı rüzgar hızlarına göre değişen güç eğrisi

Kaynak: (Masters, 2013: 355)

Herhangi bir elektrik güç sisteminin en önemli karakteristiklerinden birisi, sürekli ve tam güçte ne kadar kW ürettiği, yani anma gücüdür. Belirtilen sistem bir jeneratöre sahipse, anma gücü jeneratörün çıktısına göre belirlenir. Eğer bu jeneratör bir yıl boyunca anma gücünü verirse, verilen enerji anma gücünün 8760 (sa/yıl) katı olacaktır. Güç sistemleri tam güçte bir yıl boyunca çalışmadığından, maksimum miktarın altında bir çıktı vermektedirler. Kapasite faktörü (KF) 0 ile 1 arasında değişen, alınan enerji ve anma gücü arasındaki ilişkiyi veren bir özelliktir ve Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$Yıllık \text{ Enerji (kWh / yıl)} = P_R (\text{kW}) \times 8760 (\text{sa / yıl}) \times KF \quad (3.5)$$

Burada P_R anma gücü (kW) ve KF kapasite faktörü değerleridir.

$$KF = \frac{\text{Verilen gerçek enerji}}{P_R \times 8760} \quad (3.6)$$

Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse,

$$KF = \frac{\text{Verilen gerçek enerji} / 8760 \text{ sa} / \text{yıl}}{P_R} = \frac{\text{Ortalama güç}}{\text{Anma gücü}} \quad (3.7)$$

3.3. Rüzgar Hızı Veri Seti

Bu çalışmada saatlik ve üç yıllık 50 metre yükseklikteki 10 bölgeye ait rüzgar hızı verileri kullanılmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda meteoroloji istasyonlarından, ASOS network (AWOS), Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), Global Wind Atlas (GWA), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Windnavigator, Vortex Interface ve Solar Radiation Data (SoDa) kaynaklarından elde edilen rüzgar hızı veri setlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu veri sağlayıcılarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin 10 metre yükseklikteki bir veri setinin kullanılarak yapılan analizler hassas benzetim sonuçları veremeyecektir. Bunun için Avrupa ve Amerika’da kullanılan eşitlikler (Logaritmik Kanun ve G Kanunu) ile veri seti farklı yükseklikler için tekrar hesaplanarak analizler yapılabilmektedir. Bu alışmada G Kanunu kullanılarak, 10 metre yükseklikten alınan rüzgar hızları, 50 metre yükseklik için kullanılacak rüzgar hızlarına dönüştürülmüştür. G Kanunu, Denklem (3.8)’de verilmiştir (Gualtieri ve Secci, 2011: 2191).

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

Burada, α değeri Hellman katsayısıdır. Aynı zamanda atmosferik kararlılık, rüzgar hızı, yüzey özellikleri ya da yükseklik farkına bağlı olan WSC olarak da bilinmektedir. WSC değeri, şehir merkezlerinde 0.40 değerinden, düşük engebeli zemine sahip bölgeler ve gl, deniz yüzeyleri için 0.10 değerine kadar değişmektedir (Bañuelos-Ruedas vd., 2010: 2385).

Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan WSC değeri 1/7 (0.143)'dir (Counihan, 1975: 875). Buna ek olarak, Denklem (3.8)'de bulunan v_1 değeri, h_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı değeridir. Ayrıca bu denklemde bulunan v_2 değeri ise, dönüşüm yapılmak istenen h_2 yüksekliğindeki rüzgar hızı değeridir.

Belirtilen rüzgar hızı veri sağlayıcıları tarafından sunulan veriler çalışmaya uygunluğu açısından incelenmiş ve bu kaynaklar arsında en uygun veriyi sağlayan kaynağın verileri kullanılmıştır. Bu kaynakların birçoğu ise; eksik veri, yanlış veya yetersiz zaman aralığı ve yükseklik değerleri, veri işleme sürecinin uzatılması, abonelik gerektirmesi, sağlanan verinin sadece işlenmiş olarak sunulması gibi nedenlerden dolayı kullanılmamıştır.

Bu çalışmada, Türkiye yıllık rüzgar enerji akısı en yüksek ilk 10 bölgenin 50 metre yükseklikteki üç yıllık rüzgar hızları saatlik aralıklarla kullanılmıştır (Süzek, 2007: 46). Kullanılan veriler, belirtilen veri sağlayıcıları arasından tez çalışması için uygun verileri sağlayan kaynağın veri setinden edinilmiştir (Solar Radiation Data, 2020). Bu çalışmada kullanılan bölgeler ve rüzgar verisi aralığı sırasıyla Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan bölgeler ve yıllık rüzgar enerji profillerine göre sıralaması

Sıralama	Bölge	Rüzgar Verisinin Zaman Aralığı
1	Bozcaada	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
2	Amasra	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
3	Maden	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
4	Çanakkale	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
5	Gökçeada	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
6	Bandırma	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
7	Geyve	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
8	Kumköy	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
9	Yunak	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00
10	Güney	1.01.2017 00:00 – 31.12.2019 24:00

Kaynak: (Süzek, 2007: 46)



Şekil 3.5.. Rüzgar verisi alınan bölgeler

3.4. Rüzgar Hız Modellemesi ve Tahmini

Rüzgar hızı karakteristiğini modelleme ve tahmini için kullanılmakta olan birçok metot bulunmaktadır. Bu metotlar, süreklilik, fiziksel, istatistiksel, matematiksel gibi başlıklar altında literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmıştır (Chang, 2014: 163; Soman vd., 2010: 2; Wang vd., 2016: 883).

- **Zaman Ölçütlü Sınıflandırma**
 - Ultra kısa dönem rüzgar hız tahmini (birkaç dakikadan bir saate kadar)
 - Kısa dönem rüzgar hız tahmini (bir saatten birkaç saate kadar)
 - Orta dönem rüzgar hız tahmini (birkaç saatten bir haftaya kadar)
 - Uzun dönem rüzgar hız tahmini (bir haftadan bir yıl ve üzerine kadar)
- **Süreklilik Metodu**
- **Fiziksel Yaklaşım**
 - Numerik Hava Tahmini (NWP)
(Sıcaklık, basınç, yüzey engebese ve bölgedeki engeller etkilidir.)
- **İstatistiksel Yaklaşımlar**
 - Yapay Sinir Ağı (ANN)
 - Zaman Serisi Modelleri
 - ARX
 - ARMA
 - ARIMA

- Grey Öngörüler
- Lineer Öngörüler
- Üstel Yumuşatma
- **Matematiksel Modeller**
 - Tekli Model
 - Weibull Dağılımı
 - Normal Dağılımı
 - Burr Dağılımı
 - Lognormal Dağılımı
 - Gamma Dağılımı
 - Kesilmiş Dağılım
 - Rayleigh Dağılımı
 - Log-lojistik Dağılımı
 - Çoklu Model
 - Karışım Gamma ve Weibull Dağılımı (GW)
 - Karışım Normal Dağılımı (NN)
 - Karışım Normal ve Weibull Dağılımı (NW)
 - Karışım Weibull Dağılımı (WW)
 - Karışım Entropi Prensibi Dağılımı (MEP)

Bu çalışmada ise, ülkemizin yıllık rüzgar enerji profili yüksek olan bölgeleri üzerinde iki parametrelili Weibull dağılımı için kullanılan parametre tahmin metotlarının bu konudaki performansı incelenmiştir.

Belirtilen matematiksel modeller arasından Weibull dağılımı en yaygın biçimde kullanılan modeldir. Bunun nedeni ise, bu dağılımın iki adet esnek parametreye sahip olmasıdır. Bu esneklik, Weibull dağılımının su seviyesi ve yağış, seramik gücü, güneş ışınlamı değerlendirilmesi ve mikrobiyal hayatta kalma verilerinin tahmininde kullanılmasını mümkün kılar (Lei vd., 2020: 20751; Lai vd., 2006: 63). Weibull şekil parametresi, veri dağılımının genişliğini tanımlarken, ölçek parametresi ise, veri dağılım grafiğindeki apsis ölçeğini kontrol

eder. Ancak, Weibull fonksiyonunun doğada karşılaşılan her rüzgar yapısını temsil edemediğine de dikkat edilmelidir(Chang, 2011: 1848).

Literatürde kullanılan Weibull dağılımının ana sınırlamalarından birisi de bu dağılımın durağan rüzgar hızlarını modellemedeki düşük doğruluğudur. Bu gibi durumlarda ise, bahsi geçen çoklu model dağılımları düşünülebilir (Karışım Weibull Dağılımı gibi).

İki parametrelili Weibull dağılımı için oluşturulan parametre tahmin metotlarının amacı, Weibull dağılımı içerisinde kullanılan şekil ve ölçek parametrelerini belirleyerek, bu dağılımın rüzgar verilerini kullanmak suretiyle düzgün bir şekilde işlemlerini sağlamaktır. Bu amaçla önerilen birçok parametre tahmin metodu bulunmakla birlikte, bunlardan herhangi birisinin diğerine üstünlüğü kesin olarak belirtilememiştir ve karşılaştırma öncesinde bu metotlardan birisinin diğerlerinden daha kesin sonuçlar verdiği söylenememektedir.

Bu amaçla, bu metotların belirlenen bölgelere ait rüzgar verileri kullanılarak karşılaştırılması gerekmektedir. Yapılan karşılaştırmalarla genel olarak eldeki rüzgar verisine en yakın uyumu sağlayan Weibull dağılımına ait şekil ve ölçek parametrelerini veren metodun, bu bölge için diğer parametre tahmin metotlarına göre daha verimli çalıştığı söylenebilmektedir. Ancak bu şekilde üstünlük gösteren bir metot tüm bölgelerde aynı üstünlüğü gösterecek anlamına gelmemektedir. Bunun için, öncelikli olarak belirlenen bölgelerin rüzgar verisi kullanılarak karşılaştırma yapılması ve bu bölgeler için sonrasında kullanılan metotlar açısından bir yorumlama yapılması gerekmektedir.

4. İKİ PARAMETRELİ WEİBULL DAĞILIMI

Weibull dağılımı İsveçli mühendis olan Waloddi Weibull (1887-1979) tarafından 1937 yılında önerilmiştir. Weibull, konuyla alakalı çalışmasını 1951'de yayınlamıştır. Bu dağılım kümülatif başarısızlık oranlarını tanımlamaktadır ve sıklıkla ürünlerin sağkalım ya da güvenilirlik analizi için kullanılmaktadır. Weibull dağılımı, oldukça küçük boyutta örneklerle bile güvenilir sonuçlar verebilmektedir (Clement ve Lasky, 2020: 1).

İki parametrelili Weibull dağılımı, rüzgar hızı tahmininde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Jung ve Schindler, yaptıkları çalışmada, farklı teorik parametrik dağılım fonksiyonlarının uyumluluğunu karşılaştıran 46 adet çalışmayı gözden geçirmiş ve bu çalışmalar içerisinde en yaygın olarak kullanılan dağılımın açık arayla iki parametrelili Weibull dağılımı olduğunu belirtmişlerdir (Jung ve Schindler, 2019: 1).

Carta ve ark. ise, rüzgar hızı verilerine uygulanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarını karşılaştırmış ve iki parametrelili Weibull dağılımının;

- i. Esneklik,
- ii. Sadece iki parametre kullanımı,
- iii. Kullanılan metot ne olursa olsun parametrelerin tahminindeki kolaylık,
- iv. Kapalı bir formda belirtilebilmesi ve bunun dağılımın kullanımını kolaylaştırması ve bu dağılımın belirli kalite belirleme testlerinin bulunması,
- v. Parametrelerinin belli örnekler kullanılarak hesaplandığı zaman belirli kalite belirleme testlerinin bulunması

gibi avantajları bulunduğunu belirtmişlerdir (Carta vd., 2009: 951).

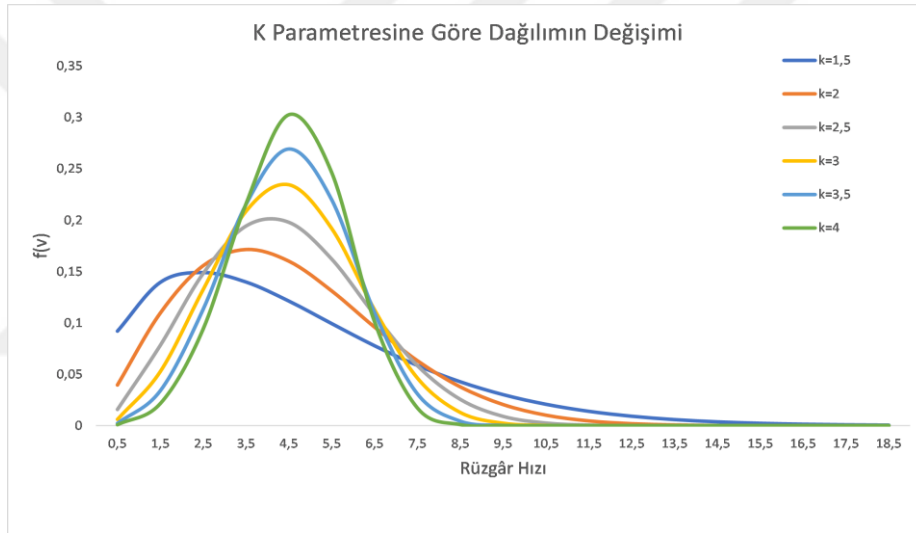
Weibull dağılımı, kümülatif dağılım fonksiyonu ve olasılık yoğunluk fonksiyonunu içermektedir. Matematiksel istatistikte, keyfi bir değerin olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf) bu keyfi değerin gözlem uzayındaki herhangi bir noktada olabilirliğini tanımlayan bir matematiksel modeldir. Kümülatif dağılım fonksiyonu (cdf) ise, keyfi bir değerin belirli bir değerden düşük ya da o değere eşit olma olasılığını tanımlar. Olasılık yoğunluk fonksiyonundaki belirli bir değerin altındaki kümülatif alan buna örnek verilebilir (Chang, 2011: 1849).

4.1. Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

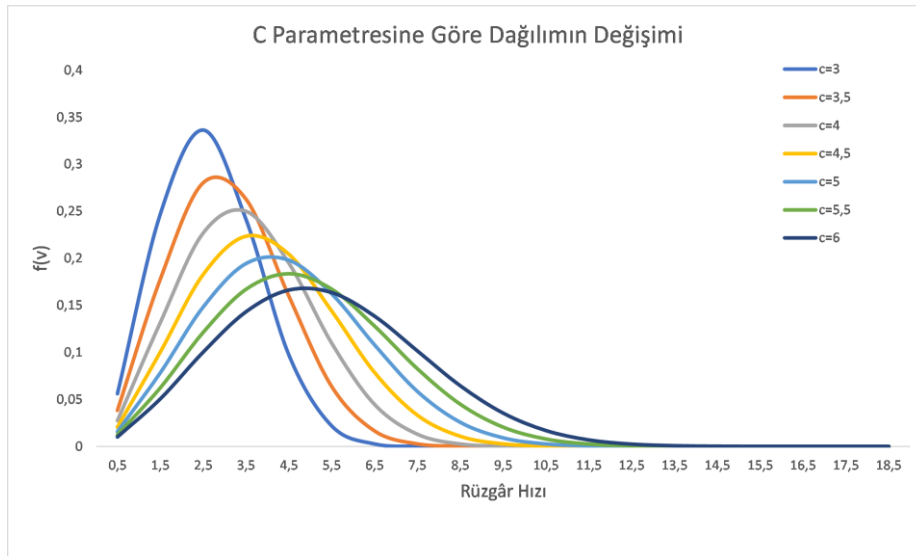
Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.1)$$

Burada $f(v)$ değeri, verilen bir rüzgar hızı (v) için hesaplanan Weibull fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Bu değer, rüzgar hızının gözlemlene olasılığıdır (Chaudhry, 2009: 4). Weibull dağılımı kullanarak, iki parametrenin tahmini yapılmaktadır. Bunlar, şekil (k) ve ölçek (c) parametreleridir. Bu parametrelerin hesaplanması ise, belirli metotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir ve bu metotlar bu çalışmada da incelenmiştir. Bu parametrelerin değişiklik göstermesi sonucunda dağılımın da değiştiği görülmektedir. Farklı Weibull şekil ve ölçek parametre değerlerinin dağılımı nasıl değiştirdiği Şekil (4.1) ve (4.2)'de görülebilmektedir.



Şekil 4.1. Weibull şekil (k) parametresinin dağılıma etkisi ($c=5$ m/s için)



Şekil 4.2. Weibull ölçek (c) parametresinin dağılıma etkisi ($k=2.5$ için)

Ayrıca, Weibull dağılımına ait özel bir durum olan Rayleigh dağılımı da (Bir parametrelili Weibull dağılımı) bulunmaktadır. Bu da iki parametrelili Weibull olasılık dağılım fonksiyonunun formunu almaktadır ve tek fark, şekil parametresinin değerinin ‘2.0’ olarak alınmasıdır (Ulgen ve Hepbaşlı, 2002: 497; Dodson, 2006).

4.2. Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

Kümülatif dağılım fonksiyonu olan $F(v)$, ($v \geq 0$ için) rüzgar hızı değerinin (v), verilen bir rüzgar hızı değerine (v) eşit ya da bu değerden küçük olması olasılığını gösterir.

$$F(v) = P(v \leq v) \quad (4.2)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu , Weibull yoğunluk fonksiyonunun (pdf) entegrasyonudur. Her rüzgar hızı aralığının göreceli sıklığının kümülasyonudur. Kümülatif Weibull fonksiyonu Denklem (4.2) ve (4.3)’de gösterilmiştir (Reiszadeh ve Motahar, 2011: 4060).

$$F(v) = \int_0^v f(v)dv \quad (4.3)$$

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.4)$$

Burada $F(v)$ değeri kümülatif dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir. Kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının belirli bir hızdan daha düşük ya da o hıza eşit olma olasılığını verir (Tonsie Djiela vd., 2020: 3).

4.3. Weibull Parametre Tahmin Metotları

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve Weibull kümülatif dağılım fonksiyonunun hesabı ve dolayısıyla bir rüzgar hızı tahmini yapmak amacıyla, bu fonksiyonlar dahilinde bulunan iki parametrenin, şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, birçok metot önerilmiş ve uygulanmıştır.

Bölüm 1.1.’de Literatür taraması başlığı altında da sunulan, birçok metot dünyanın birçok bölgesinde verimlilik ve doğruluk açısından karşılaştırılmış, çalışmaların sonucu olarak ise bir ya da birden fazla metodun diğer metotlardan üstünlüklerinden bahsedilmiştir.

Ancak, alınan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, bu çalışmalar tek bir metot üzerinde karar kılmamış, neredeyse her çalışma farklı bir metodun üstünlüğü ile sonuçlanmıştır. Bu ise, üzerinde çalışma yapılan bu metotların birçok değişkene bağlı olduğunu göstermektedir. Yapılan karşılaştırmalara göre ise genel olarak açığa çıkan değişkenler şu şekildedir;

- i. Çalışma yapılan bölge,
- ii. Kullanılan rüzgar verisinin alındığı yükseklik,
- iii. Kullanılan rüzgar verisinin alınmış olduğu bölgenin deniz seviyesine göre yüksekliği, bölgedeki engebeler ve arazi yapısı,
- iv. Kullanılan rüzgar hızının düşük ya da yüksek olması ve
- v. Rüzgar hızının aralığı (dakikalık, saatlik, günlük, aylık, yıllık gibi).

Görüldüğü üzere, rüzgar hızı ve sürekliliğine etki edebilecek özellikler, üzerinde çalışma yapılan metotlara da etki etmektedir.

Bu çalışmada ise, 11 farklı metot birbiriyle üç şekilde karşılaştırılarak, çalışma yapılan bölgeler için hangi metodun daha verimli ve doğru sonuçlar verdiği incelenmiştir.

4.3.1. Grafik Metodu (GM)

Bu metot, kümülatif Weibull dağılımındaki üstel terimin lineer denklem haline dönüştürülmesini içermektedir. Sonrasında ise, en küçük kareler yöntemi kullanılarak, düz çizginin eğim (k) ve kesişim ($-\ln(c)$) değerleri belirlenir.

Denklem (4.3) kullanılarak, $\ln(-\ln(1 - F(v))) = k \ln(v) - k \ln(c)$ değeri düz çizginin denklemi olarak oluşturulur. Şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin en küçük kareler yöntemi kullanılarak belirlenmesi şu sırasıyla Denklem (4.5) ve (4.6)'te verilmiştir (Tonsie Djiela vd., 2020: 4).

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (\ln(v_i) \times (\ln(-\ln(1 - F(v_i)))) - \left(\sum_{i=1}^n \ln(v_i) \right) \times \left(\sum_{i=1}^n (\ln(-\ln(1 - F(v_i)))) \right)}{n \times \sum_{i=1}^n (\ln(v_i))^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\ln(v_i)) \right)^2} \quad (4.5)$$

$$c = e^{\left[-\frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\ln(-\ln(1 - F(v_i)))) - k \left(\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \ln(v_i) \right)}{k} \right]} \quad (4.6)$$

Burada n değeri gözlem yapılan toplam rüzgar hızını sayısını, v_i değeri ise, i zamanında gözlenen rüzgar hızını belirtmektedir.

4.3.2. Maksimum Olabilirlik Metodu (MLM)

Bu metot, Weibull dağılımının şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerinin belirlenmesi için oldukça yoğun bir rakamsal iterasyon gerektirmektedir. Bu metot, zaman serisi formundaki rüzgar hızı verisinin olabilirlik fonksiyonunu kullanmaktadır (Saleh vd., 2012: 715; Chaurasiya vd., 2018: 7).

Eğer ($v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$) değerleri, Denklem (4.3)'teki olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip, gelişigüzel rüzgar hızı örnekleri olarak varsayılırsa, verilen bu örnek değerlerin olabilirlik fonksiyonu $L(k, c, v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ Denklem (4.7)'de olduğu gibi yazılabilir.

$$L(k, c, v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n f(k, c, v_i) \quad (4.7)$$

Ardından,

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln [f(v_i)] \quad (4.8)$$

n adet bağımsız örneklem için maksimum olabilirlik fonksiyonu, denklem sistemi çözülerek elde edilir:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial k} = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c} = 0 \quad (4.10)$$

Yukardaki denklem setinin çözümü (4.9 ve 4.10), k ve c değerlerinin hesaplanması için gerekli olan aşağıda belirtilen formülü vermektedir (Arslan vd., 2014: 822; Chang, 2011: 275; Chaurasiya vd., 2018: 7).

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i}{n} \right)^{-1} \quad (4.11)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (4.12)$$

Burada n gözlem sayısı, v_i ise, i aralığında ölçülmüş olan rüzgar hızı değeridir.

4.3.3. Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu (MMLM)

Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik metodunun uygulanabilmesi için, rüzgar hızı verisinin frekans dağılımı formatında olması gerekmektedir. Weibull parametrelerinin belirlenebilmesi için, Maksimum Olabilirlik metoduna benzer şekilde bu metot için de birçok iterasyon gerekmektedir. Bu metot kullanılarak k ve c parametrelerinin hesaplanması Denklem (4.13) ve (4.14)'te verilmiştir (Seguro ve Lambert, 2000: 78).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)} - \sum_{i=1}^n \ln(v_i) f(v_i) \right]^{-1} \quad (4.13)$$

$$c = \left[\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i) \right]^{1/k} \quad (4.14)$$

Burada v_i değeri, i sınıfının merkezindeki rüzgar hızını, $f(v_i)$ değeri ise, rüzgar hızının i sınıfı içerisindeki frekansını ve n değeri de sınıf sayısıdır. MMLM'nun bir dezavantajı ise, eğim uyumunun tüm rüzgar hızı dağılımına olmasıdır. Dağılımın sadece bir parçası seçilemez. (S. J. van Donk vd., 2005: 505)

4.3.4. Enerji Örüntü Faktörü Metodu (EPFM)

Şekil ve ölçek parametrelerinin hesabı için kullanılan bu metot ise, rüzgar hızının ortalamasıyla ilişkilidir. Göreceli olarak daha basit bir formülasyona sahiptir. Parametrelerin hesabı için önce Enerji Örüntü Faktörü (Epf) adı verilen bir değişkenin hesaplanması gerekmektedir. Denklem (4.15)'te bu hesap belirtilmiştir.

$$Epf = \frac{\overline{v^3}}{(\bar{v})^3} \quad (4.15)$$

Burada $\overline{v^3}$ değeri rüzgar hızının küpünün ortalaması olup, Denklem (4.16)'da hesaplanması gösterilmiştir.

$$\overline{v^3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (4.16)$$

Ayrıca, $(\overline{v})^3$ değeri ise, rüzgar hızının ortalamasının küpü olup, Denklem (4.17)'de hesaplanması gösterilmiştir (Islam vd., 2016: 3).

$$(\overline{v})^3 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right)^3 \quad (4.17)$$

Denklem (4.15)'te verilmiş olan Epf değeri hesaplandıktan sonra Weibull şekil parametresi (k) (4.17)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$k = 1 + \frac{3.69}{Epf^2} \quad (4.18)$$

Şekil parametresi (k) hesaplandıktan sonra ise, ölçek parametresi (c) değeri (4.19)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$c = \frac{\overline{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.19)$$

Burada Γ ifadesi Gamma fonksiyonudur ve Denklem (4.20) ve (4.21) ile ifade edilmiştir.

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (4.20)$$

Manwell ve ark. tarafından kullanılan Gamma fonksiyonu (4.21)'de verilmiştir (Manwell vd., 2010: 60).

$$\Gamma(x) = \sqrt{2\pi x} \cdot x^{x-1} \cdot e^{-x} \cdot \left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{139}{58140x^3} + \dots \right) \quad (4.21)$$

4.3.5. Rüzgar Enerjisi Yoğunlaştırma Metodu (WEIM)

Sumair ve ark. tarafından yeni önerilmiş bir metot olan WEIM, iki dayanağa sahiptir;

i. Ölçek parametresi, rüzgar hızının ortalaması ile doğru orantılıdır

$$c \propto \bar{v} \rightarrow c = A\bar{v} \quad (4.22)$$

Burada belirtilen A değeri ise, aşağıda belirtilen ikinci dayanağa bakılarak hesaplanır.

ii. Rüzgarın ortalama gücü, ortalama rüzgar gücünden farklıdır. Yani, 1,2,3,4 ve 5 m/s değerlerindeki rüzgar hızlarına ait rüzgar güçleri sırasıyla 0.62, 4.90, 16.54, 39,20 ve 76.56 W/m² değerlerine eşit olabilecek iken bu değerlerin ortalaması ise 27.57 W/m²'dir. Eğer rüzgar gücü ortalama rüzgar hızı baz alınarak hesaplınsaydı (3 m/s), sonuç 16.54 W/m² olacaktı (27.57 W/m² değerinden daha az). Bu nedenle bir farklılık oluşmaktadır. Bu göreceli farka ise Rüzgar Enerjisi Yoğunlaştırıcı (WEI) adı verilmiştir. Hesaplanması ise Denklem (4.23)'te görülmektedir.

$$A = WEI = \frac{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 T}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 T} = \frac{\left[\int_0^\infty v f(v) dv \right]^3}{\int_0^\infty [v f(v) d(v)]^3} \quad (4.23)$$

Yukarda bahsedilen dayanaklar kullanılarak, Denklem (4.24)'te verilen, ortalama rüzgar hızı ve ölçek parametresi (c) arasındaki ilişki uzun dönemli rüzgar verisi kullanılarak oluşturulmuştur.

$$\ln c = \frac{1}{k} \ln \bar{v}^k \rightarrow \ln c - \frac{1}{k} \ln \bar{v}^k = 0 \quad (4.24)$$

Denklem (4.23)'ün, (4.22)'ye eklenmesiyle ölçek parametresi (c) hesaplanır ve ardından (4.24) kullanılarak şekil parametresi (k) değeri tespit edilir (Sumair vd., 2020: 1716).

4.3.6. Justus Moment Metodu (JMM)

Bu ampirik metot, Justus tarafından 1977'de tanıtılmıştır (Justus vd., 1978: 351). Weibull k ve c parametreleri bu metot baz alınarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar, Denklem (4.25) ve (4.26)'da görülmektedir (Akdağ ve Güler, 2015: 1127).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} \quad (4.25)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.26)$$

4.3.7. Güç Yoğunluğu Metodu (PD)

Bu metodu kullanarak şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerini hesaplamak için öncelikli olarak EPFM'una benzer şekilde bir olduğu gibi bir Enerji Örüntü Faktörü (Epf) hesaplanır. Bu metotta, bu faktörde ufak bir modifikasyon yapılmıştır ve Rüzgar Enerji Örüntü Faktörü ($Wepf$) olarak hesaplanmıştır. Bu faktörün hesaplanması Denklem (4.27)'de verilmiştir (Azad vd., 2014: 3064).

$$Wepf = \frac{\text{Rüzgârda bulunan toplam güç}}{\text{Ortalama rüzgâr hızının küpü alınarak edinilen rüzgâr gücü}} \quad (4.27)$$

$$Wepf = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i\right)^3} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v})^3} = \frac{\Gamma(1 + \frac{3}{k})}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})^3}$$

Enerji örüntü faktörü hesaplandıktan sonra ise, Weibull şekil ve ölçek parametreleri (4.28) ve (4.29)'da hesaplanmıştır.

$$\frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - Wepf = 0 \quad (4.28)$$

Ölçek parametresinin hesabı, Denklem (4.29)'da verilmiştir.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.29)$$

4.3.8. Lysen Metodu (LM)

Lysen tarafından önerilen bu metot (Lysen, 1982), Weibull şekil parametresini Justus metodu ile aynı şekilde hesaplamaktadır. Bu nedenle k değeri için Denklem (4.24) kullanılmıştır. Ölçek parametresinin hesabında ise Denklem (4.29) kullanılmaktadır (Mohammadi vd., 2016: 325).

$$c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (4.30)$$

4.3.9. Moment Metodu (MOM)

Bu metot Justus ve Mikhail tarafından 1977 yılında önerilmiştir (Justus vd., 1978: 351). Bu metot, Denklem (4.31) ve (4.32)'de belirtildiği gibi, Weibull şekil ve ölçek parametrelerini belirlemek için rüzgar hızlarının ortalamasını ($\bar{v}$) ve standart sapmasını (σ) kullanır (Chaurasiya vd., 2017: 2302) (Arslan vd., 2014: 822) (Costa Rocha vd., 2012: 396) .

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (4.31)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.32)$$

Ayrıca, Azad ve ark. yaptıkları çalışmada, moment metodu için hesaplamaların ilerletilmesi durumunda şekil parametresinin Denklem (4.33)'te gösterildiği gibi hesaplanabileceğini belirtmişlerdir (Azad vd., 2014: 3060).

$$k = \left(\frac{0.9874}{\frac{\sigma}{\bar{v}}} \right)^{1.0983} \quad (4.33)$$

4.3.10. Mabchour Metodu (MMab)

Bu metot, Fas'ın rüzgar potansiyelinin değerlendirilmesi esnasında kullanılmıştır (Mabchour, 1999). Şekil parametresinin (k) hesabı Denklem (4.34) ile gösterilmiştir. Ölçek parametresinin (c) hesaplanması ise Justus metodu ile aynı olup, Denklem (4.26)'da gösterildiği gibidir (Tiam Kapen vd., 2020: 5).

$$k = 1 + (0.438(\bar{v} - 2))^{0.51} \quad (4.34)$$

4.3.11. Alternatif Maksimum Olabilirlik Metodu (AML)

Bu metot, Maksimum Olabilirlik metodunun (MLM) iteratif karakteristiğinden kaçınmak için basit bir hesaplama prosedürü olarak önerilmiştir (Christofferson ve Gillette

1987: 324). Bu metoda göre şekil parametresi (k) Denklem (4.35)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \left(\frac{n(n-1)}{n \sum_{i=1}^n (\ln(v_i^2)) - \left(\sum_{i=1}^n \ln(v_i) \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.35)$$

Bu metoda göre Weibull ölçek parametresi ise, şekil parametresi hesaplandıktan sonra MLM ile aynı formül kullanılarak Denklem (4.12) ile hesaplanmaktadır.

5. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Bu çalışmada kullanılan 11 metodun model performanslarının karşılaştırılması yapılması amacıyla kullanılan yöntemlerin birisi de hata performans analizi metotlarından faydalanmak olmuştur. İstatistikte genellikle kullanılan araçlar, bu çalışmada da doğruluk ve performans karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

5.1. Hata Performans Metrikleri

Hata performansının analizi için belirtilen 11 metot üzerinden alınan sonuçlar, 4 yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler ise;

- Ortalama karekök hatası (RMSE),
- Belirleme katsayısı (R^2),
- Chi-kare testi (χ^2) ve
- Rüzgar enerji hatası (WEE)

5.1.1. Ortalama Karekök Hatası (RMSE)

Bu parametre, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki sapmayı belirtmektedir. İstenen sonuç ise, alınan değerın sıfıra yakın olmasıdır. Yapılan hesaplama, Denklem (5.1)'de belirtilmiştir (Tizgui vd., 2017: 655; Kidmo vd., 2015: 120).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (5.1)$$

Burada y_i değeri gerçek rüzgar hızını, x_i değeri ise olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak tahmin edilmiş rüzgar hızı değerlerini ve n ise rüzgar hızı sınıfı sayısını belirtmektedir.

5.1.2. Belirleme Katsayısı (R^2)

Bu metot, Weibull dağılımı tarafından farklı metotlar kullanılarak uyumu sağlanan tahmin edilmiş değerler ve gerçek değerler arasındaki lineer ilişkiyi değerlendirir. İstenen ilişki değeri için R^2 değerinin 1'e yakın olması istenir. Yüksek bir R^2 değeri iyi bir uyum olduğu anlamına gelmektedir (Tonsie Djiela vd., 2020: 6). Bu analiz için yapılan hesaplama, Denklem (5.2)'de verilmiştir (Alrashidi vd., 2020: 17).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.2)$$

Burada, n sınıf sayısı, y_i değeri v_i rüzgar hızının frekansını, x_i değeri ise metotlar kullanılarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile hesabı yapılmış olan tahmin edilen frekans değeri ve $\bar{y}$ değeri ise tüm gözlemlerin ortalama frekans değerini vermektedir.

5.1.3. Chi-Kare Testi (χ^2)

Bu test, dağılımlar için gözlenen ve hesaplanan değerlerin sapmalarının ortalama köklerini verir. Bu testte istenen sonuç, değerin sıfıra yakın olmasıdır (Tonsie Djiela vd., 2020: 6). Chi-kare testi daima gözlenen ve hesaplanan sonuçlar arasında anlık farklar olmadığı durumları test eder (Chaurasiya vd., 2017: 2306). Bu testin hesaplanması Denklem (5.3)'te gösterilmiştir.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N - n} \quad (5.3)$$

Burada y_i değeri rüzgar hızının frekansını, x_i değeri Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanan frekans, n değeri frekanstaki değerlerin sayısını ve N değeri de gözlem sayısıdır.

5.1.4. Rüzgar Enerji Hatası (WEE)

Sumair ve ark. tarafından yapılan çalışmada kullanılan bu metot, gerçek rüzgar hızları kullanılarak hesap edilen rüzgar enerjisinin Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanan rüzgar enerjisi ile farkından bahseder (Sumair vd., 2020: 1730). Denklem (5.4)'te bu analizin hesaplanması verilmiştir.

$$W.E.E. = \left| \frac{WED_W - WED_G}{WED_G} \right| \quad (5.4)$$

Burada, WED_W değeri, Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanan rüzgar enerjisini, WED_G değeri ise gerçek rüzgar verisi kullanılarak hesaplanan rüzgar enerjisini ifade etmektedir. Weibull dağılımı kullanılarak yapılan rüzgar enerjisi hesaplaması Denklem (5.5)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
WED_w &= \left[\frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3 \cdot \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{\left(\frac{-v}{c} \right)^k} d(v) \right] T \\
&= \left[\frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \right] T
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Burada belirtilen T değeri zamanı ifade etmektedir ve saat olarak alınmaktadır. Elde edilen sonuçta alınan değerin birimi (kWh/m²)'dir.

6. ANALİZ, BULGULAR VE TARTIŞMA

Önceden de belirtildiği gibi, bu çalışmada kullanılan formüller ve veriler MATLAB yazılımı üzerinde işlenmiş ve alınan sonuçlara göre bir genel değerlendirme yapılmıştır. Bu sonuçlar, grafikler ve tablolar halinde çalışma içerisinde sunulmuştur.

Yapılan çalışmada, rüzgar verileri kullanan 10 bölge sırasıyla;

1. Amasra
2. Bandırma
3. Bozcaada
4. Çanakkale
5. Geyve
6. Gökçeada
7. Güney
8. Kumköy
9. Maden
10. Yunak

bölgeleridir. Bu bölgelere ait 3 yıllık, saatlik, 50 metre yükseklikte saatlik rüzgar hızı verileri kullanılarak, belirtilen 11 metodun karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma üç farklı şekilde yapılmıştır;

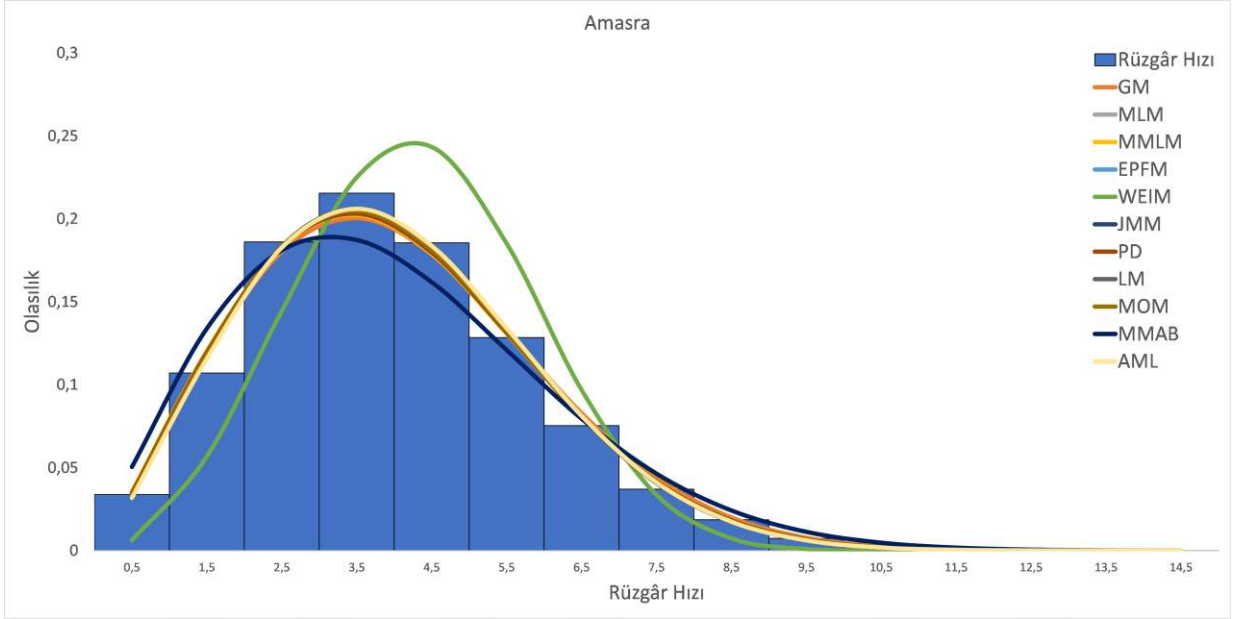
- i. Metotlar tarafından tahmin edilen parametreler kullanılarak oluşturulan dağılım fonksiyonlarının gerçek rüzgar verisine uyumu,
- ii. Metotlar tarafından tahmini yapılan şekil ve ölçek parametreleri kullanılarak hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu ile karşılaştırılması ve
- iii. Metotların hata performans kriterleri kullanılarak ($RMSE$, R^2 , χ^2 ve WEE) verdikleri hata değerlerinin karşılaştırılmasıdır.

Yapılan bu karşılaştırmalar bölge bazında sırasıyla eklenmiş ve açıklamaları yapılmıştır.

6.1. Amasra

6.1.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

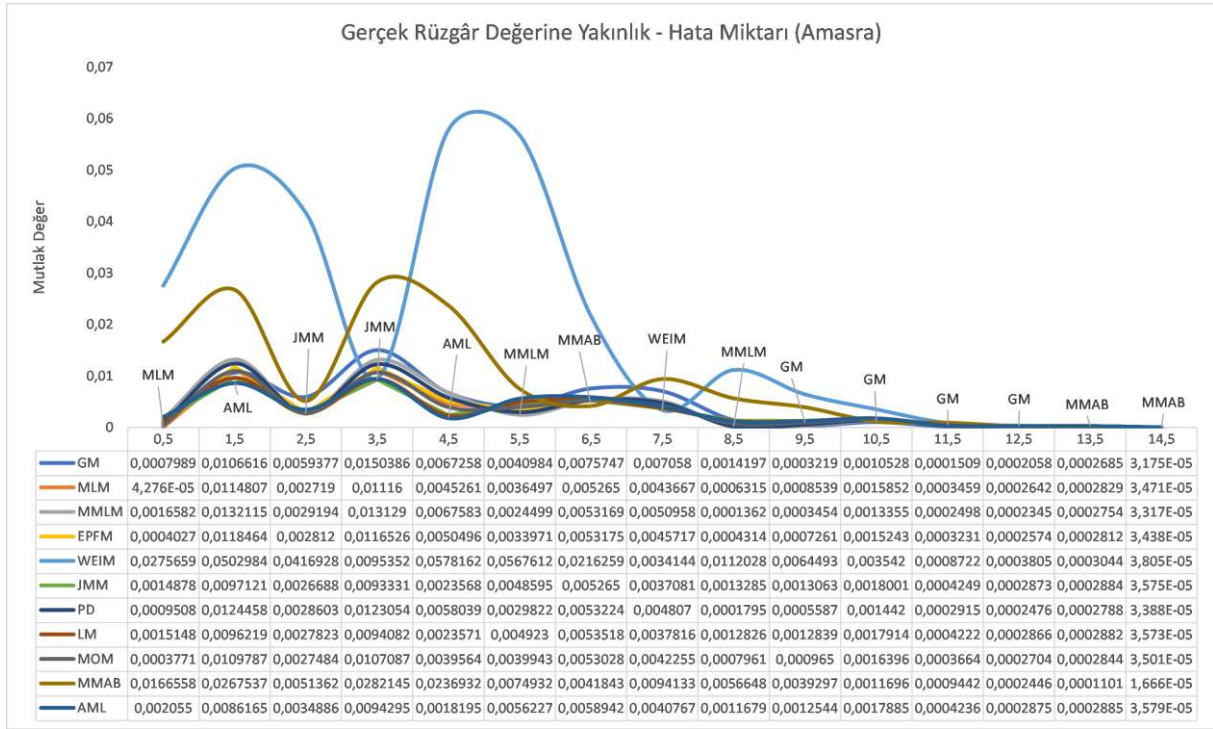
Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Amasra bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.1)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Amasra)

Şekil (6.1)'de görüleceği üzere, Weibull parametre tahmin metotlarından yeni önerilen bir metot olan Rüzgar Enerji Yoğunlaştırma metodu (WEIM) tarafından yapılan parametre tahmini sonucunda ortaya çıkan dağılım istenen modellemeyi verememiştir. Aynı şekilde, daha önceden önerilmiş olan Mabchour Metodu (MMab) da belirli noktalarda istenen sonuçlardan sapma göstermiştir. Diğer metotlar ise, birbirlerine ve gerçek rüzgar değerlerine göre rekabetçi ve yakın sonuçlar vermiştir.

Şekil (6.2) ve Tablo (6.1)'de bu grafik daha yakından incelenerek, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerleri karşılaştırılmış ve 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.1)'den alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.



Şekil 6.2. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.2) incelendiği zaman, her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodun grafik üzerinde belirtildiği görülmektedir.

Tablo 6.1. Weibull parametre tahmin metotlarının Amasra bölgesi için performansı
AMASRA

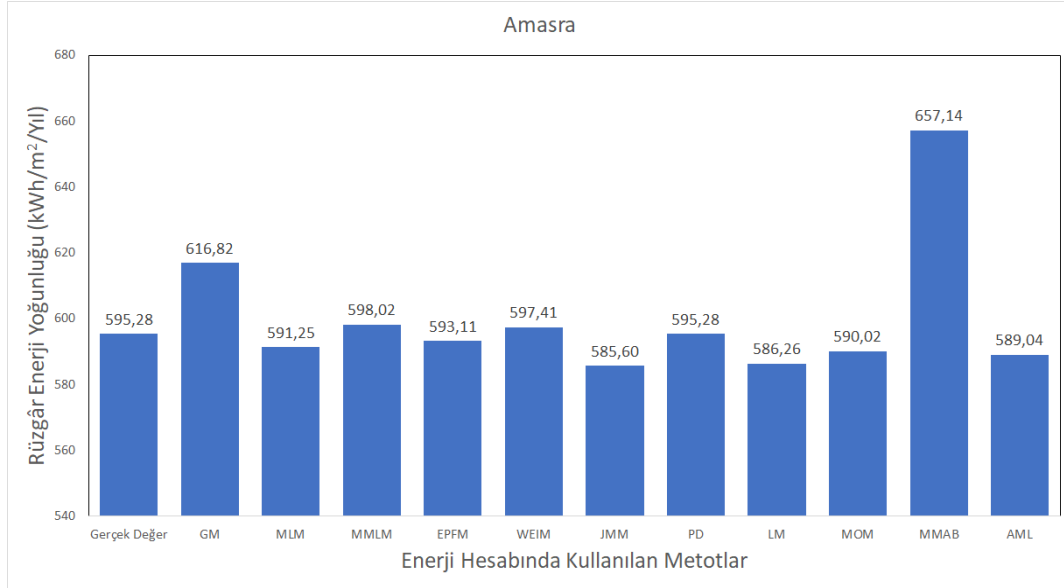
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
GM	4
MMAB	3
MMLM	2
JMM	2
AML	2
MLM	1
WEIM	1
EPFM	0
PD	0
LM	0
MOM	0

Tablo (6.1) ise, Şekil (6.1)'e göre oluşturulmuş olan Şekil (6.2)'de her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Amasra bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **GM** ve ardından **MMab** metotları sağlamıştır.

6.1.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametreler kullanılarak Denklem (5.5)'te verilen hesaplamaların uygulanması ile her metot için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar hızı değerleri kullanılarak hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.3)'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.3)'de görüldüğü üzere Amasra bölgesi için hesaplanan gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri 595,28 kWh/m²/yıl'dır. Bu değere en yakın tahmini yapan ise **PD** metodudur. Ardından ise, EPFM metodu yakın bir değerle takip etmektedir. Burada aynı zamanda, MMAB metodunun hesabında oldukça yüksek sayılabilecek bir sapma olduğu görülebilmektedir.

6.1.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen modellerin hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.2)'de verilmiştir.

Tablo (6.2)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine yakın sonuçlar bir sıralamaya koyulmuştur. Bu sıralama Tablo (6.3)'de görülebilmektedir. Yapılan sıralama, 5.1 başlığı altında incelenen hata performans analizi değerlerine göre gerçekleştirilmiştir ve metotlara ait hata değerleri belirtilen değerlere ve yapılan sınamaya göre 1'e ya da 0'a en yakın değeri veren metot en az hataya sahip olacak şekilde sıralanmıştır.

Tablo 6.2. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Amasra)

		RMSE	R ²	X ²	WEE
Amasra	GM	0,102155	0,99918	3,74E-06	0,03619402
	MLM	0,079947	0,999693	1,4E-06	0,00676613
	MMLM	0,08696	0,99957	1,96E-06	0,00461016
	EPFM	0,081691	0,999665	1,53E-06	0,00364519
	WEIM	0,240996	0,974614	0,000116	0,00357312
	JMM	0,075461	0,999756	1,11E-06	0,01625971
	PD	0,083944	0,999626	1,71E-06	1,1777E-07
	LM	0,076104	0,999748	1,15E-06	0,01514691
	MOM	0,078756	0,99971	1,32E-06	0,00884066
	MMAB	0,144234	0,996743	1,49E-05	0,10392123
	AML	0,079977	0,999692	1,41E-06	0,01048011

Tablo (6.3)'de görülen sıralama, Tablo (6.2)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Amasra bölgesi için en düşük hata değerlerine sahip metot **JMM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla LM ve MOM metotları gelmiştir.

Tablo 6.3. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

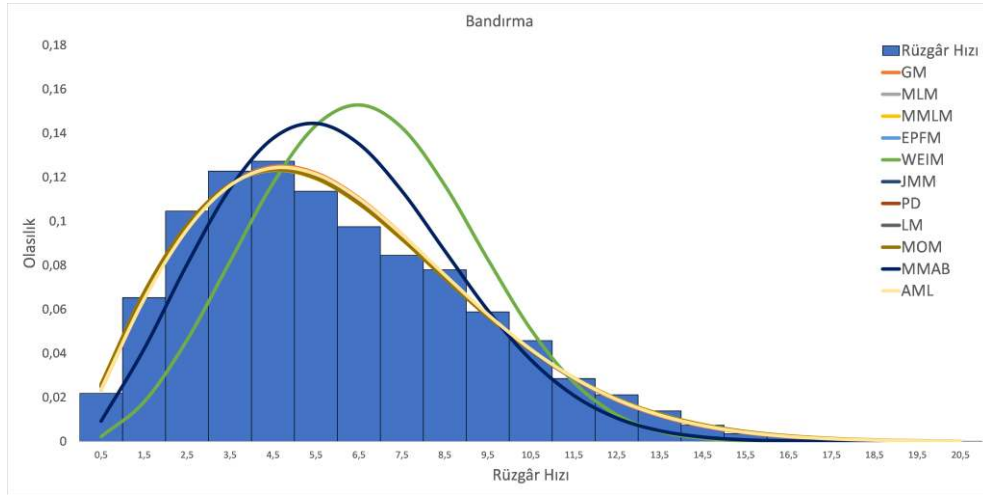
SIRALAMA	RMSE	R ²	X ²	WEE	GENEL SONUÇ	
1	JMM	JMM	JMM	PD	1	JMM
2	LM	LM	LM	WEIM	2	LM
3	MOM	MOM	MOM	EPFM	3	MOM
4	MLM	MLM	MLM	MMLM	4	MLM
5	AML	AML	AML	MLM	5	AML
6	EPFM	EPFM	EPFM	MOM	6	EPFM
7	PD	PD	PD	AML	7	PD
8	MMLM	MMLM	MMLM	LM	8	MMLM
9	GM	GM	GM	JMM	9	GM
10	MMab	MMab	MMab	GM	10	MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11	WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Amasra bölgesi için, **Justus Moment Metodu (JMM)** genel olarak öne çıkmaktadır.

6.2. Bandırma

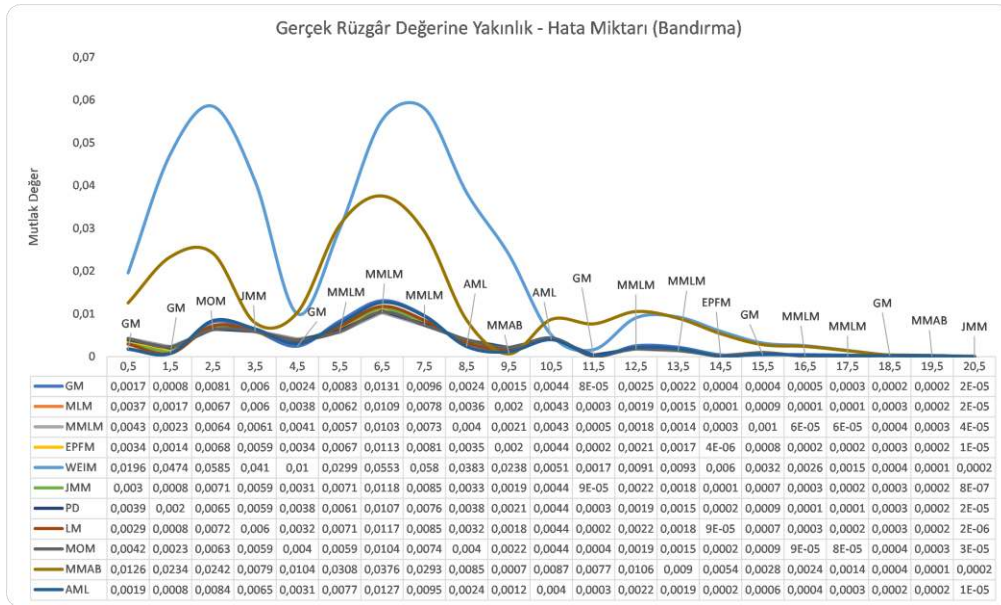
6.2.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Bandırma bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.4)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-2'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Weibull parametre tahmin metodlarının uyumunun karşılaştırılması (Bandırma)

Şekil (6.4)'de görüldüğü üzere, Amasra bölgesi verilerinde olduğu gibi, yeni önerilen bir yaklaşım olan WEIM ve eski metotlardan olan MMab metotları, istenen uyumu yine sağlayamamıştır. Şekil (6.1)'e benzer şekilde, belirli metotlar birbirlerine çok yakın ve rekabetçi sonuçlar vermiştir. Şekil (6.5) ve Tablo (6.4)'de bu grafik daha yakından incelenerek, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerleri karşılaştırılmış ve 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.4)'den alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.



Şekil 6.5. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.5) incelendiği zaman, her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodun grafik üzerinde belirtildiği görülmektedir.

Tablo 6.4. Weibull parametre tahmin metotlarının Bandırma bölgesi için performansı

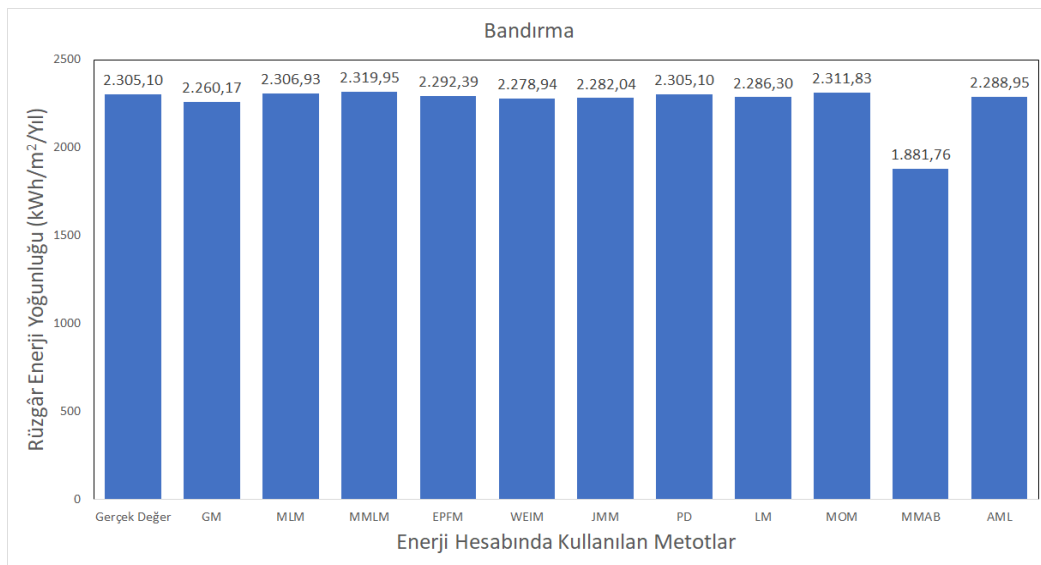
BANDIRMA	
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
MMLM	7
GM	6
JMM	2
MMAB	2
AML	2
EPFM	1
MOM	1
MLM	0
WEIM	0
PD	0
LM	0

Tablo (6.4) ise, Şekil (6.5)'de bulunan her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Bandırma bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **MMLM** ve ardından **GM** metotları sağlamıştır.

6.2.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametreler kullanılarak Denklem (5.5)'te verilen hesaplamanın uygulanması ile her metod için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar hızı değerleri kullanılarak hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.4)'de verilmiştir.



Şekil 6.6. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.4)'de görüldüğü üzere Bandırma bölgesi için hesaplanan gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri 2305,10 kWh/m²/yıl'dır. Bu değere en yakın tahmini yapan ise **PD** metodudur. Ardından ise, MLM metodu yakın bir değerle takip etmektedir. Burada aynı zamanda, MMab metodunun hesabında oldukça yüksek sayılabilecek bir sapma olduğu görülebilmektedir.

6.2.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen modellerin hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.5)'de verilmiştir.

Tablo 6.5. Weibull parametre tahmin metodlarının hata değerleri (Bandırma)

Bandırma		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,092594	0,999384	3,92E-06	0,019492
	MLM	0,079149	0,999671	2,1E-06	0,000794
	MMLM	0,076013	0,99972	1,78E-06	0,006439
	EPFM	0,081164	0,999636	2,32E-06	0,005514
	WEIM	0,287609	0,942658	0,000365	0,011351
	JMM	0,083992	0,999583	2,66E-06	0,010005
	PD	0,077925	0,999691	1,97E-06	5,26E-10
	LM	0,084121	0,99958	2,67E-06	0,008155
	MOM	0,076354	0,999715	1,81E-06	0,002919
	MMAB	0,193308	0,988298	7,46E-05	0,183656
	AML	0,091961	0,999401	3,82E-06	0,007008

Tablo (6.5)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine yakın sonuçlar alınarak bir sıralamaya koyulacak olursa, bu sıralama Tablo (6.6)'da görülebilmektedir.

Tablo 6.6. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

SIRALAMA	RMSE	R ²	X ²	WEE	GENEL SONUÇ	
1	MMLM	MMLM	MMLM	PD	1	MMLM
2	MOM	MOM	MOM	MLM	2	MOM
3	PD	PD	PD	MOM	3	PD
4	MLM	MLM	MLM	EPFM	4	MLM
5	EPFM	EPFM	EPFM	MMLM	5	EPFM
6	JMM	JMM	JMM	AML	6	JMM
7	LM	LM	LM	LM	7	LM
8	AML	AML	AML	JMM	8	AML
9	GM	GM	GM	WEIM	9	GM
10	MMab	MMab	MMab	GM	10	MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11	WEIM

Tablo (6.6)'da görülen sıralama, Tablo (6.5)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Bandırma bölgesi için istenen

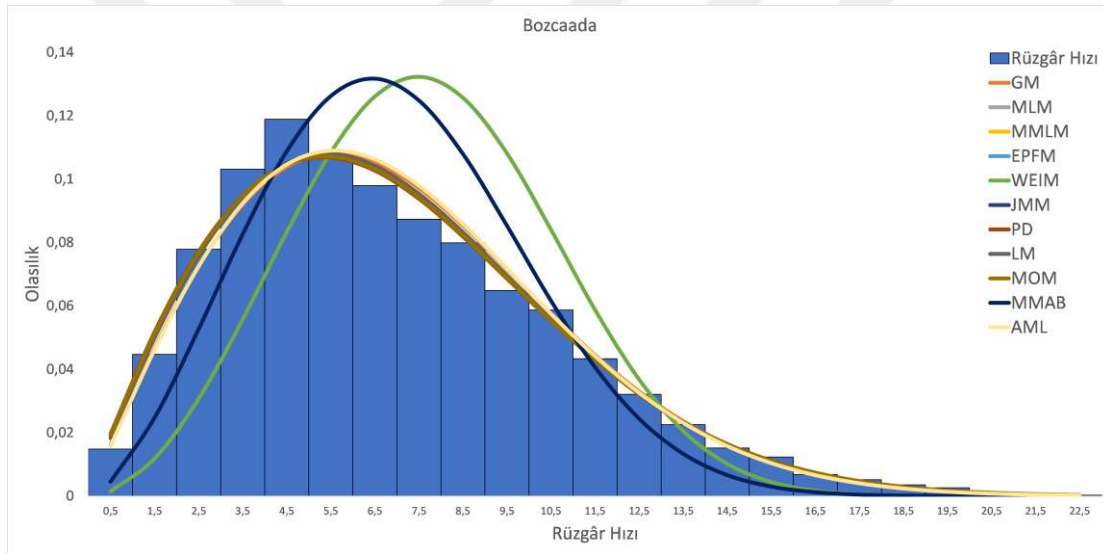
değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **MMLM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla MOM ve PD metotları gelmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Bandırma bölgesi için, **Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik Metodu (MMLM)** ile tahmin edilen parametrelerle oluşturulan modelin genel olarak başarımı öne çıkmaktadır.

6.3. Bozcaada

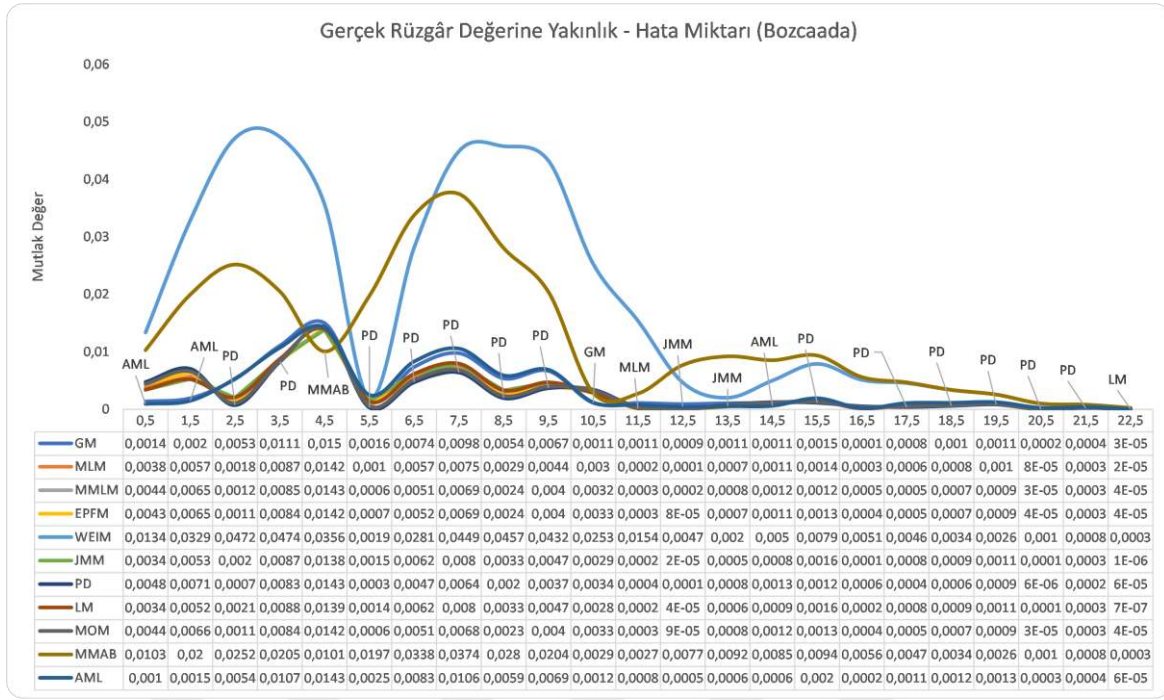
6.3.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Bozcaada bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.7)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-3'te verilmiştir.



Şekil 6.7. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Bozcaada)

Şekil (6.7)'de görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir yaklaşım olan WEIM ve eski metotlardan olan MMab metotları, istenen uyumu sağlayamamıştır. Şekil (6.4)'e benzer şekilde, belirli metotlar birbirlerine çok yakın ve rekabetçi ve rekabetçi sonuçlar vermiştir. Detaylı incelenmesi için bu sonuçlar her bölgede olduğu gibi çalışmanın 'EKLER' başlığı altına eklenmiştir. Şekil (6.8) ve Tablo (6.7)'de bu grafik daha yakından incelenerek, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerleri karşılaştırılmış ve 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.7)'den alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.



Şekil 6.8. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.8), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.7) ise, Şekil (6.8)'deki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

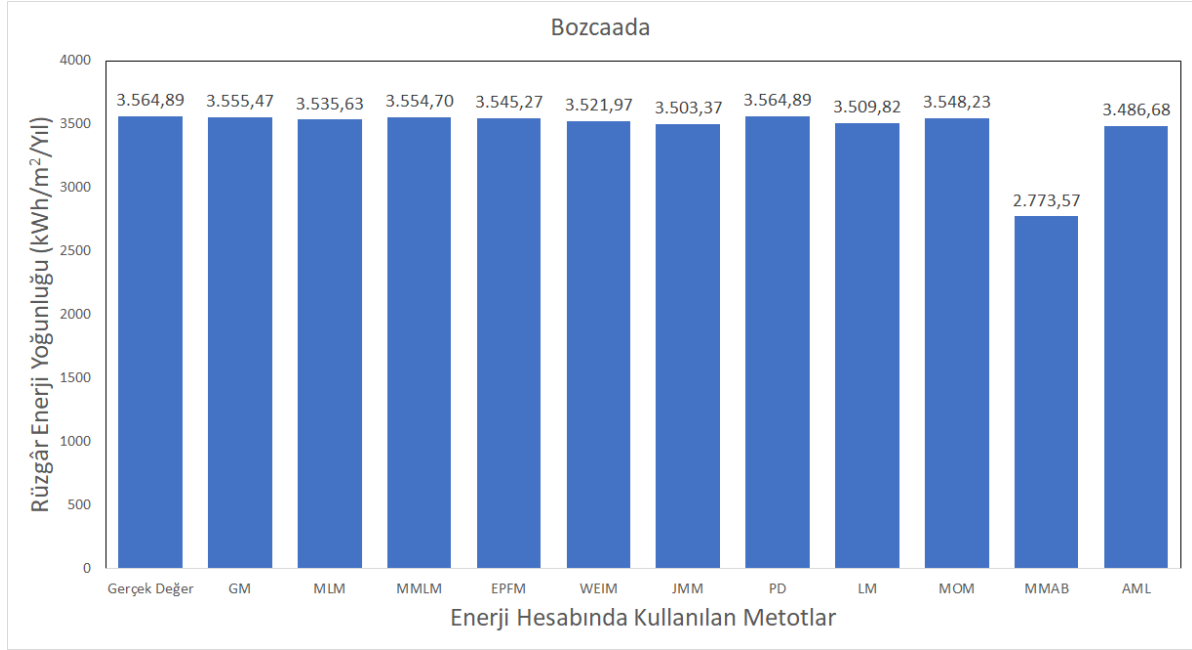
Tablo 6.7. Weibull parametre tahmin metotlarının Bozcaada bölgesi için performansı
BOZCAADA

METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
PD	13
JMM	3
AML	3
GM	1
MLM	1
LM	1
MMAB	1
MMLM	0
EPFM	0
WEIM	0
MOM	0

Bozcaada bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **PD** sağlamıştır. Ardından ise daha az uyum sağlayarak **JMM** metodu gelmiştir. Ayrıntılar için ise EK-3'te bulunan veriler incelenebilir.

6.3.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametreler kullanılarak ve Denklem (5.5)'te verilen hesaplamanın uygulanması ile her metot için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar hızı değerleri kullanılarak hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.9)'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.9)'a göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 3564.89 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **GM** metodu olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında MMab metodu düşük bir verim göstermiştir.

6.3.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen modellerin hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.8)'de verilmiştir. Bu tablonun incelenmesi sonucunda gerekli karşılaştırmalar, her bir performans metriğinin ideal değerine yakınlığı incelenerek yapılmıştır. Bu karşılaştırmaların sonucu olarak ise, bir sıralama gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.8. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Bozcaada)

Bozcaada		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,107313598	0,998903827	8,3124E-06	0,002640605
	MLM	0,082063864	0,999625141	2,8426E-06	0,008206695
	MMLM	0,079488076	0,999670035	2,50216E-06	0,002856659
	EPFM	0,078859093	0,999680356	2,4239E-06	0,005502188
	WEIM	0,286281727	0,944481906	0,000421	0,012037569
	JMM	0,082933917	0,999608989	2,96508E-06	0,017255781
	PD	0,077870763	0,999696081	2,30465E-06	6,2632E-10
	LM	0,083487281	0,999598448	3,04501E-06	0,01544731
	MOM	0,078668781	0,99968343	2,40059E-06	0,004672748
	MMab	0,208128939	0,984490781	0,000117608	0,221974055
	AML	0,1060862	0,998953123	7,93859E-06	0,021937145

Tablo (6.8)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine yakın sonuçlar alınarak bir sıralamaya koyulacak olursa, bu sıralama Tablo (6.9)'da görülebilmektedir.

Tablo 6.9. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ
1	PD	PD	PD	PD	1 PD
2	MOM	MOM	MOM	GM	2 MOM
3	EPFM	EPFM	EPFM	MMLM	3 EPFM
4	MMLM	MMLM	MMLM	MOM	4 MMLM
5	MLM	MLM	MLM	EPFM	5 MLM
6	JMM	JMM	JMM	MLM	6 JMM
7	LM	LM	LM	WEIM	7 LM
8	AML	AML	AML	LM	8 AML
9	GM	GM	GM	JMM	9 GM
10	MMab	MMab	MMab	AML	10 MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11 WEIM

Tablo (6.9)'da görülen sıralama, Tablo (6.8)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Bozcaada bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **MMLM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla MOM ve PD metotları gelmiştir.

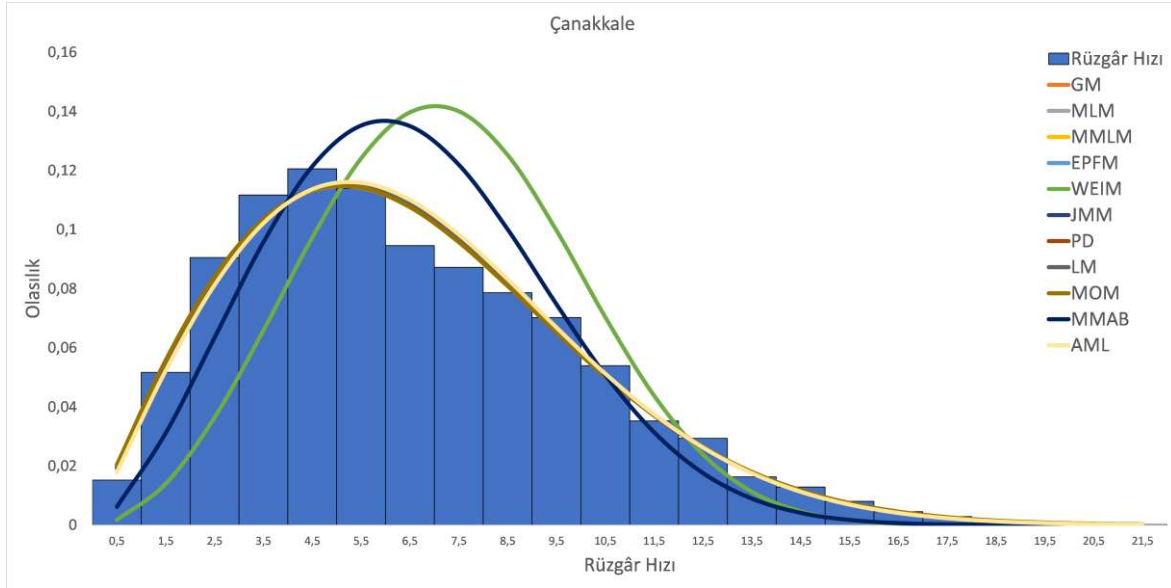
Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Bozcaada bölgesi için, **Güç Yoğunluğu Metodu (PD)** genel olarak öne çıkmaktadır.

6.4. Çanakkale

6.4.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

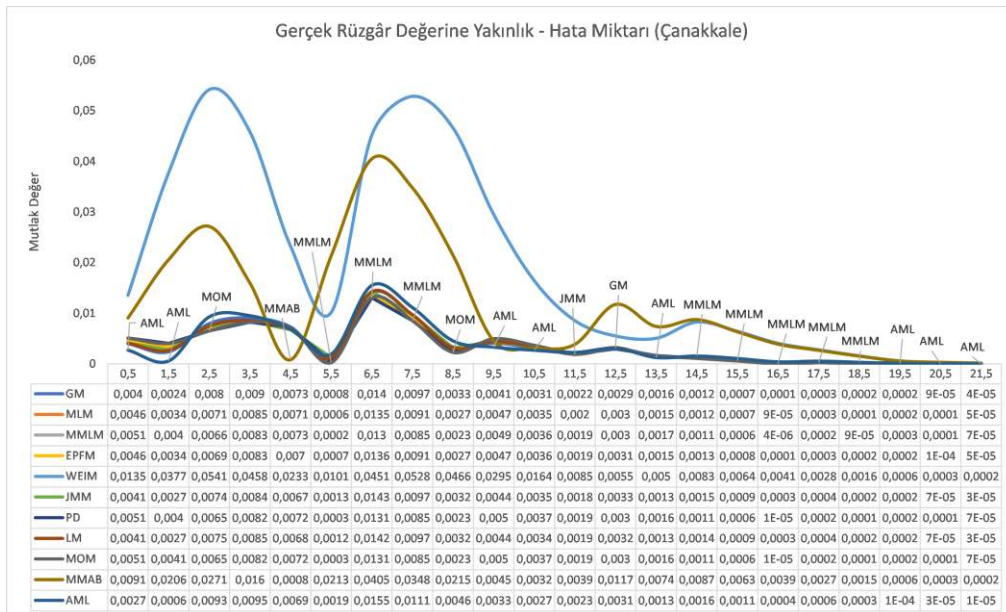
Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Çanakkale bölgesi için

gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.10)'da gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-4'te verilmiştir.



Şekil 6.10. Weibull parametre tahmin metodlarının uyumunun karşılaştırılması (Çanakkale)

Şekil (6.10)'da görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM ve eski metotlardan olan MMAB metodları, istenen uyumu sağlayamamıştır. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın ve rekabetçi sonuçlar vermiştir. Şekil (6.11) ve Tablo (6.10)'da bu grafik daha yakından incelenerek, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metodları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerleri karşılaştırılmış ve istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir.



Şekil 6.11. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.11), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.10) ise, Şekil (6.11)'daki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer in yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Tablo 6.10. Weibull parametre tahmin metodlarının Çanakkale bölgesi için performansı

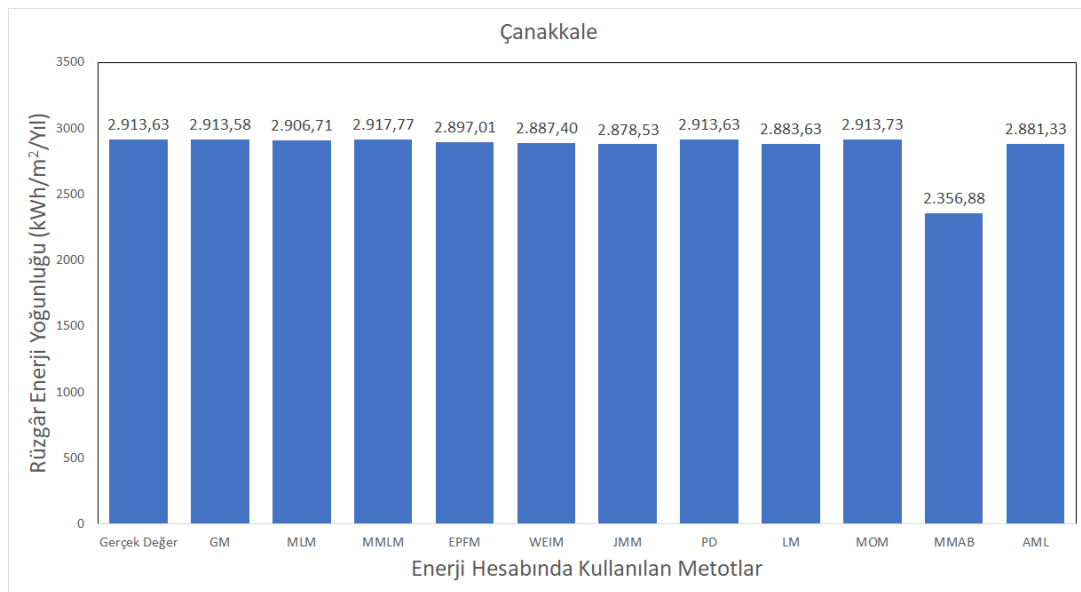
ÇANAKKALE

METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
MMLM	8
AML	8
MOM	3
GM	1
JMM	1
MMAB	1
MLM	0
EPFM	0
WEIM	0
PD	0
LM	0

Çanakkale bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **MMLM** ve **AML** metodları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-4'te bulunan veriler incelenebilir.

6.4.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Her metod için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.12)'de verilmiştir.



Şekil 6.12. Metodlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.12)'ye göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 2913.63 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **GM** ve yakın bir değerle **MOM** metotları olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında MTab metodu düşük bir verim göstermiştir.

6.4.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen modellerin hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.11)'de verilmiştir. Tablo (6.11)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.12)'de görülebilmektedir.

Tablo 6.11. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Çanakkale)

Çanakkale		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,088102	0,999506	3,46E-06	1,63E-05
	MLM	0,082655	0,999617	2,68E-06	0,002376
	MMLM	0,07985	0,999667	2,34E-06	0,001421
	EPFM	0,082353	0,999623	2,64E-06	0,005704
	WEIM	0,283363	0,947123	0,00037	0,009002
	JMM	0,085771	0,999556	3,11E-06	0,012048
	PD	0,079717	0,999669	2,32E-06	4,57E-12
	LM	0,086018	0,999551	3,15E-06	0,010296
	MOM	0,079702	0,999669	2,32E-06	3,5E-05
	MMab	0,198429	0,987285	8,91E-05	0,191084
	AML	0,097603	0,999256	5,21E-06	0,011085

Tablo (6.12)'de görülen sıralama, Tablo (6.11)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Çanakkale bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metod **MOM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla PD ve MMLM metotları gelmiştir.

Tablo 6.12. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

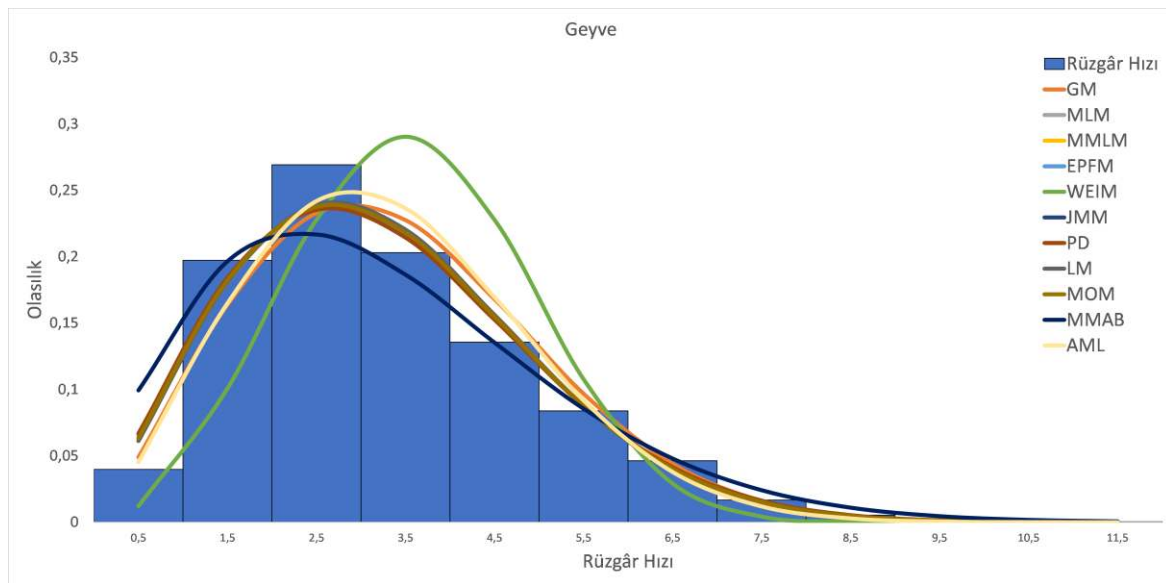
SIRALAMA	RMSE	R ²	X ²	WEE	GENEL SONUÇ
1	MOM	MOM	MOM	PD	1 MOM
2	PD	PD	PD	GM	2 PD
3	MMLM	MMLM	MMLM	MOM	3 MMLM
4	EPFM	EPFM	EPFM	MMLM	4 EPFM
5	MLM	MLM	MLM	MLM	5 MLM
6	JMM	JMM	JMM	EPFM	6 JMM
7	LM	LM	LM	WEIM	7 LM
8	GM	GM	GM	LM	8 GM
9	AML	AML	AML	AML	9 AML
10	MMab	MMab	MMab	JMM	10 MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11 WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Çanakkale bölgesi için, sağladığı uyum, güç yoğunluğu tahmini ve hata değerlerine göre daha yüksek başarımları gösteren metot **Moment Metodu (MOM)**'dur.

6.5. Geyve

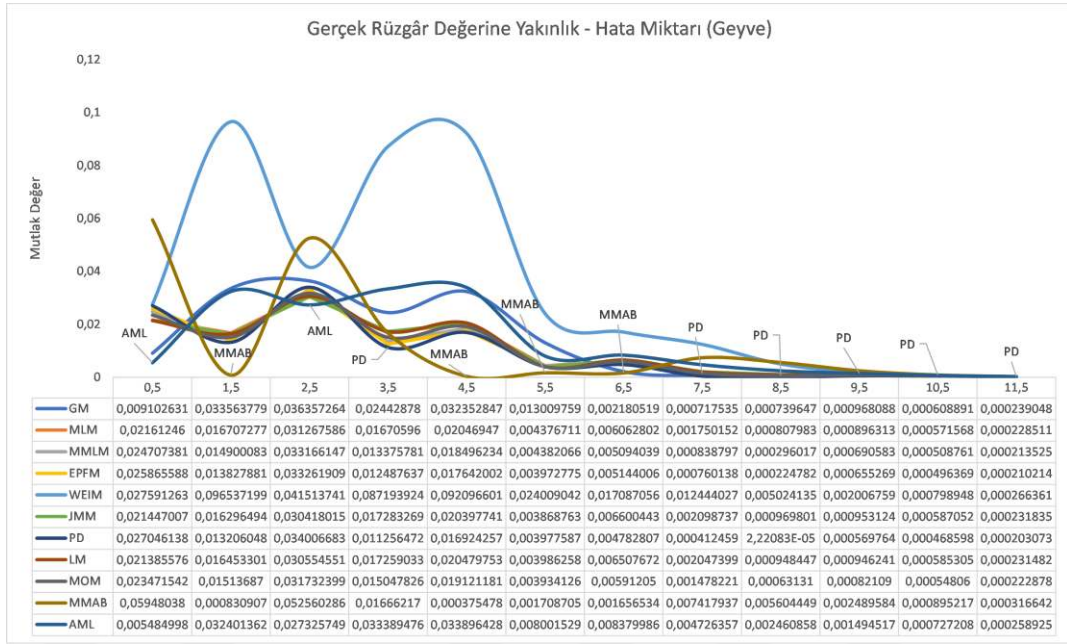
6.5.1. Metotların Gerçek Rüzgâr Verilerine Uyumu

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Geyve bölgesi için gerçek rüzgâr hızı değerlerine uyumu Şekil (6.13)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmaların ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-5'te verilmiştir.



Şekil 6.13. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Geyve)

Şekil (6.13)'de görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM istenen uyumu sağlayamamıştır. Önceki incelemelerde düşük verim gösteren MMAB metodu ise, bu bölge için daha iyi bir uyum göstermiştir. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın ve rekabetçi sonuçlar vermiştir. Detaylı incelenmesi için bu sonuçlar her bölgede olduğu gibi çalışmanın 'EKLER' başlığı altına eklenmiştir. Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgâr değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.14) ve Tablo (6.13)'de 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.13)'dan alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilir.



Şekil 6.14. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.14), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.13) ise, Şekil (6.14)'deki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Tablo 6.13. Weibull parametre tahmin metotlarının Geyve bölgesi için performansı

GEYVE

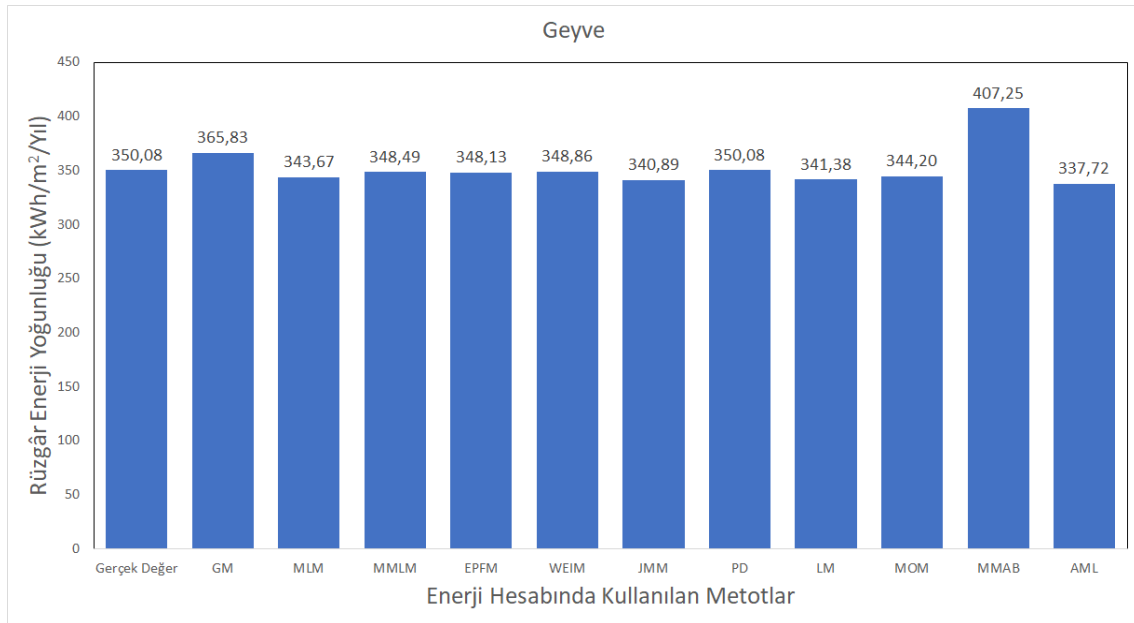
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
PD	6
MMAB	4
AML	2
GM	0
MLM	0
MMLM	0
EPFM	0
WEIM	0
JMM	0
LM	0
MOM	0

Geyve bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **PD** ve ardından **MMab** metotları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-5'te bulunan veriler incelenebilir.

6.5.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ve Denklem (5.5)'te verilen hesaplamaların uygulanması ile her metot için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.15)'de verilmiştir.

Şekil (6.15)'e göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 350.08 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **WEIM** ve yakın bir değerle **MMLM** metotları olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında MMLM metodu düşük bir verim göstermiştir.



Şekil 6.15. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

6.5.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.14)'de verilmiştir. Bu tablonun incelenmesi sonucunda gerekli karşılaştırmalar, her bir performans metriğinin ideal değerine yakınlığı incelenerek yapılmıştır. Bu karşılaştırmaların sonucu olarak ise, bir sıralama gerçekleştirilmiştir.

Tablo (6.14)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bu sıralama Tablo (6.15)'de görülebilmektedir.

Tablo 6.14. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Geyve)

		RMSE	R ²	X ²	WEE
Geyve	GM	0,168607	0,993682	2,4E-05	0,044989
	MLM	0,125393	0,998067	7,34E-06	0,018316
	MMLM	0,124471	0,998123	7,13E-06	0,004541
	EPFM	0,123141	0,998202	6,83E-06	0,00557
	WEIM	0,271091	0,957776	0,00016	0,003495
	JMM	0,124007	0,998151	7,02E-06	0,026266
	PD	0,123391	0,998188	6,88E-06	5,19E-12
	LM	0,124373	0,998129	7,11E-06	0,024854
	MOM	0,123251	0,998196	6,85E-06	0,016812
	MMab	0,166184	0,994037	2,27E-05	0,163288
	AML	0,158191	0,995104	1,86E-05	0,035303

Tablo (6.15)'de görülen sıralama, Tablo (6.14)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Geyve bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **EPFM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla MOM ve PD metotları gelmiştir.

Tablo 6.15. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ	
1	EPFM	EPFM	EPFM	PD	1	EPFM
2	MOM	MOM	MOM	WEIM	2	MOM
3	PD	PD	PD	MMLM	3	PD
4	JMM	JMM	JMM	EPFM	4	JMM
5	LM	LM	LM	MOM	5	LM
6	MMLM	MMLM	MMLM	MLM	6	MMLM
7	MLM	MLM	MLM	LM	7	MLM
8	AML	AML	AML	JMM	8	AML
9	MMab	MMab	MMab	AML	9	MMab
10	GM	GM	GM	GM	10	GM
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11	WEIM

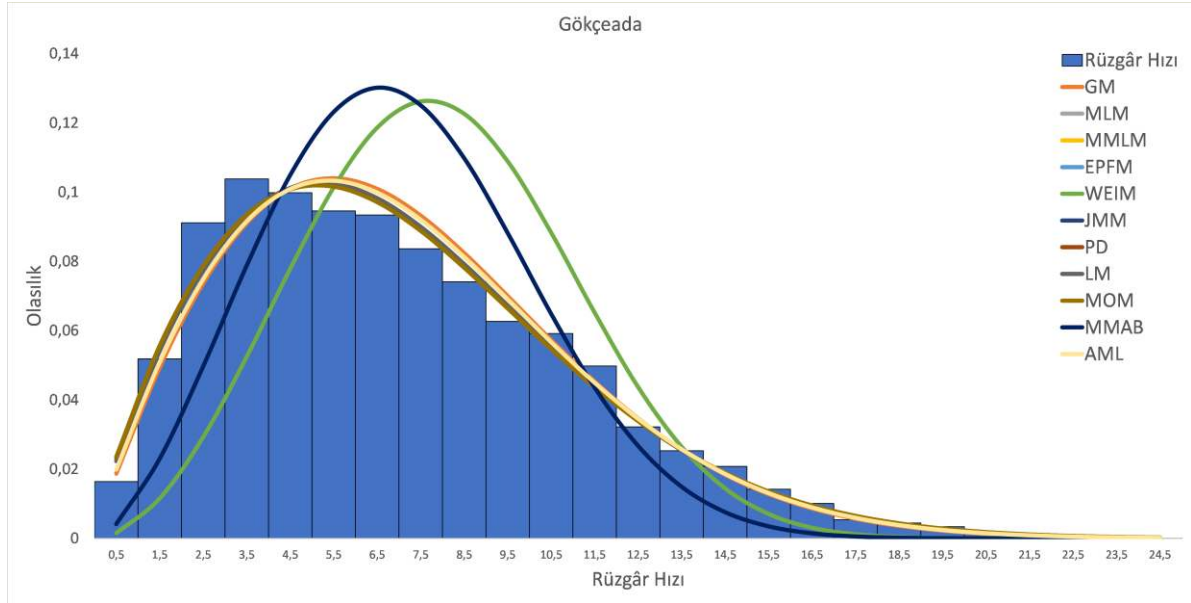
Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Geyve bölgesi için, sağladığı uyum, güç yoğunluğu tahmini ve hata değerlerine göre daha yüksek başarımlı gösteren metot **Güç Yoğunluğu (PD)** metodudur.

6.6. Gökçeada

6.6.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

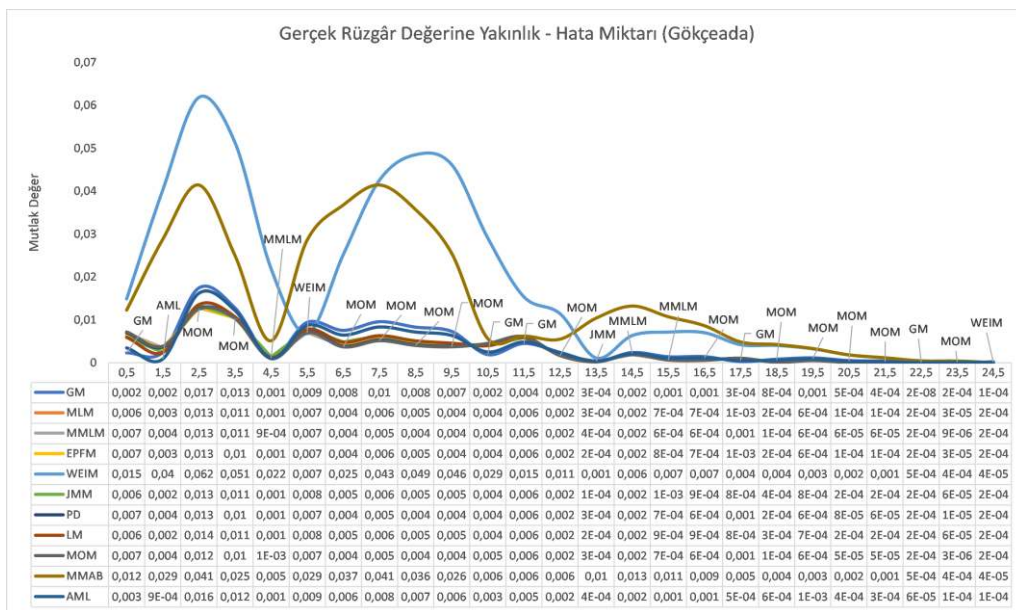
Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Gökçeada bölgesi için

gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.16)'da gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-6'da verilmiştir.



Şekil 6.16. Weibull parametre tahmin metodlarının uyumunun karşılaştırılması (Gökçeada)

Şekil (6.16)'da görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metod olan WEIM ve eski metodlardan olan MMAB, istenen uyumu sağlayamamıştır. Belirli metodlar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metodları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.17) ve Tablo (6.16)'da istenen verilere en yakın değeri veren metodlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.16)'dan alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.



Şekil 6.17. Metodların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.17), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.16) ise, Şekil (6.17)'deki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın tahmini yapan metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Gökçeada bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **MOM** ve ardından **GM** metotları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-4'te bulunan veriler incelenebilir.

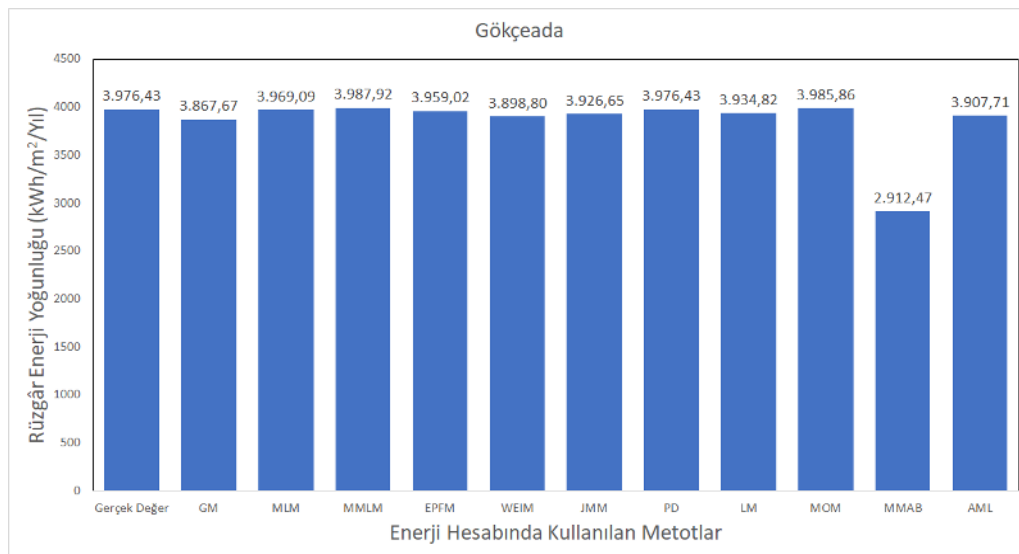
Tablo 6.16. Weibull parametre tahmin metotlarının Gökçeada bölgesi için performansı

GÖKÇEADA

METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
MOM	13
GM	5
MMLM	3
WEIM	2
JMM	1
AML	1
MLM	0
EPFM	0
PD	0
LM	0
MMAB	0

6.6.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ile her metod için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.18)'de verilmiştir.



Şekil 6.18. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.18)'e göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 3976.43 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **MLM** ve **MOM** metotları olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında MMab metodu düşük bir verim göstermiştir.

6.6.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.17)'de verilmiştir. Tablo (6.17)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.18)'de görülebilmektedir.

Tablo 6.17. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Gökçeada)

Gökçeada		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,114726	0,9985	1,12E-05	0,027353
	MLM	0,083067	0,999588	3,09E-06	0,001847
	MMLM	0,080151	0,999643	2,68E-06	0,002888
	EPFM	0,081846	0,999612	2,91E-06	0,00438
	WEIM	0,300059	0,929828	0,000526	0,019524
	JMM	0,086363	0,999518	3,61E-06	0,012519
	PD	0,079638	0,999652	2,61E-06	3,74E-13
	LM	0,086524	0,999515	3,64E-06	0,010465
	MOM	0,07853	0,999671	2,47E-06	0,002371
	MMab	0,233658	0,974198	0,000193	0,267568
	AML	0,105685	0,99892	8,09E-06	0,017282

Tablo (6.18)'de görülen sıralama, Tablo (6.17)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Gökçeada bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **MOM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla PD ve MMLM metotları gelmiştir.

Tablo 6.18. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

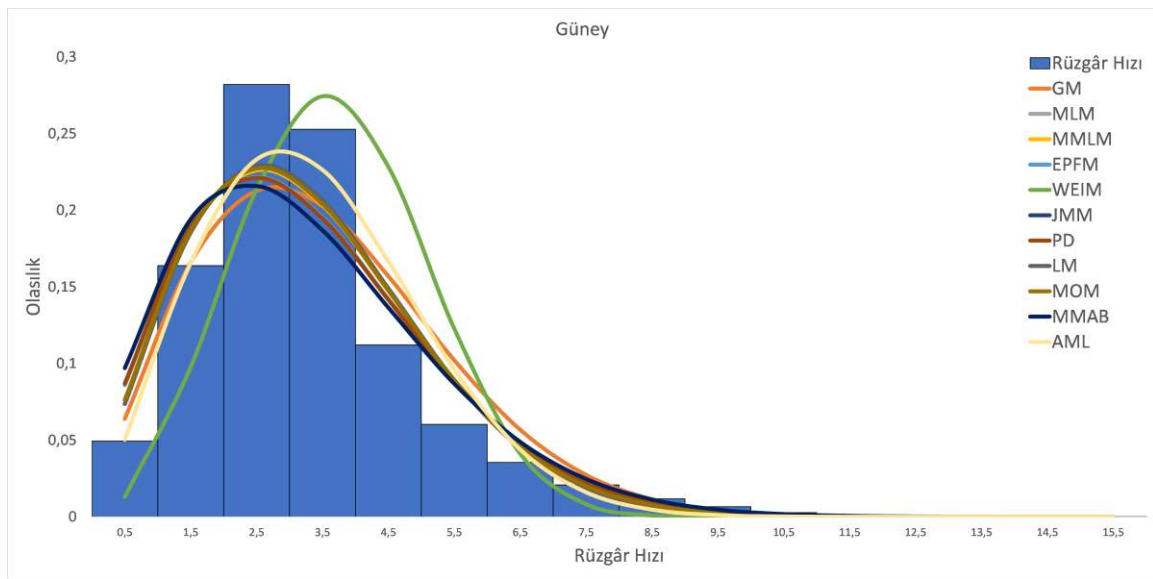
SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ
1	MOM	MOM	MOM	PD	1 MOM
2	PD	PD	PD	MLM	2 PD
3	MMLM	MMLM	MMLM	MOM	3 MMLM
4	EPFM	EPFM	EPFM	MMLM	4 EPFM
5	MLM	MLM	MLM	EPFM	5 MLM
6	JMM	JMM	JMM	LM	6 JMM
7	LM	LM	LM	JMM	7 LM
8	AML	AML	AML	AML	8 AML
9	GM	GM	GM	WEIM	9 GM
10	MMab	MMab	MMab	GM	10 MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11 WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Gökçeada bölgesi için, sağladığı uyum, güç yoğunluğu tahmini ve hata değerlerine göre daha yüksek başarımları gösteren **Moment Metodu (MOM)**'dur.

6.7. Güney

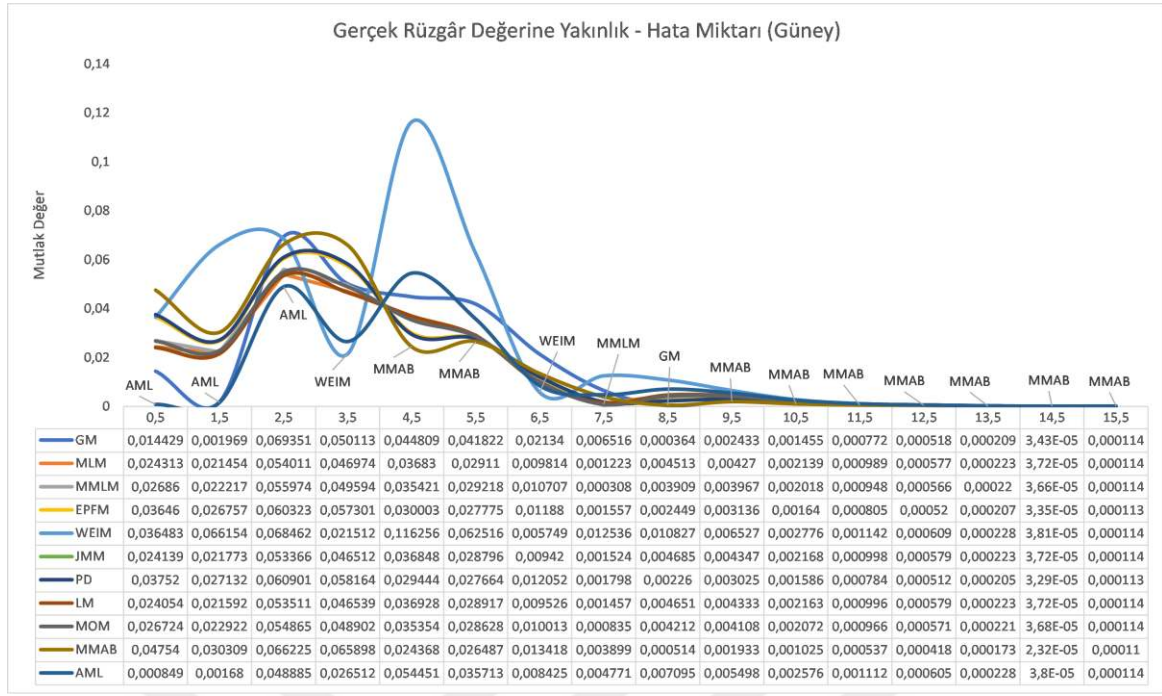
6.7.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Güney/Denizli bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.19)'da gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-7'de verilmiştir.



Şekil 6.19. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Güney)

Şekil (6.19)'da görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM istenen uyumu sağlayamamıştır. Önceki incelemelerde düşük verim gösteren MMAB metodu ise, bu bölge için daha iyi bir uyum göstermiştir. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Detaylı incelenmesi için bu sonuçlar her bölgede olduğu gibi çalışmanın 'EKLER' başlığı altına eklenmiştir. Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.20) ve Tablo (6.19)'da 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.19)'dan alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.



Şekil 6.20. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.20), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.19) ise, Şekil (6.20)'deki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer in yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

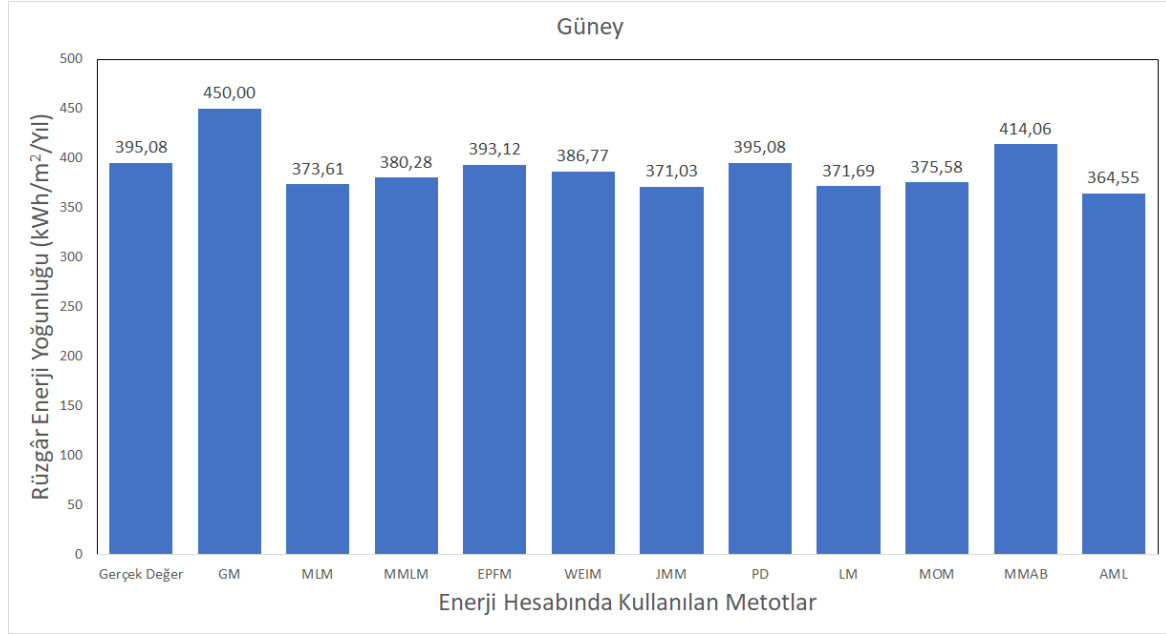
Tablo 6.19. Weibull parametre tahmin metotlarının Güney bölgesi için performansı
GÜNEY

METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
MMAB	9
AML	3
WEIM	2
GM	1
MMLM	1
MLM	0
EPFM	0
JMM	0
PD	0
LM	0
MOM	0

Güney bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **MMab** ve ardından **AML** metotları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-7'de bulunan veriler incelenebilir.

6.7.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ve Denklem (5.5)'te verilen hesaplamaların uygulanması ile her metot için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.21)'de verilmiştir.



Şekil 6.21. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.21)'e göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 395.08 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **EPFM** metodunun geldiği görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında **MMab** metodu düşük bir verim göstermiş ve bu bölgede **MMab** metodundan daha düşük bir performans ile **GM** metodu öne çıkmıştır.

6.7.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.20)'de verilmiştir. Tablo (6.20)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.21)'de görülebilmektedir.

Görüldüğü üzere, Güney bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **JMM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla **LM** ve **MLM** metotları gelmiştir.

Tablo 6.20. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Güney)

Güney		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,21216526	0,983679632	7,05317E-05	0,139019448
	MLM	0,165355358	0,993978483	2,60232E-05	0,054334688
	MMLM	0,168225104	0,99354946	2,78773E-05	0,037438991
	EPFM	0,174725381	0,992493165	3,24422E-05	0,004950014
	WEIM	0,280579699	0,950081924	0,000215731	0,021025748
	JMM	0,164190541	0,994146368	2,52976E-05	0,060850509
	PD	0,175740851	0,992317125	3,3203E-05	5,11536E-08
	LM	0,164497848	0,994102421	2,54875E-05	0,059183159
	MOM	0,166148212	0,99386216	2,65259E-05	0,049349695
	MMab	0,185756797	0,990410152	4,14444E-05	0,048061268
	AML	0,179501435	0,991638108	3,61375E-05	0,077276369

Tablo (6.21)'de görülen sıralama, Tablo (6.20)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur

Tablo 6.21. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

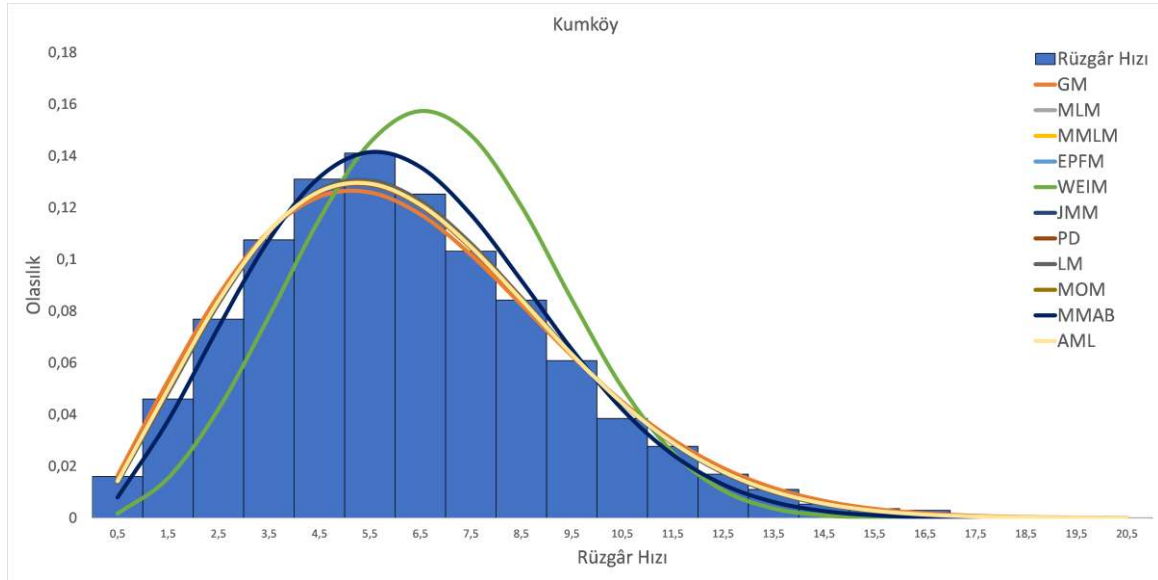
SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ
1	JMM	JMM	JMM	PD	1 JMM
2	LM	LM	LM	EPFM	2 LM
3	MLM	MLM	MLM	WEIM	3 MLM
4	MOM	MOM	MOM	MMLM	4 MOM
5	MMLM	MMLM	MMLM	MMab	5 MMLM
6	EPFM	EPFM	EPFM	MOM	6 EPFM
7	PD	PD	PD	MLM	7 PD
8	AML	AML	AML	LM	8 AML
9	MMab	MMab	MMab	JMM	9 MMab
10	GM	GM	GM	AML	10 GM
11	WEIM	WEIM	WEIM	GM	11 WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Güney bölgesi için, gerçek rüzgar verisine sağladığı uyuma göre en uygun metot MMab, güç yoğunluğu tahmini bakımından en uygun metot PD ve hata değerlerine göre en uygun metot JMM metotları olarak belirlenmiştir. Bu bölge için genel sıralama içerisinde öne çıkan bir metot seçilecek olursa **Güç Yoğunluğu Metodu (PD)** tercih edilebilir. Bu metodun seçilmesinin nedeni ise rüzgar enerji yoğunluğu tespitinde oldukça başarılı olması, hata değerlerinin ve uyumunun ise kabul edilebilir değerlerde olmasıdır.

6.8. Kumköy

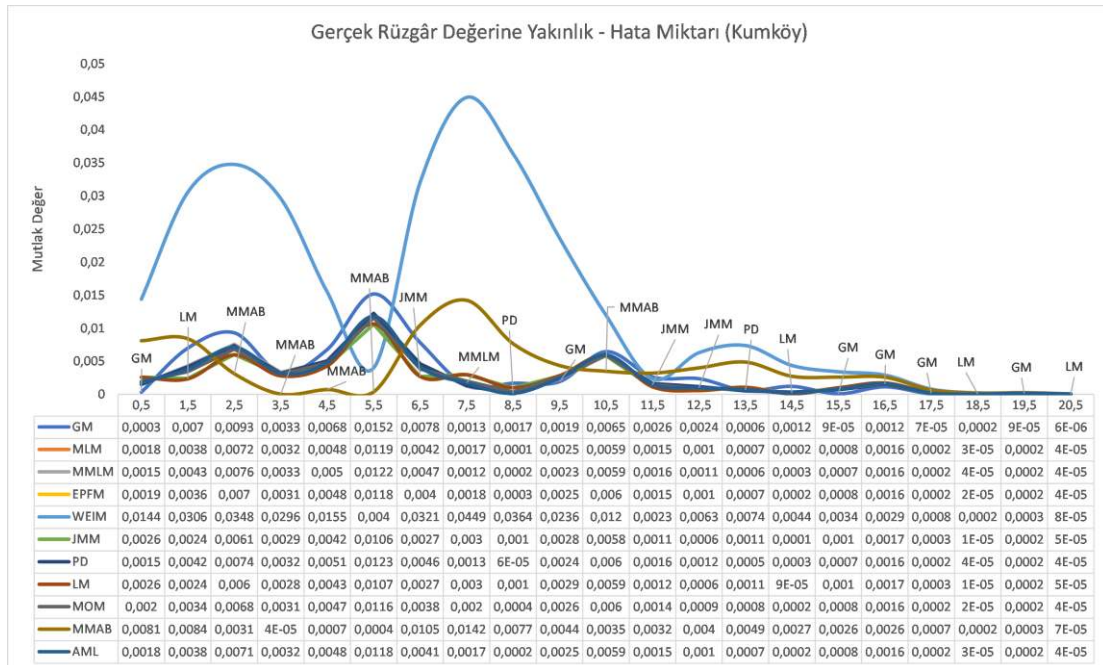
6.8.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Kumköy/İstanbul bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.22)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-8'de verilmiştir.



Şekil 6.22. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Kumköy)

Şekil (6.23), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.



Şekil 6.23. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.22)'de görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM istenen uyumu sağlayamamıştır. Önceki incelemelerde düşük verim

gösteren MTab metodu ise, bu bölge için daha iyi bir uyum göstermiştir. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir

Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.23) ve Tablo (6.22)'de 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.22)'den alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.

Tablo (6.22), Şekil (6.23)'deki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değerin yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Tablo 6.22. Weibull parametre tahmin metotlarının Kumköy bölgesi için performansı

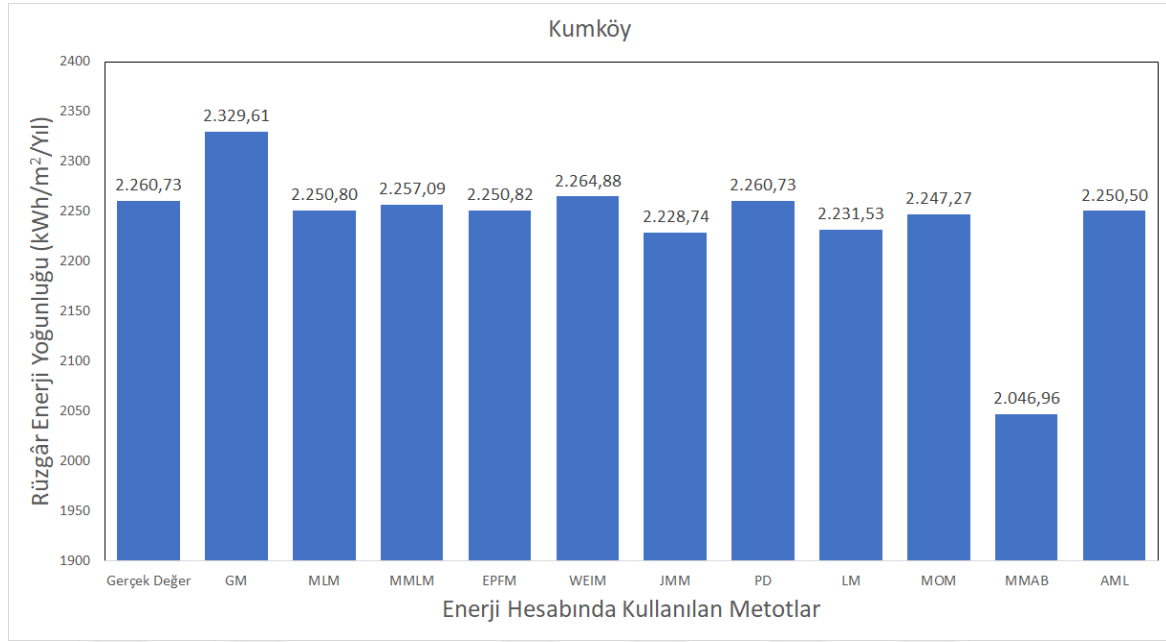
KUMKÖY	
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
GM	7
MMAB	5
JMM	3
LM	3
PD	2
MMLM	1
MLM	0
EPFM	0
WEIM	0
MOM	0
AML	0

Kumköy bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **GM** ve **MMab** metotları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-8'te bulunan veriler incelenebilir.

6.8.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ve Denklem (5.5)'te verilen hesaplamanın uygulanması ile her metod için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.24)'de verilmiştir.

Şekil (6.24)'ye göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 2260.73 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **MMLM** ve yakın bir değerle **WEIM** metotları olduğu görülmektedir. Ayrıca, önceki incelemelerde olduğu gibi, enerji yoğunluğu hesabında MTab metodu düşük bir verim göstermiştir.



Şekil 6.24. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

6.8.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.23)'de verilmiştir. Tablo (6.23)'de görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.24)'de görülebilmektedir.

Tablo 6.23. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Kumköy)

		RMSE	R ²	X ²	WEE
Kumköy	GM	0,097702	0,999309	4,76E-06	0,030466
	MLM	0,077092	0,999732	1,85E-06	0,004391
	MMLM	0,079143	0,999702	2,05E-06	0,001612
	EPFM	0,07683	0,999736	1,82E-06	0,004383
	WEIM	0,248815	0,970919	0,0002	0,001836
	JMM	0,072438	0,999791	1,44E-06	0,014149
	PD	0,079441	0,999698	2,08E-06	2,26E-08
	LM	0,073045	0,999784	1,49E-06	0,012917
	MOM	0,07597	0,999747	1,74E-06	0,005953
	MMab	0,121305	0,998357	1,13E-05	0,094558
	AML	0,076949	0,999734	1,83E-06	0,004527

Tablo (6.24)'de görülen sıralama, Tablo (6.23)'deki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Kumköy bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **JMM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla LM ve MOM metotları gelmiştir.

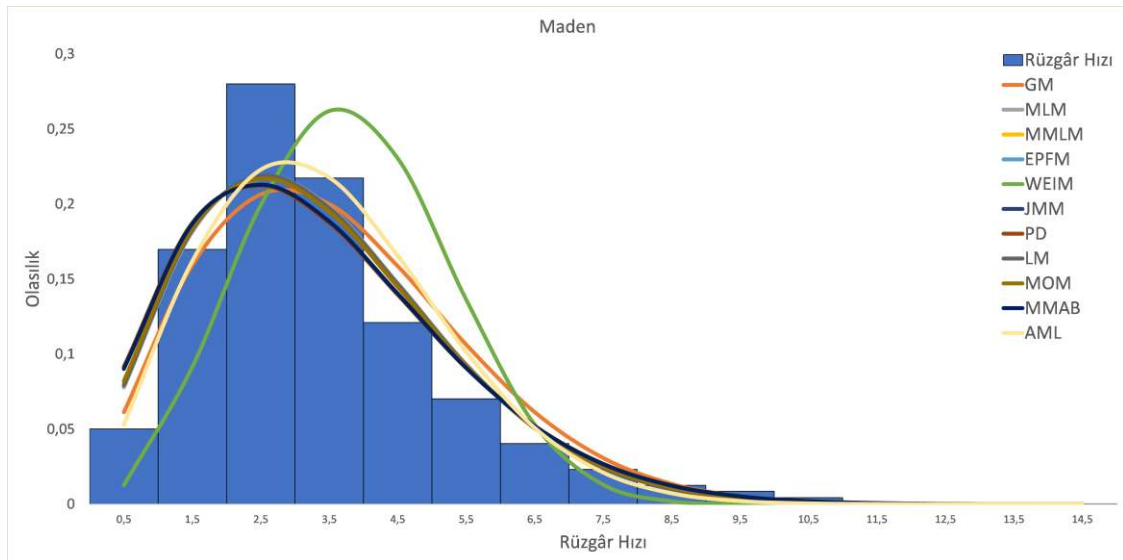
Tablo 6.24. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ
1	JMM	JMM	JMM	PD	1 JMM
2	LM	LM	LM	MMLM	2 LM
3	MOM	MOM	MOM	WEIM	3 MOM
4	EPFM	EPFM	EPFM	EPFM	4 EPFM
5	AML	AML	AML	MLM	5 AML
6	MLM	MLM	MLM	AML	6 MLM
7	MMLM	MMLM	MMLM	MOM	7 MMLM
8	PD	PD	PD	LM	8 PD
9	GM	GM	GM	JMM	9 GM
10	MMab	MMab	MMab	GM	10 MMab
11	WEIM	WEIM	WEIM	MMab	11 WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Kumköy bölgesi için, gerçek rüzgar verisine sağladığı uyuma göre en uygun metot GM, güç yoğunluğu tahmini bakımından en uygun metot PD ve hata değerlerine göre en uygun metot JMM metotları olarak belirlenmiştir. Bu bölge için genel sıralama içerisinde öne çıkan bir metot seçilecek olursa **Lysen Metodu (LM)** tercih edilebilir. Bu metodun seçilmesinin nedeni ise diğerleri ile genel bir karşılaştırma yapıldığında hata değerlerinin ve rüzgar verisine uyumunun kabul edilebilir değerlerde olması ve rüzgar enerji yoğunluğu tespitinde yeterli olmasıdır.

6.9. Maden

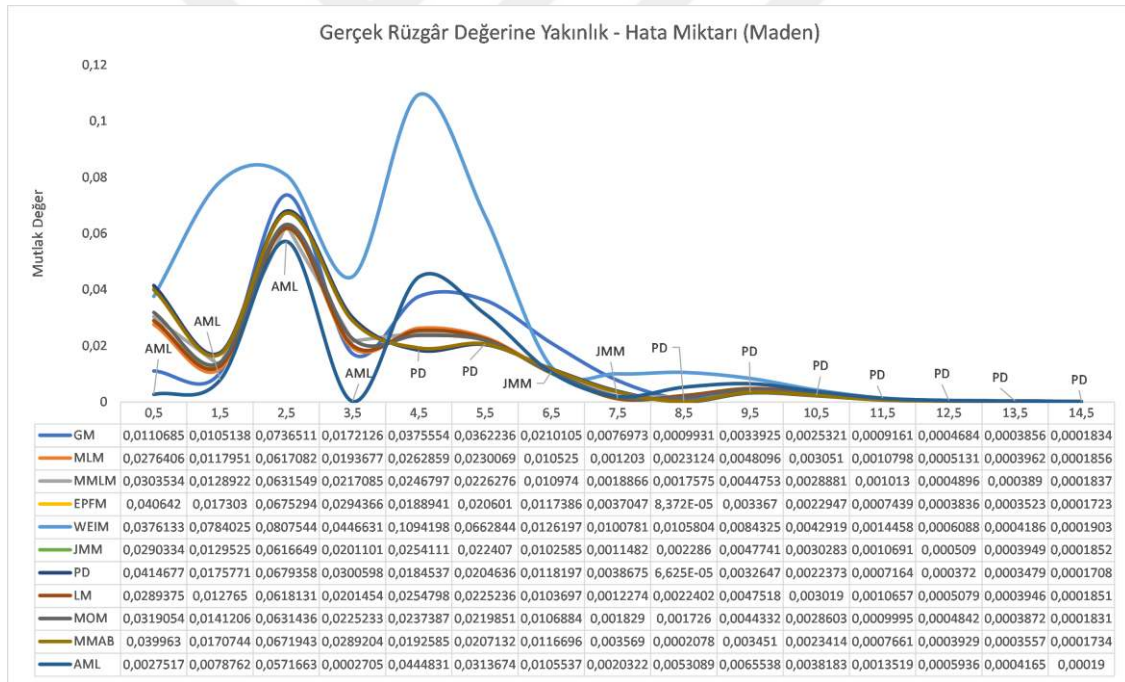
6.9.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

**Şekil 6.25.** Weibull parametre tahmin metodlarının uyumunun karşılaştırılması (Maden)

Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Maden/Elazığ bölgesi

için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.25)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-9'da verilmiştir.

Şekil (6.25)'de görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM istenen uyumu sağlayamamıştır. Önceki incelemelerde düşük verim gösteren MMab metodu ise, bu bölge için daha iyi bir uyum göstermiştir. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Ancak bu karşılaştırmada diğerlerinden farklı olarak metotlar arasındaki değişiklikler daha belirgindir. Detaylı incelenmesi için bu sonuçlar her bölgede olduğu gibi çalışmanın 'EKLER' başlığı altına eklenmiştir. Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.26) ve Tablo (6.25)'de 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.25)'den alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilir.



Şekil 6.26. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Şekil (6.26), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.

Tablo (6.25) ise, Şekil (6.26)'daki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değerin yüksekliği bir metot için istenen bir durumdur.

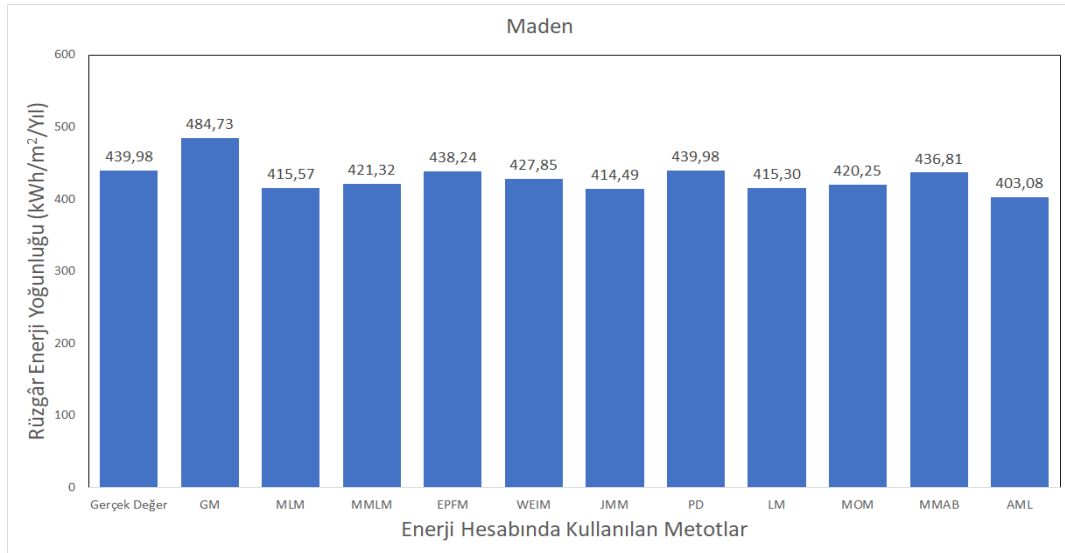
Tablo 6.25. Weibull parametre tahmin metotlarının Maden bölgesi için performansı

MADEN	
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
PD	9
AML	4
JMM	2
GM	0
MLM	0
MMLM	0
EPFM	0
WEIM	0
LM	0
MOM	0
MMAB	0

Maden bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **PD** metodu ve ardından **AML** metodu sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-4’te bulunan veriler incelenebilir.

6.9.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ve Denklem (5.5)’te verilen hesaplamanın uygulanması ile her metot için hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.27)’de verilmiştir.



Şekil 6.27. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.27)’ye göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 439.98 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **EPFM** ve yakın bir değerle **MMab** metotları olduğu görülmektedir. Ancak, bu bölgede enerji yoğunluğu hesabında önceki incelemelerin tersine MMab metodunun verimi diğer metotlara göre daha yüksektir.

6.9.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.26)'da verilmiştir. Tablo (6.26)'da görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.27)'de görülebilmektedir.

Tablo 6.26. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Maden)

Maden		RMSE	R ²	X ²	WEE
	GM	0,206547	0,984829	6,48E-05	0,101718
	MLM	0,153388	0,995386	1,97E-05	0,055472
	MMLM	0,155057	0,995182	2,06E-05	0,042396
	EPFM	0,16154	0,994324	2,43E-05	0,003955
	WEIM	0,290763	0,940423	0,000255	0,027553
	JMM	0,152434	0,9955	1,92E-05	0,057924
	PD	0,162321	0,994213	2,47E-05	4,16E-12
	LM	0,152815	0,995454	1,94E-05	0,056078
	MOM	0,154284	0,995277	2,02E-05	0,044837
	MMab	0,160908	0,994412	2,39E-05	0,007194
	AML	0,176966	0,991825	3,49E-05	0,083853

Tablo (6.27)'de görülen sıralama, Tablo (6.26)'daki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Maden bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **JMM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla LM ve MLM metotları gelmiştir.

Tablo 6.27. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

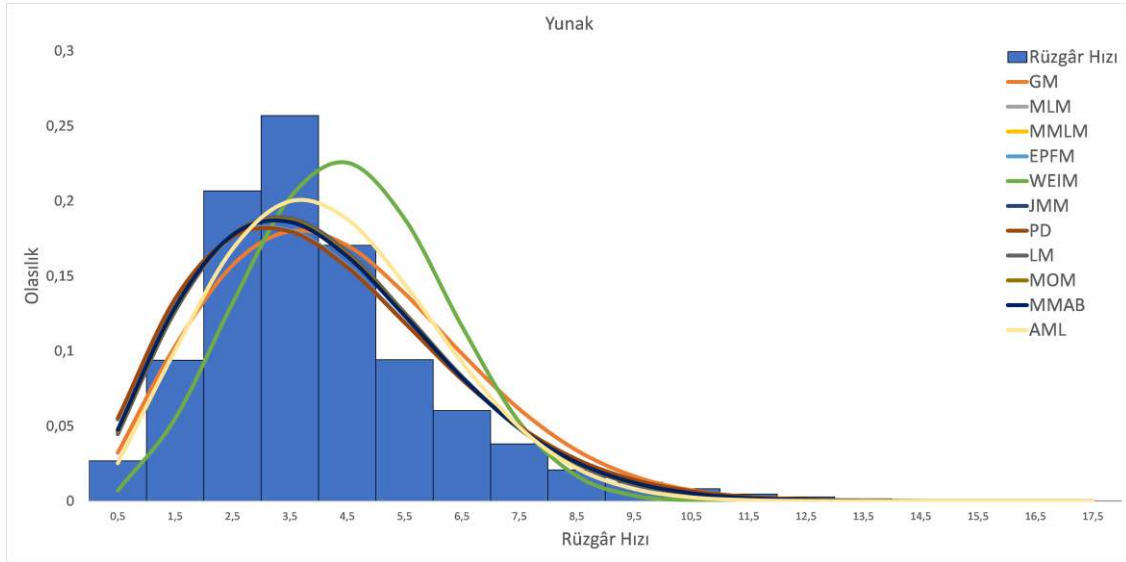
SIRALAMA	RMSE	R ²	X ²	WEE	GENEL SONUÇ	
1	JMM	JMM	JMM	PD	1	JMM
2	LM	LM	LM	EPFM	2	LM
3	MLM	MLM	MLM	MMab	3	MLM
4	MOM	MOM	MOM	WEIM	4	MOM
5	MMLM	MMLM	MMLM	MMLM	5	MMLM
6	MMab	MMab	MMab	MOM	6	MMab
7	EPFM	EPFM	EPFM	MLM	7	EPFM
8	PD	PD	PD	LM	8	PD
9	AML	AML	AML	JMM	9	AML
10	GM	GM	GM	AML	10	GM
11	WEIM	WEIM	WEIM	GM	11	WEIM

Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Maden bölgesi için, sağladığı uyum ve güç yoğunluğu tahmini bakımından daha yüksek başarımlı gösteren metot **Güç Yoğunluğu Metodu (PD)**'dur. Ancak hata değerlerinde belirli metotların gerisinde kaldığı göz ardı edilmemelidir.

6.10. Yunak

6.10.1. Metotların Gerçek Rüzgar Verilerine Uyumu

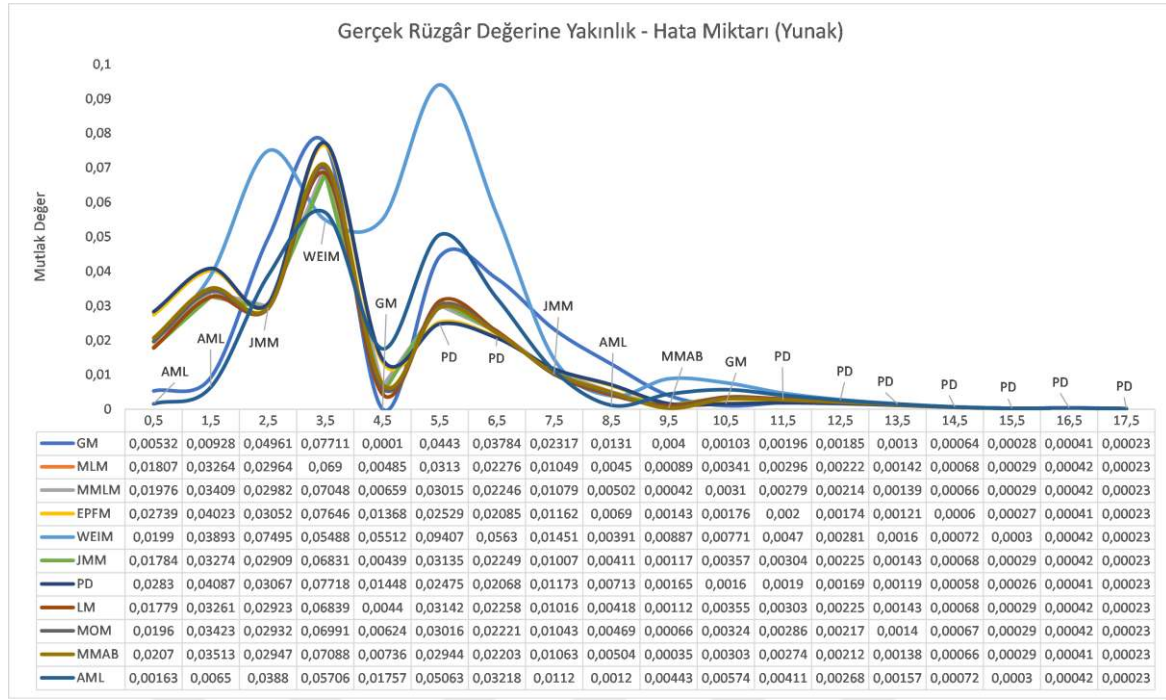
Analiz edilen 11 metot tarafından tahmini yapılan şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının Yunak/Konya bölgesi için gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu Şekil (6.28)'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın ve k ve c değerlerinin yıllık hesaplarının grafiği daha detaylı bir şekilde EK-10'da verilmiştir.



Şekil 6.28. Weibull parametre tahmin metotlarının uyumunun karşılaştırılması (Yunak)

Şekil (6.29)'da görüldüğü üzere, önceki incelemelere benzer şekilde, yeni önerilen bir metot olan WEIM istenen uyumu sağlayamamıştır. Önceki incelemelerde düşük verim gösteren MMAB metodu ise, bu bölge için daha iyi bir uyum göstermiştir. Belirli metotlar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Detaylı incelenmesi için bu sonuçlar her bölgede olduğu gibi çalışmanın 'EKLER' başlığı altına eklenmiştir. Grafiğin daha yakından incelenmesi ile, gerçek rüzgar değerlerine karşılık gelen Weibull parametre tahmin metotları kullanılarak oluşturulan dağılımların değerlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan Şekil (6.29) ve Tablo (6.28)'de 11 metodun arasından istenen verilere en yakın değeri veren metotlar belirtilmiştir. Bunlar incelenerek, Şekil (6.28)'dan alınan sonuçlar hakkında daha açık bir yorum yapılabilmektedir.

Şekil (6.29), her bir rüzgar hızı sınıfı için merkezdeki gerçek rüzgar hızı değerinden en az farkı olan metodu grafik üzerinde göstermektedir.



Şekil 6.29. Metotların rüzgar hızı sınıflarında gerçek rüzgar hızı değerlerine yakınlığı

Tablo (6.28) ise, Şekil (6.29)'daki her rüzgar sınıfı için merkez rüzgar değerine en yakın metodun görülme miktarını belirtmektedir. Bu değer in yüksekliği bir metod için istenen bir durumdur.

Tablo 6.28. Weibull parametre tahmin metotlarının Yunak bölgesi için performansı
YUNAK

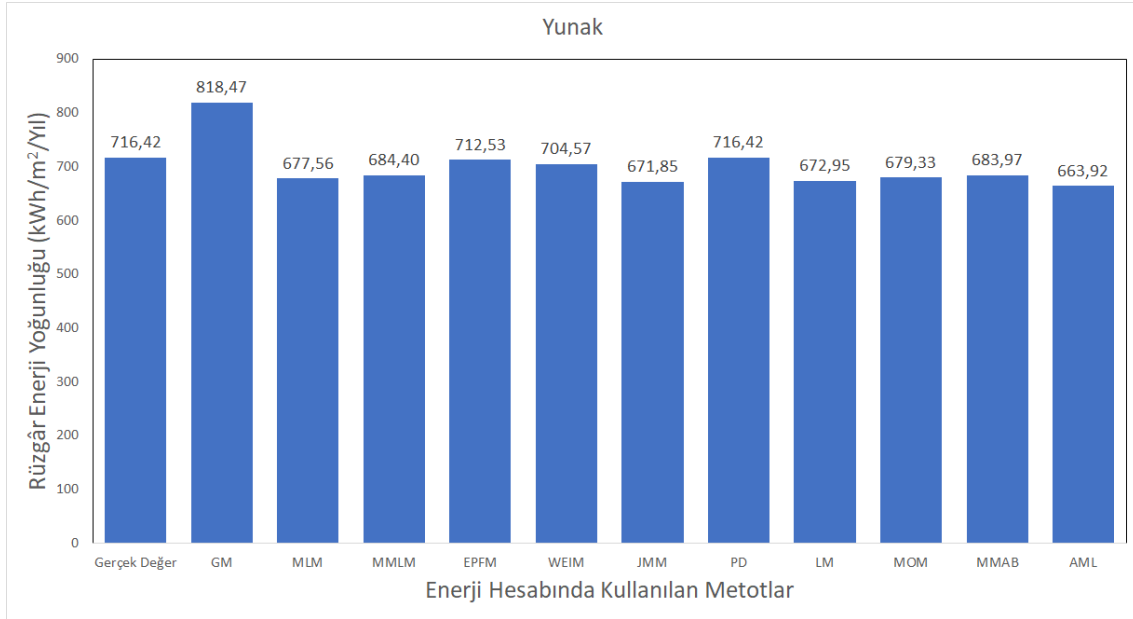
METOT	En Yakın Değere Sahip Olduğu Nokta Sayısı
PD	9
AML	3
GM	2
JMM	2
WEIM	1
MMAB	1
MLM	0
MMLM	0
EPFM	0
LM	0
MOM	0

Yunak bölgesi için uyumun incelenmesi sonucu, en iyi uyumu **PD** ve ardından **AML** metotları sağlamıştır. Ayrıntılar için ise EK-10'da bulunan veriler incelenebilir.

6.10.2. Rüzgar Enerji Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Weibull parametre tahmin metotları tarafından tahmini yapılan parametrelerin kullanılması ve Denklem (5.5)'te verilen hesaplamaların uygulanması ile her metod için

hesaplanan rüzgar enerji yoğunluğunun gerçek rüzgar enerji yoğunluğu değeri ile karşılaştırılması Şekil (6.30)'da verilmiştir.



Şekil 6.30. Metotlarının rüzgar enerji yoğunluğunu hesaplamadaki verimleri

Şekil (6.12)'ye göre, gerçek rüzgar enerji yoğunluğu olan 716.42 kWh/m²/yıl değerine en yakın tahmini yapan metodun **PD** metodu ve ardından ise **EPFM** metodu olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu incelemede MMab metodunun tahmin veriminin düşük olmadığı, ancak GM metodunun düşük bir verim gösterdiği görülmektedir.

6.10.3. Hata Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

Tablo 6.29. Weibull parametre tahmin metotlarının hata değerleri (Yunak)

		RMSE	R ²	X ²	WEE
Yunak	GM	0,228642	0,978439	0,000112	0,142438
	MLM	0,167944	0,993724	3,25E-05	0,054241
	MMLM	0,169494	0,993489	3,37E-05	0,044696
	EPFM	0,177241	0,992214	4,03E-05	0,005436
	WEIM	0,279751	0,951678	0,00025	0,016546
	JMM	0,166449	0,993944	3,13E-05	0,062216
	PD	0,178386	0,992011	4,13E-05	1,45E-09
	LM	0,166755	0,993899	3,16E-05	0,060678
	MOM	0,168194	0,993686	3,27E-05	0,051772
	MMab	0,169347	0,993511	3,36E-05	0,045292
	AML	0,193087	0,989034	5,68E-05	0,073276

Analiz edilen metotların hata değerleri karşılaştırılmış ve alınan sonuçlar Tablo (6.29)'da verilmiştir. Tablo (6.29)'da görülen değerler incelenerek, istenen hata değerlerine ait sonuçlar alınması yoluyla yapılan bir sıralama Tablo (6.30)'da görülebilmektedir.

Tablo 6.30. Alınan sonuçların performanslara göre sıralanması

SIRALAMA	RMSE	R2	X2	WEE	GENEL SONUÇ
1	JMM	JMM	JMM	PD	1 JMM
2	LM	LM	LM	EPFM	2 LM
3	MLM	MLM	MLM	WEIM	3 MLM
4	MOM	MOM	MOM	MMLM	4 MOM
5	MMab	MMab	MMab	MMab	5 MMab
6	MMLM	MMLM	MMLM	MOM	6 MMLM
7	EPFM	EPFM	EPFM	MLM	7 EPFM
8	PD	PD	PD	LM	8 PD
9	AML	AML	AML	JMM	9 AML
10	GM	GM	GM	AML	10 GM
11	WEIM	WEIM	WEIM	GM	11 WEIM

Tablo (6.30)'da görülen sıralama, Tablo (6.29)'daki değerlerin hata değerlerine göre sıralanması sonucu oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere, Yunak bölgesi için istenen değerlere en yakın hata değerlerine sahip metot **JMM** olmuştur, bunu takiben sırasıyla LM ve MLM metotları gelmiştir.

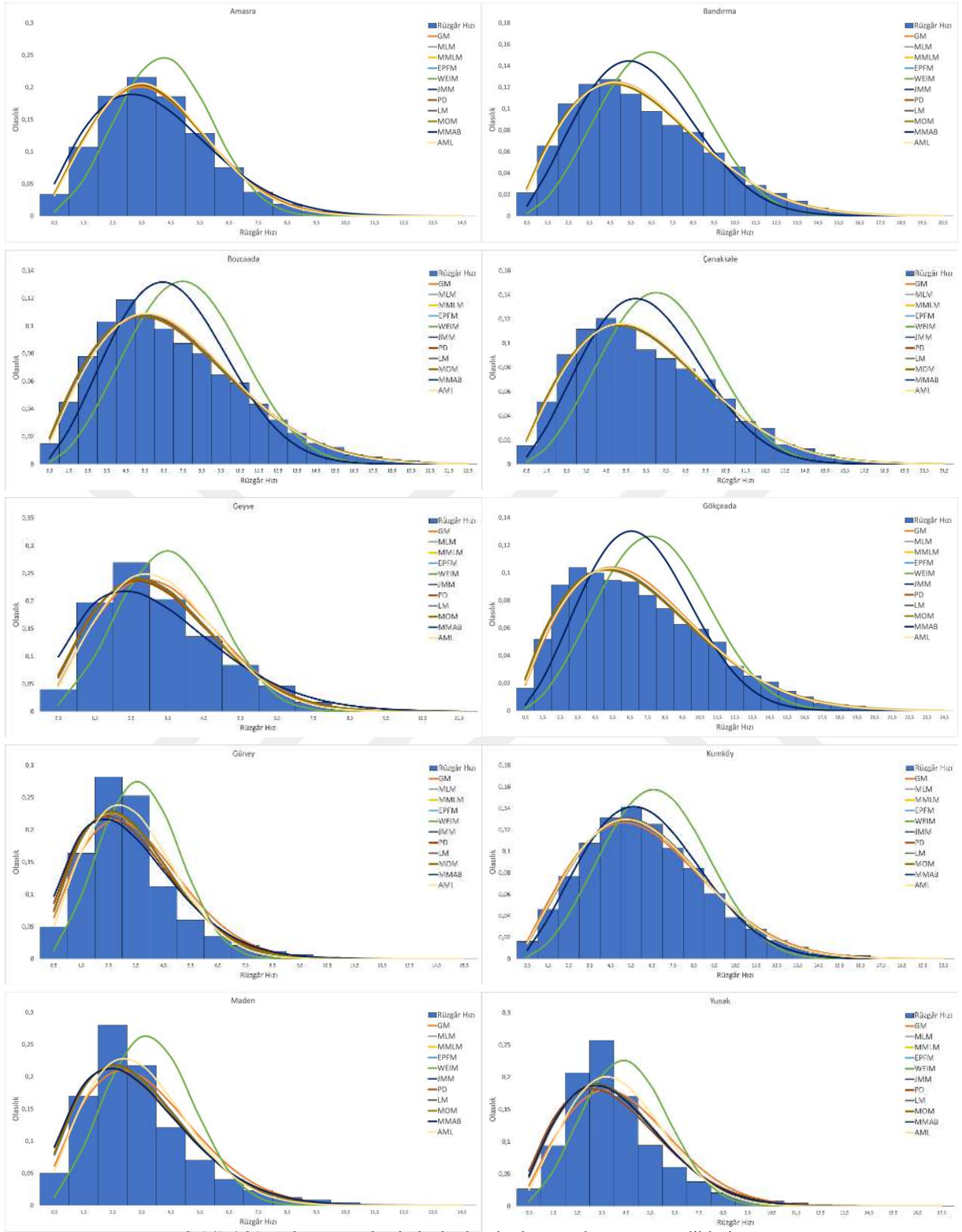
Yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmelere göre Yunak bölgesi için, sağladığı uyum ve güç yoğunluğu tahmini bakımından daha yüksek başarımlı gösteren metot **Güç Yoğunluğu Metodu (PD)**'dur. Ancak bu metodun hata değerlerinde belirli metotların gerisinde kaldığı göz ardı edilmemelidir.

6.11. Genel Karşılaştırma

Tüm bölgelerin karşılaştırılması çalışma içerisinde yapılan karşılaştırma sırası takip edilerek gösterilmiştir;

1. Metotların rüzgar verisine sağladıkları uyum,
2. Metotların rüzgar enerji yoğunluğu tespitinde gösterdikleri verim ve
3. Metotların hata değerleri

Bu genel karşılaştırma, Şekil (6.31)'de görülebilmektedir.



Şekil 6.31. Çalışma yapılan bölgelerde tahmin metotlarının gösterdikleri uyum

Şekil (6.31) incelenerek, metotların genel olarak gerçek rüzgar verilerine en yakın uyumu sağladığı bölgenin Kumkoy bölgesi olduğu söylenebilir. Burada, gerçek rüzgar değerlerine en yakın sonuçları veren metotlar sırasıyla **Grafik (GM)**, **Justus (JMM)** ve **Lysen (LM)** metotlarıdır.



Şekil 6.32. Bölgelerin rüzgâr enerji yoğunluğu ve metotların tahmini

Tablo 6.31. Çalışma yapılan bölgelerde metot bazında hata değerleri

GM					MLM				
	RMSE	R ²	χ ²	WEE	RMSE	R ²	χ ²	WEE	
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	0,07995	0,99969	1,4E-06	0,00677	
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	0,07915	0,99967	2,1E-06	0,00079	
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	0,08206	0,99963	2,8E-06	0,00821	
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	0,08266	0,99962	2,7E-06	0,00238	
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	0,12539	0,99807	7,3E-06	0,01832	
Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274	0,08307	0,99959	3,1E-06	0,00185	
Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390	0,16536	0,99398	2,6E-05	0,05433	
Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305	0,07709	0,99973	1,8E-06	0,00439	
Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017	0,15339	0,99539	2,0E-05	0,05547	
Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424	0,16794	0,99372	3,2E-05	0,05424	
MMLM					EPFM				
	RMSE	R ²	χ ²	WEE	RMSE	R ²	χ ²	WEE	
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	0,07995	0,99969	1,4E-06	0,00677	
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	0,07915	0,99967	2,1E-06	0,00079	
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	0,08206	0,99963	2,8E-06	0,00821	
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	0,08266	0,99962	2,7E-06	0,00238	
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	0,12539	0,99807	7,3E-06	0,01832	
Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274	0,08307	0,99959	3,1E-06	0,00185	
Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390	0,16536	0,99398	2,6E-05	0,05433	
Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305	0,07709	0,99973	1,8E-06	0,00439	
Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017	0,15339	0,99539	2,0E-05	0,05547	
Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424	0,16794	0,99372	3,2E-05	0,05424	
WEIM					JMM				
	RMSE	R ²	χ ²	WEE	RMSE	R ²	χ ²	WEE	
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	0,07995	0,99969	1,4E-06	0,00677	
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	0,07915	0,99967	2,1E-06	0,00079	
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	0,08206	0,99963	2,8E-06	0,00821	
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	0,08266	0,99962	2,7E-06	0,00238	
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	0,12539	0,99807	7,3E-06	0,01832	
Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274	0,08307	0,99959	3,1E-06	0,00185	
Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390	0,16536	0,99398	2,6E-05	0,05433	
Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305	0,07709	0,99973	1,8E-06	0,00439	
Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017	0,15339	0,99539	2,0E-05	0,05547	
Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424	0,16794	0,99372	3,2E-05	0,05424	
PD					LM				
	RMSE	R ²	χ ²	WEE	RMSE	R ²	χ ²	WEE	
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	0,07995	0,99969	1,4E-06	0,00677	
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	0,07915	0,99967	2,1E-06	0,00079	
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	0,08206	0,99963	2,8E-06	0,00821	
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	0,08266	0,99962	2,7E-06	0,00238	
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	0,12539	0,99807	7,3E-06	0,01832	
Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274	0,08307	0,99959	3,1E-06	0,00185	
Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390	0,16536	0,99398	2,6E-05	0,05433	
Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305	0,07709	0,99973	1,8E-06	0,00439	
Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017	0,15339	0,99539	2,0E-05	0,05547	
Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424	0,16794	0,99372	3,2E-05	0,05424	
MOM					MMab				
	RMSE	R ²	χ ²	WEE	RMSE	R ²	χ ²	WEE	
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	0,07995	0,99969	1,4E-06	0,00677	
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	0,07915	0,99967	2,1E-06	0,00079	
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	0,08206	0,99963	2,8E-06	0,00821	
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	0,08266	0,99962	2,7E-06	0,00238	
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	0,12539	0,99807	7,3E-06	0,01832	
Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274	0,08307	0,99959	3,1E-06	0,00185	
Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390	0,16536	0,99398	2,6E-05	0,05433	
Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305	0,07709	0,99973	1,8E-06	0,00439	
Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017	0,15339	0,99539	2,0E-05	0,05547	
Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424	0,16794	0,99372	3,2E-05	0,05424	
AML									
	RMSE	R ²	χ ²	WEE		RMSE	R ²	χ ²	WEE
Amasra	0,10215	0,99918	3,7E-06	0,0362	Gökçeada	0,11473	0,99850	1,1E-05	0,0274
Bandırma	0,09259	0,99938	3,9E-06	0,0195	Güney	0,21217	0,98368	7,1E-05	0,1390
Bozcaada	0,10731	0,99890	8,3E-06	0,0026	Kumköy	0,09770	0,99931	4,8E-06	0,0305
Çanakkale	0,08810	0,99951	3,5E-06	1,6E-05	Maden	0,20655	0,98483	6,5E-05	0,1017
Geyve	0,16861	0,99368	2,4E-05	0,0450	Yunak	0,22864	0,97844	1,1E-04	0,1424

Şekil (6.32) incelenecek olursa, en yüksek rüzgar enerjisine sahip bölgenin Gökçeada olduğu görülmektedir. Ayrıca, yine aynı şekil incelenerek, rüzgar enerji yoğunluğunun tahmininde **Güç Yoğunluğu (PD)** metodunun tüm bölgelerde diğer metotların önüne geçtiği görülmektedir. Ardından ise, EPFM ve MOM metotları gelmektedir.

Tablo (6.31) incelendiği zaman ise, tüm bölgelerde RMSE, R^2 ve χ^2 testleri sonucunda tatmin edici değeri sunan metot **Justus Moment Metodu (JMM)** olmuştur ve WEE değerlendirmesi sonucu ise Güç Yoğunluğu (PD) metodu en düşük hatayı vermiştir.

Çalışmanın bölge bazında alınan sonuçlarına göre, üzerinde çalışma yapılan bölgeler için kullanılması diğerlerine göre daha uygun bulunmuş metotlar Tablo (6.32)'de verilmiştir.

Tablo 6.32. Alınan sonuçların bölge bazında görünümü (Rüzgar güç yoğunluğu değeri ile)

Bölge	Uygun Görülen Metot	Rüzgar Güç Yoğunluğu (kWh/m ² /yıl)
Amasra	JMM	595,28
Bandırma	MMLM	2305,10
Bozcaada	PD	2564,89
Çanakkale	MOM	2913,63
Geyve	PD	350,08
Gökçeada	MOM	3976,43
Güney	PD	395,08
Kumköy	LM	2260,73
Maden	PD	439,98
Yunak	PD	716,42

Öne çıkan metotlar sırasıyla, Güç Yoğunluğu (PD), Moment (MOM), Modifiye Edilmiş Maksimum Olabilirlik (MMLM), Lysen (LM) ve Justus Moment (JMM) metotlarıdır. Ayrıca rüzgar güç yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde (Bozcaada hariç) PD metodunun tercih edilmiş olması dikkat çekmektedir.

Sunulan tüm bu sonuçlar incelenecek olursa,

- Gerçek rüzgar hız değerine uyum bakımından GM ve JMM metotları,
- Güç yoğunluğu tespiti bakımından PD ve ardından EPFM ve MOM metotları
- Hata değerleri bakımından ise JMM metodu öne çıkmaktadır.

7. SONUÇ

Bu çalışmada Türkiye'nin rüzgar enerji akısı en yüksek 10 bölgesine ait üç yıllık 50 metre yükseklikteki saatlik rüzgar hızı verileri kullanılarak, bölge bazında 11 adet iki parametrelili Weibull parametre tahmin metodunun karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar üç farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle metotların gerçek rüzgar hızı değerlerine uyumu olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiğinde karşılaştırılmıştır. İkinci olarak, belirtilen metotların rüzgar enerji yoğunluğunu tahmin etmedeki performansları karşılaştırılmıştır. Son olarak ise, bu metotların hata değerleri Ortalama karekök hatası (RMSE) Belirleme katsayısı (R^2), Chi-Kare Testi (χ^2) ve Rüzgar Enerji Hatası (WEE) olmak üzere dört istatistiksel araç yoluyla karşılaştırılarak bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin yüksek rüzgar enerji akısına sahip bölgelerinde rüzgar hızı tespiti amacıyla kullanılacak iki parametrelili Weibull dağılımı için oluşturulan parametre tahmin metotlarının performanslarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve rüzgar enerji yoğunluklarının belirlenmesidir. Çalışmanın başlangıcında, bu tür bir çalışma için gerekli olan rüzgar verilerini edinme konusunda ek bilgiler verilmiştir. Rüzgar verisi sağlayan kaynaklar ve sağladıkları verilerin bu tarz bir çalışma içerisinde kullanılıp kullanılmayacağı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmaya göre tüm bölgelerde yüksek performans gösteren tek bir metot seçilmesinin uygun olmayacağı görülmüştür. Ancak çalışmanın bir sonucu olarak belirtmek amacıyla bu bölgelerin genelinden alınan sonuçların değerlendirilmesi yoluyla öne çıkan bir metot belirlenmiştir.

Yapılan çalışmaya göre, üzerinde çalışılan 10 bölgeden yıllık rüzgar enerji yoğunluğu en fazla olan bölge, 3976,43 kWh/m²/yıl değeriyle Gökçeada bölgesi olmuştur. Rüzgar enerji yoğunluğunun değerlendirmeye olan etkisi de önemlidir. Enerji yoğunluğu daha düşük olan bölgelerde genellikle Güç yoğunluğu (PD) metodunun daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Yapılan değerlendirmelere göre bölgeden bölgeye değişen veriler ve diğer değişkenler dolayısıyla, tek bir metot öne çıkmış değildir. Her bölgede yapılan değerlendirmelerde istikrarı koruyan metot, WEE hata değerlerinde ve rüzgar enerji yoğunluğu tahmininde Güç Yoğunluğu (PD) metodu olmuştur. Ancak, çalışmanın geneli için yapılan tüm değerlendirmeler göz önüne alınırsa özellikle düşük hata değerleriyle ve olasılık dağılım fonksiyonuna uyumu ile **Justus Moment Metodu (JMM)** diğer metotların önüne geçmektedir.

KAYNAKÇA

- Akdağ, S. A., & Dinler, A.** (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766. doi:10.1016/j.enconman.2009.03.020
- Akdağ, S. A., & Güler, Ö.** (2015). A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. *Energy Conversion and Management*, 106, 1124-1133. doi:10.1016/j.enconman.2015.10.042
- Akinci, T. C., Guseinoviene, E., Seker, S., & Nayir, A.** (2013). Statistical analysis and Hurst parameter estimation for wind speed in Kırklareli area of Turkey. 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). doi:10.1109/ever.2013.6521592
- Alrashidi, M., Rahman, S., & Pipattanasomporn, M.** (2020). Metaheuristic optimization algorithms to estimate statistical distribution parameters for characterizing wind speeds. *Renewable Energy*, 149, 664-681. doi:10.1016/j.renene.2019.12.048
- Arslan, T., Bulut, Y. M., & Altın Yavuz, A.** (2014). Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 820-825. doi:10.1016/j.rser.2014.08.009
- Azad, A., Rasul, M., & Yusaf, T.** (2014). Statistical diagnosis of the best Weibull methods for wind power assessment for agricultural applications. *Energies*, 7(5), 3056-3085. doi:10.3390/en7053056
- Badawi, A. S., Hasbullah, N. F., Yusoff, S. H., Khan, S., Hashim, A., Zyoud, A., & Elamassie, M.** (2019). Weibull probability distribution of wind speed for gaza strip for 10 years. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 892, pp. 284-291). Trans Tech Publications Ltd.
- Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., & Rios-Marcuello, S.** (2010). Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2383-2391. doi:10.1016/j.rser.2010.05.001
- Carrillo, C., Cidrás, J., Díaz-Dorado, E., & Obando-Montaño, A. F.** (2014). An approach to determine the Weibull parameters for wind energy analysis: The case of Galicia (Spain). *Energies*, 7(4), 2676-2700.
- Carta, J., Ramírez, P., & Velázquez, S.** (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933-955. doi:10.1016/j.rser.2008.05.005
- Chang, T. P.** (2011). Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, 88(5), 1848-1856. doi:10.1016/j.apenergy.2010.11.010
- Chang, T. P.** (2011). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, 88(1), 272-282. doi:10.1016/j.apenergy.2010.06.018

- Chang, W.** (2014). A literature review of wind forecasting methods. *Journal of Power and Energy Engineering*, 02(04), 161-168. doi:10.4236/jpee.2014.24023
- Chaudhry, Q. Z.** (2009). An investigation on wind power potential of Gharo-Sindh, Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 6(11).
- Chaurasiya, P. K., Ahmed, S., & Warudkar, V.** (2017). Study of different parameters estimation methods of Weibull distribution to determine wind power density using ground based Doppler SODAR instrument. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2299-2311. doi:10.1016/j.aej.2017.08.008
- Chaurasiya, P. K., Ahmed, S., & Warudkar, V.** (2018). Comparative analysis of Weibull parameters for wind data measured from met-mast and remote sensing techniques. *Renewable Energy*, 115, 1153–1165. doi:10.1016/j.renene.2017.08.014
- Christofferson RD, Gillette DA** (1987) A simple estimator of the shape factor of the two-parameter Weibull distribution. *J Climate Appl Meteorol* 26(2):323–325
- Clement, N. L., & Lasky, R. C.** (2020). Weibull distribution and analysis: 2019. 2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). doi:10.23919/panpacific48324.2020.9059313
- Costa Rocha, P. A., De Sousa, R. C., De Andrade, C. F., & Da Silva, M. E.** (2012). Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the Northeast Region of Brazil. *Applied Energy*, 89(1), 395-400. doi:10.1016/j.apenergy.2011.08.003
- Counihan, J.** (1975). Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972. *Atmospheric Environment* (1967), 9(10), 871–905. doi:10.1016/0004-6981(75)90088-8
- Dodson, B.** (2006). *The Weibull analysis handbook* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Dokur, E., Ceyhan, S., & Kurban, M.** (2019). Comparative analysis of wind speed models using different Weibull distributions. *Electrica*, 19(1), 22-28. doi:10.26650/electrica.2018.28091
- EDF Energy A brief history of energy.** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://www.edfenergy.com/for-home/energywise/a-brief-history-of-energy>]
- Enerji Atlası** [Erişim Tarihi: 26.06.2021 <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>]
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://apps.ecmwf.int/datasets>]
- Fabbri, A., Roman, G., S., T., Abbad, J., R. ve Quezada V., M.** (2005). Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1440-1446. doi:10.1109/tpwrs.2005.852148
- Global Wind Atlas Maps (Country and Region)** [Erişim Tarihi 16.01.2021 <https://globalwindatlas.info/downloads/maps-country-and-region>]

- Global Wind Energy Council Global Wind Energy Report 2019** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://gwec.net/global-wind-report-2019/>]
- Gualtieri, G. et Secci, S.** (2011). Comparing methods to calculate atmospheric stability-dependent wind speed profiles: A case study on coastal location. *Renewable energy*, 36(8), 2189-2204. doi:10.1016/j.renene.2011.01.023
- Hau, E.** (2013). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media.
- Indhumathy, D., Sessaiah, C. V., & Sukkiramathi, K.** (2014). Estimation of Weibull Parameters for Wind speed calculation at Kanyakumari in India. *International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology*, 3(1), 8340-8345.
- Iowa State University, ASOS Network** [Erişim Tarihi 17.02.2021 https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=TR__ASOS]
- Islam, K. D., Dussadee, N., & Chaichana, T.** (2016). An approach to determine the Weibull parameters and wind power analysis of Saint Martin's island, Bangladesh. *MATEC Web of Conferences*, 70, 09004. doi:10.1051/mateconf/20167009004
- Jung, C., & Schindler, D.** (2019). Wind speed distribution selection – A review of recent development and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109290. doi:10.1016/j.rser.2019.109290
- Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., & Graber, D.** (1978). Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. *Journal of Applied Meteorology*, 17(3), 350-353. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0350:mfewsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0350:mfewsf>2.0.co;2)
- Kidmo, D. K., Danwe, R., Doka, S. Y., & Djongyang, N.** (2015). Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull Methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Revue des Energies Renouvelables*, 18(1), 105-125.
- Lei, W. S., Zhang, P., Yu, Z., & Qian, G.** (2020). Statistics of ceramic strength: Use ordinary Weibull distribution function or Weibull statistical fracture theory?. *Ceramics International*, 46(13), 20751-20768.
- Lai, C. D., Murthy, D. N., & Xie, M.** (2006). Weibull distributions and their applications. In *Springer Handbooks* (pp. 63-78). Springer.
- Lysen, E. H.** (1982). *Introduction to wind energy*.
- Mabchour, H.** (1999). *Etude modélisation et expérimentation des composants d'un système hybride couplant les énergies solaire et éolienne: Performances et méthodologie de dimensionnement*. Mohammedia, Maroc, 1999
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L.** (2010). *Wind energy explained: Theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Masters, G. M.** (2013). *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü** [Erişim Tarihi 17.02.2021 mevbis.mgm.gov.tr]

- Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N., & Jalilvand, M.** (2016). Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322-335. doi:10.1016/j.enconman.2015.11.015
- Mouangue, R. M., Kazet, M. Y., Kuitche, A., & Ndjaka, J. M.** (2014). Influence of the determination methods of K and C parameters on the ability of Weibull distribution to suitably estimate wind potential and electric energy. *International Journal of Renewable Energy Development*, 3(2), 145-154. doi:10.14710/ijred.3.2.145-154
- National Oceanic and Atmospheric Administration** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/global-hourly?bbox=40.489,26.785,33.018,38.979>]
- Patel, H. & Damania, S.** (2013). PERFORMANCE PREDICTION OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 1401-1406.
- Prediction Of Worldwide Energy Resources** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>]
- Rashid, M. H.** (2015). *Electric Renewable Energy Systems*. Academic Press.
- Reiszadeh, M., & Motahar, S.** (2011). The wind energy potential in the coasts of Persian Gulf used in design and analysis of a horizontal Axis wind turbine. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden*, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden. doi:10.3384/ecp110574058
- S. J. van Donk, L. E. Wagner, E. L. Skidmore, & J. Tatarko.** (2005). Comparison of the weibull model with measured wind speed distributions for stochastic wind generation. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 503-510. doi:10.13031/2013.18324
- Saleh, H., Abou El-Azm Aly, A., & Abdel-Hady, S.** (2012). Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt. *Energy*, 44(1), 710-719. doi:10.1016/j.energy.2012.05.021
- Seguro, J., & Lambert, T.** (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84. doi:10.1016/s0167-6105(99)00122-1
- Solar Radiation Data** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>]
- Soman, S. S., Zareipour, H., Malik, O., & Mandal, P.** (2010). A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. *North American Power Symposium 2010*. doi:10.1109/naps.2010.5619586
- Sumair, M., Aized, T., Gardezi, S. A., Rehman, S. U., & Rehman, S. M.** (2020). A novel method developed to estimate Weibull parameters. *Energy Reports*, 6, 1715-1733. doi:10.1016/j.egyr.2020.06.017

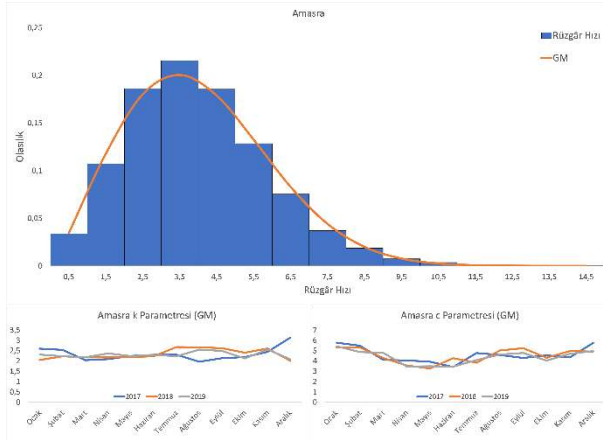
- Sumathi, S., Ashok Kumar, L., & Surekha, P.** (2015). Wind Energy Conversion Systems. *Green Energy and Technology*, 247–307. doi:10.1007/978-3-319-14941-7_4
- Süzek, F.** (2007). Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tiam Kapen, P., Jeutho Gouajio, M., & Yemélé, D.** (2020). Analysis and efficient comparison of ten numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy potential: Application to the city of Bafoussam, Cameroon. *Renewable Energy*, 159, 1188-1198. doi:10.1016/j.renene.2020.05.185
- Tizgui, I., El Guezar, F., Bouzahir, H., & Benaid, B.** (2017). Comparison of methods in estimating Weibull parameters for wind energy applications. *International Journal of Energy Sector Management*, 11(4), 650-663. doi:10.1108/ijesm-06-2017-0002
- Tonsie Djiela, R. H., Tiam Kapen, P., & Tchuen, G.** (2020). Wind energy of Cameroon by determining Weibull parameters: Potential of a environmentally friendly energy. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-020-02962-z
- Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB)** RES Veritabanı [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://www.tureb.com.tr>]
- U.S. Energy Information Administration** (2020, Mart 24). History of wind power. [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>]
- Ulgen, K., & Hepbasli, A.** (2002). Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey. *International Journal of Energy Research*, 26(6), 495-506. doi:10.1002/er.798
- University Corporation for Atmospheric Research** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://rda.ucar.edu/datasets/ds351.0/>]
- Vortex Interface** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://interface.vortexfdc.com>]
- Wagner, H.-J.** (2018). Introduction to wind energy systems. *EPJ web of conferences*, 189, 00005. doi:10.1051/epjconf/201818900005
- Wang, J., Hu, J., & Ma, K.** (2016). Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 881-899. doi:10.1016/j.rser.2016.01.057
- Werapun, W., Tirawanichakul, Y., & Waewsak, J.** (2015). Comparative study of five methods to estimate Weibull parameters for wind speed on Phangan Island, Thailand. *Energy Procedia*, 79, 976-981.
- Windnavigator** [Erişim Tarihi 17.02.2021 <https://dashboards.awstruepower.com/wsa>]



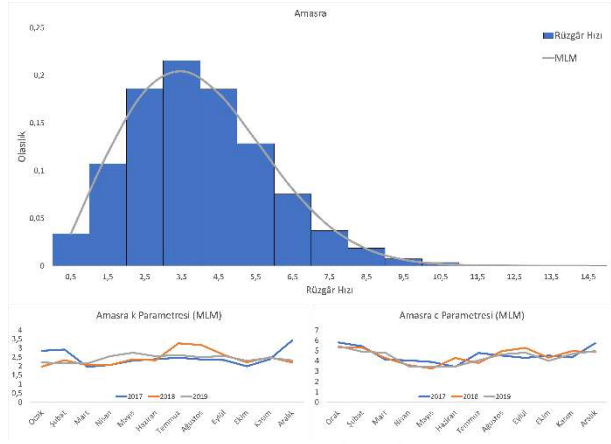
EKLER

EK-1: Amasra Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

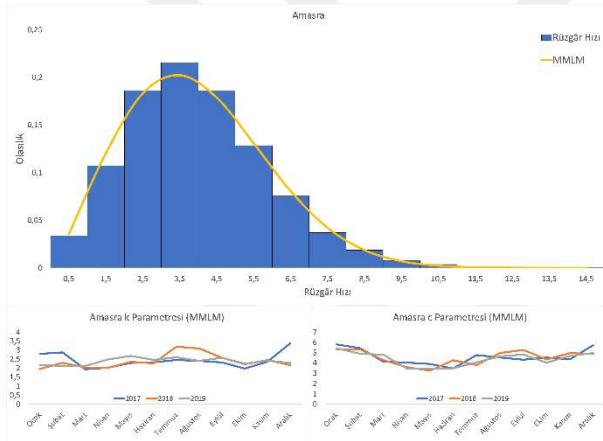
GM



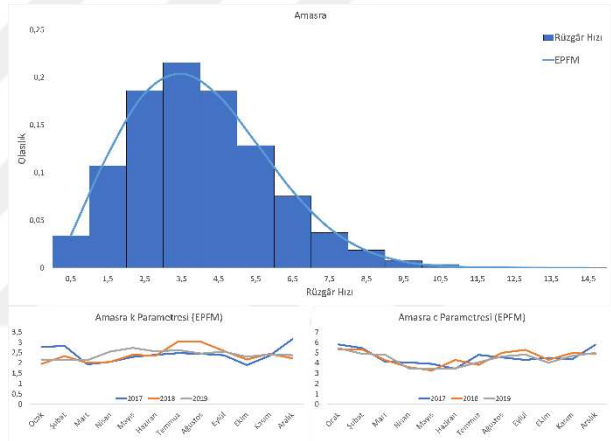
MLM



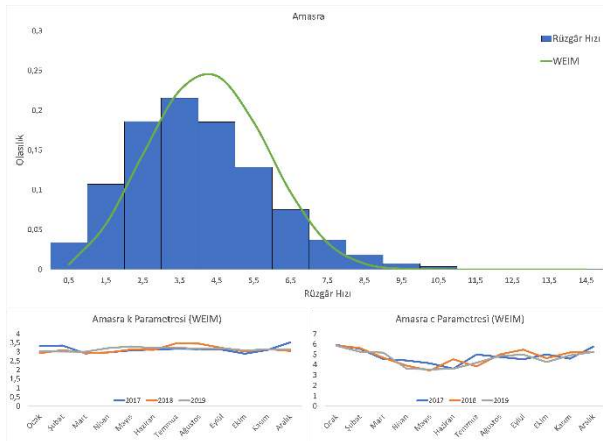
MMLM



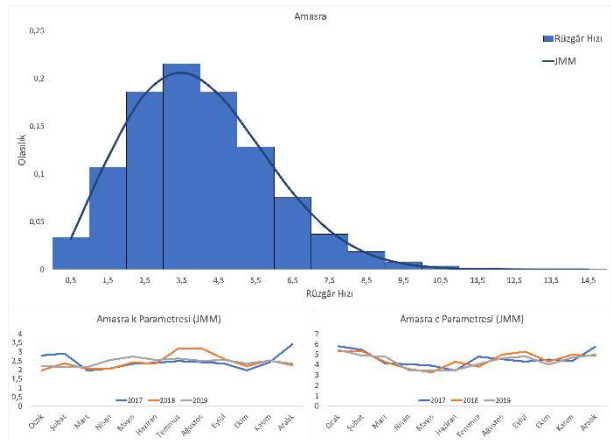
EPFM



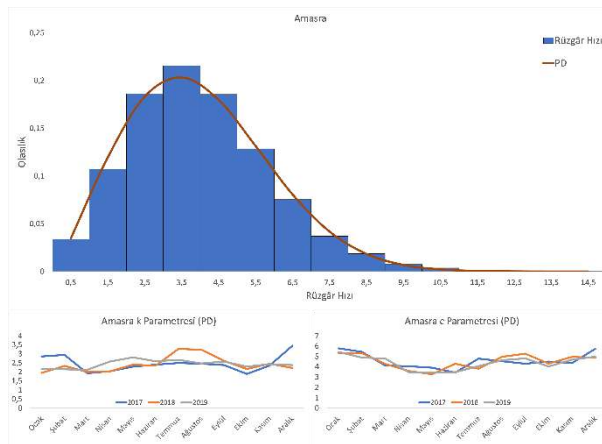
WEIM



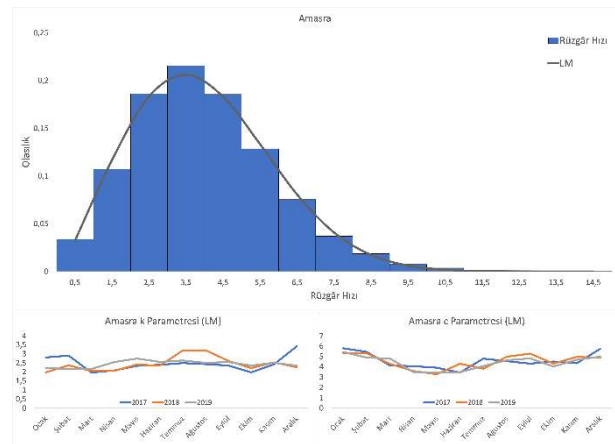
JMM



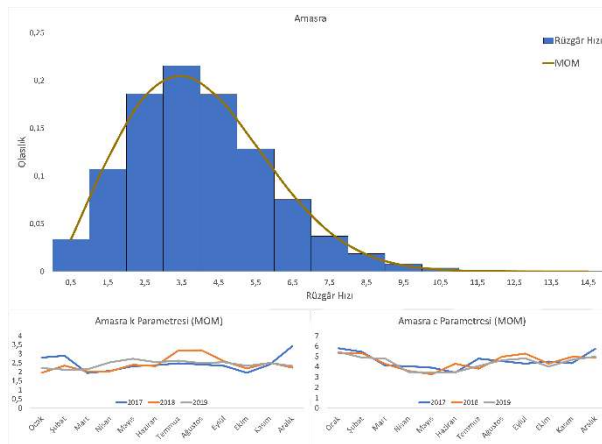
PD



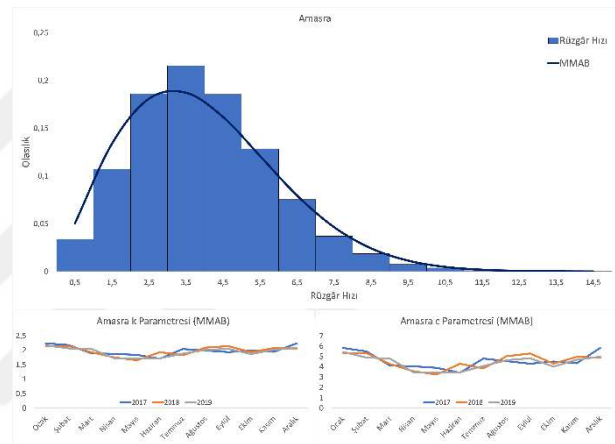
LM



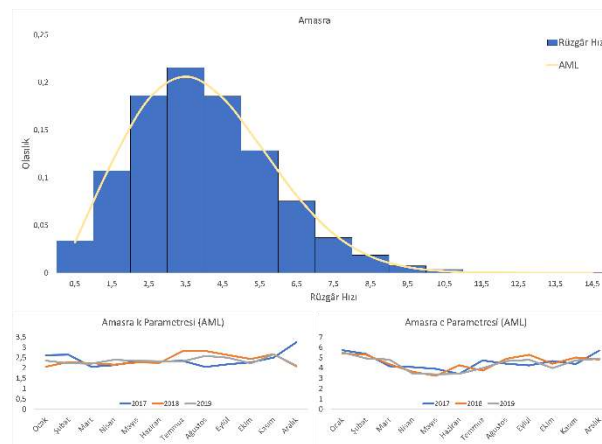
MOM



MMAb

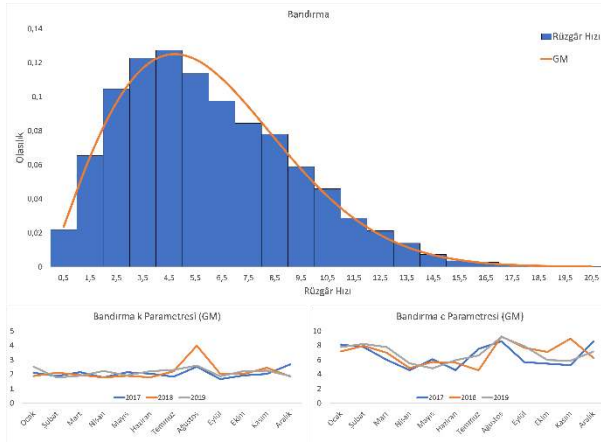


AML

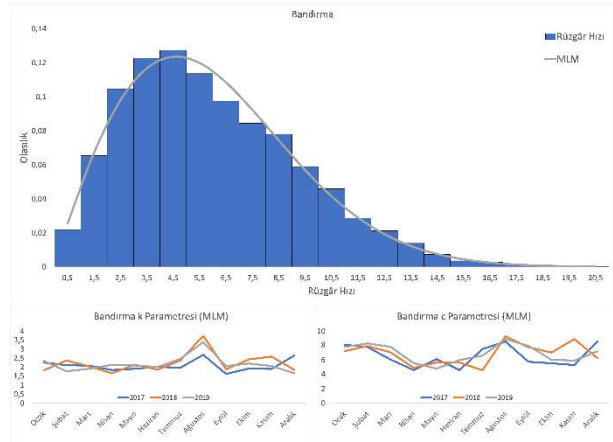


EK-2: Bandırma Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

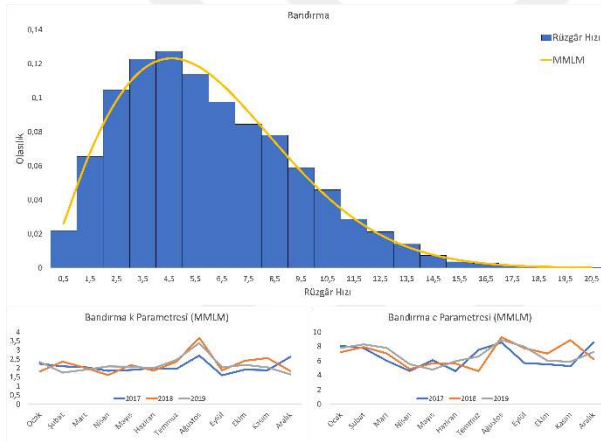
GM



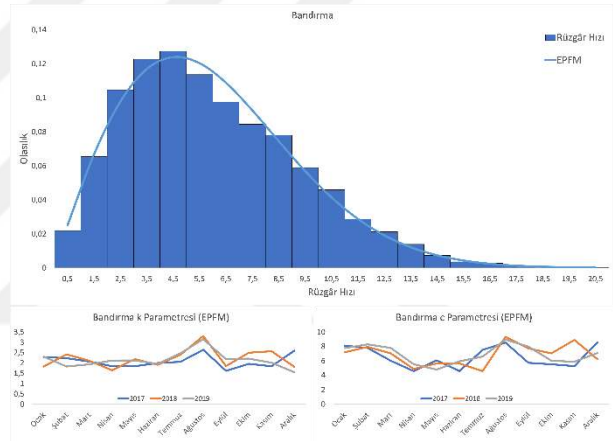
MLM



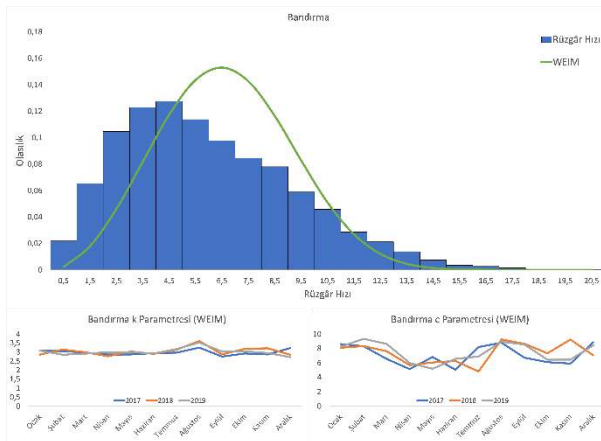
MMLM



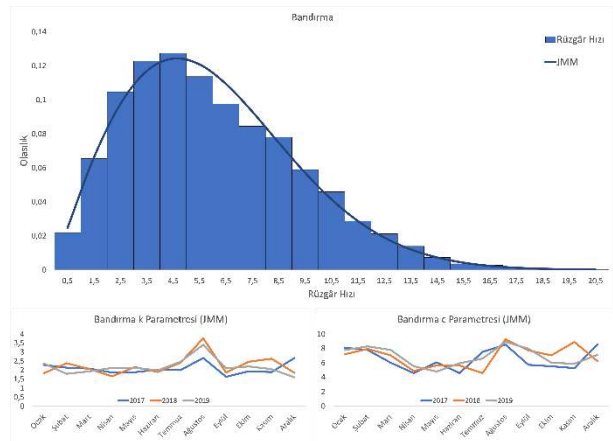
EPFM



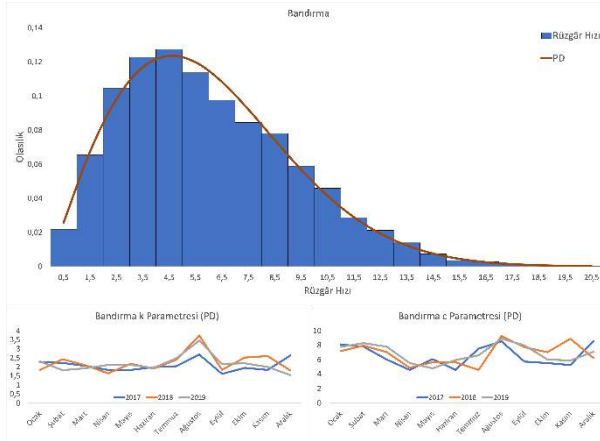
WEIM



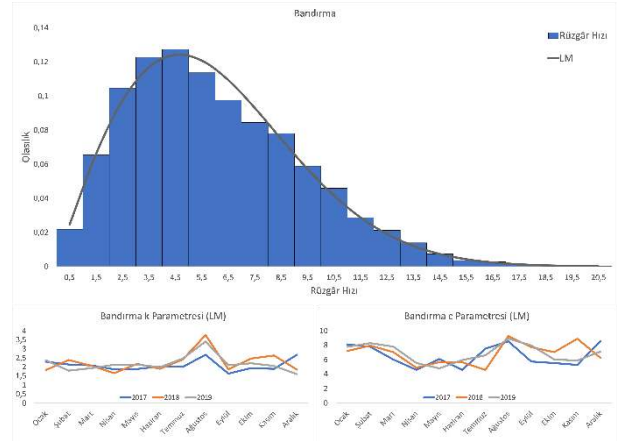
JMM



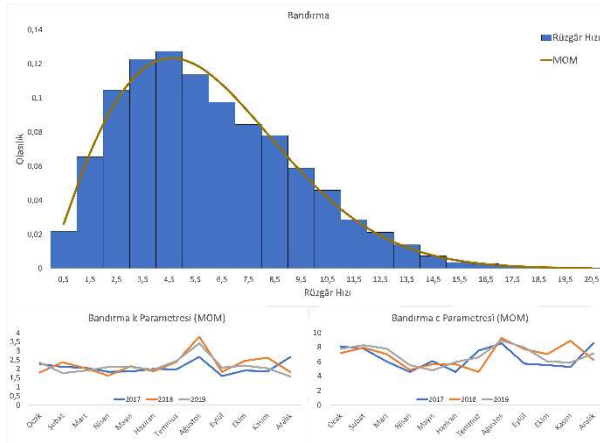
PD



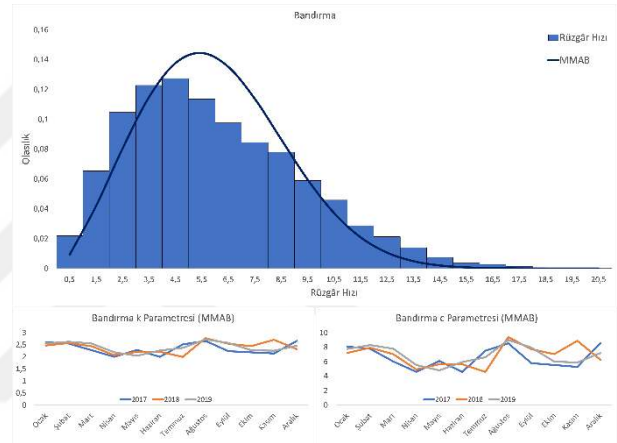
LM



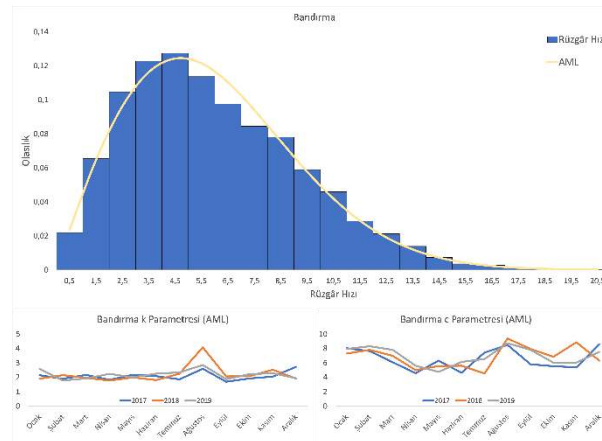
MOM



MMAb

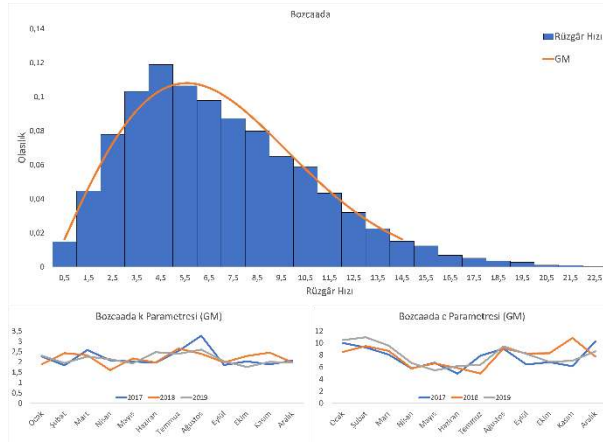


AML

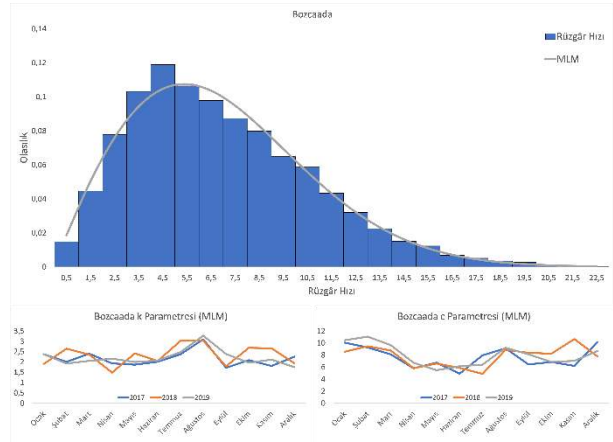


EK-3: Bozcaada Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

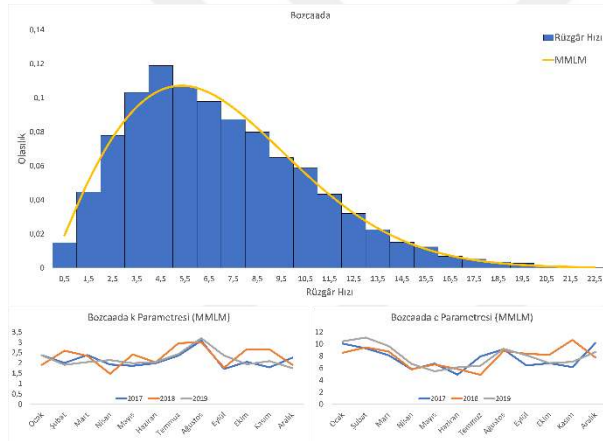
GM



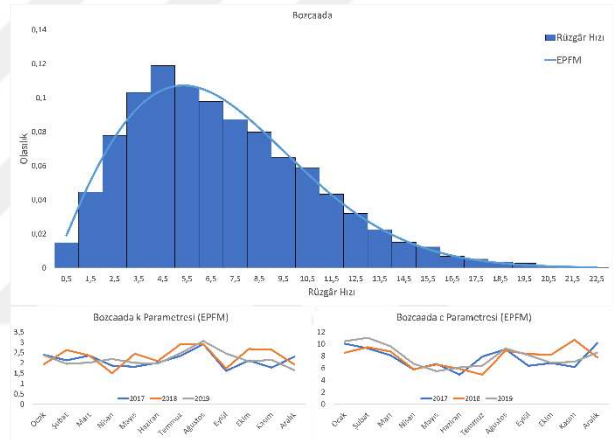
MLM



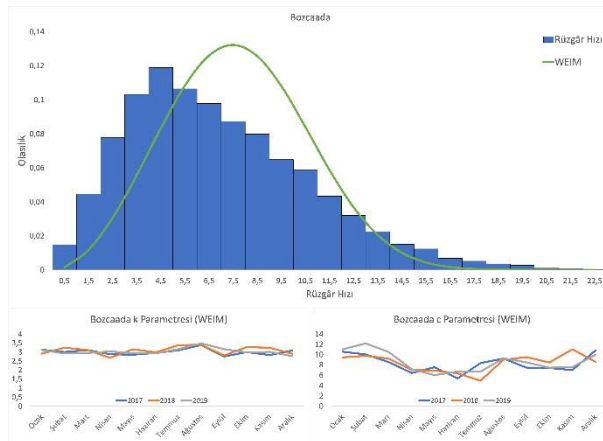
MMLM



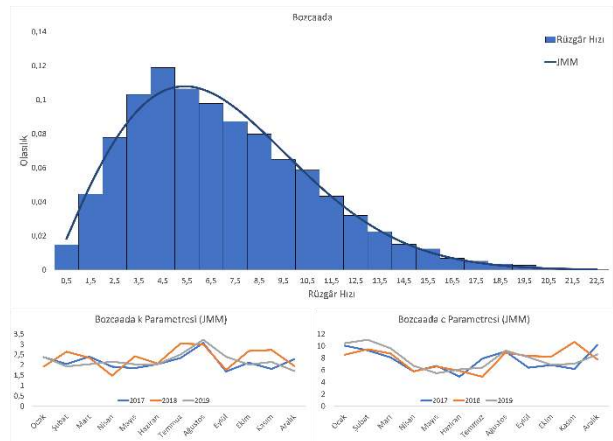
EPFM



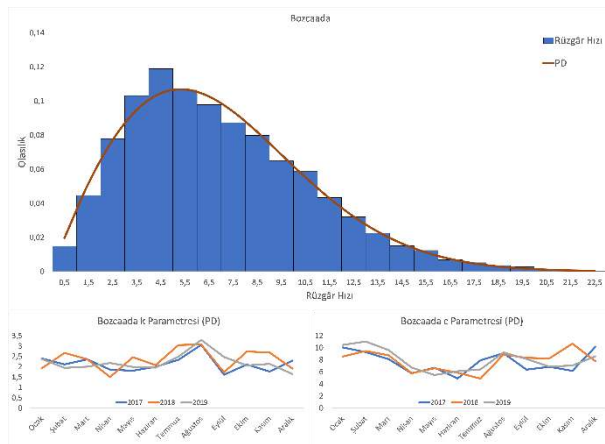
WEIM



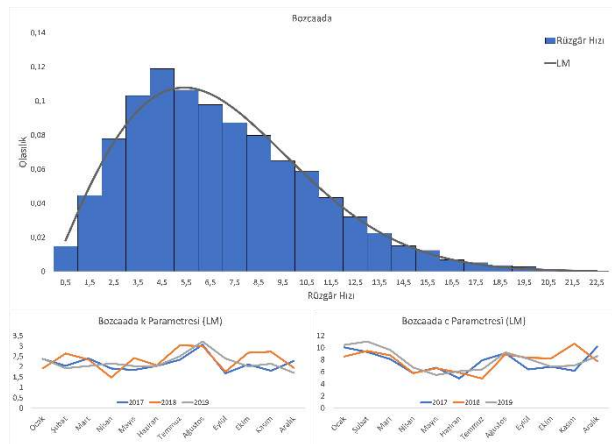
JMM



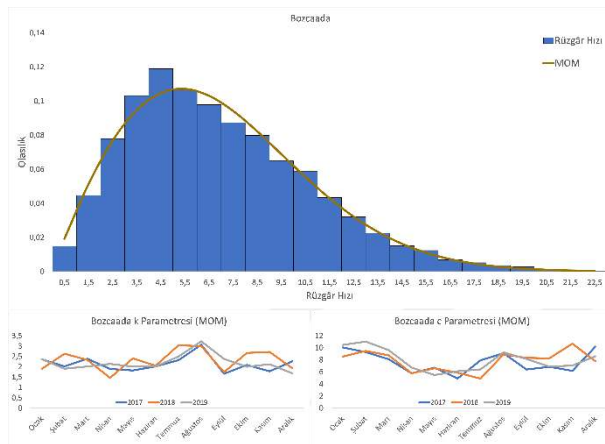
PD



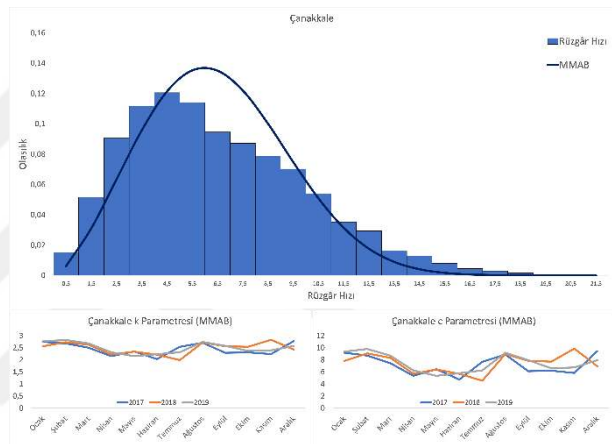
LM



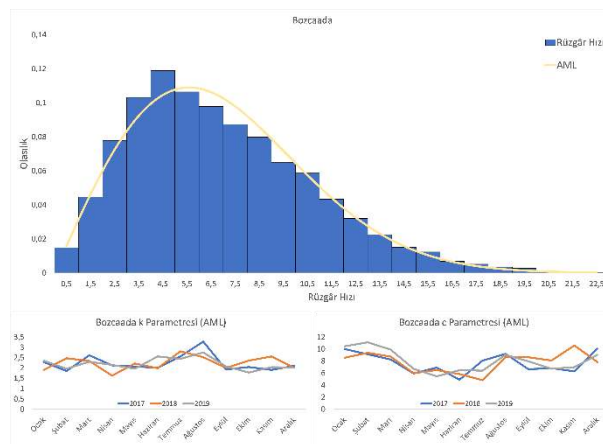
MOM



MMAB

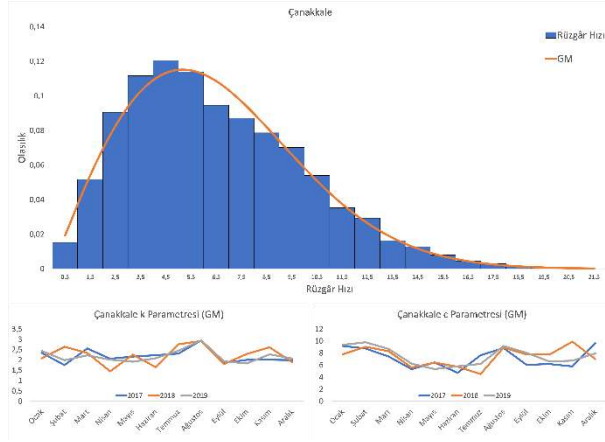


AML

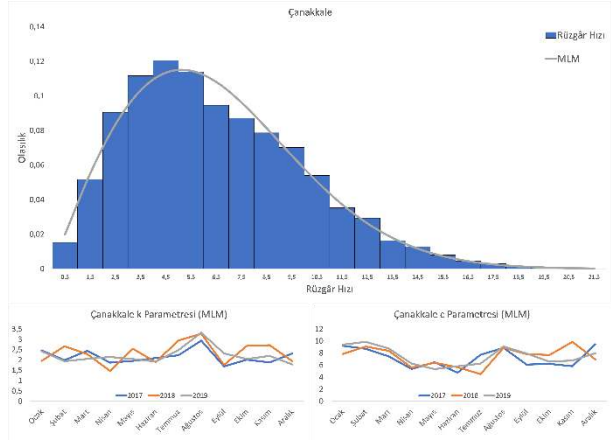


EK-4: Çanakkale Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

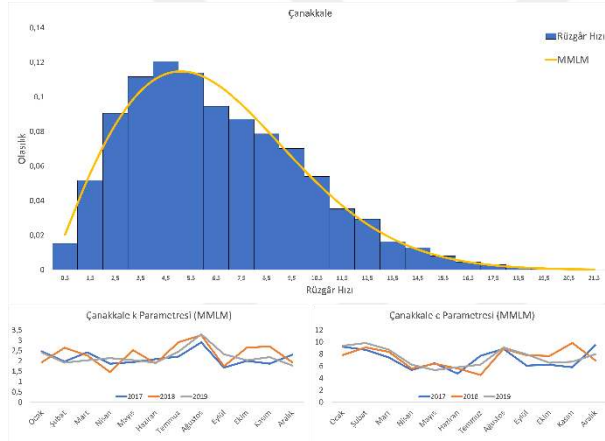
GM



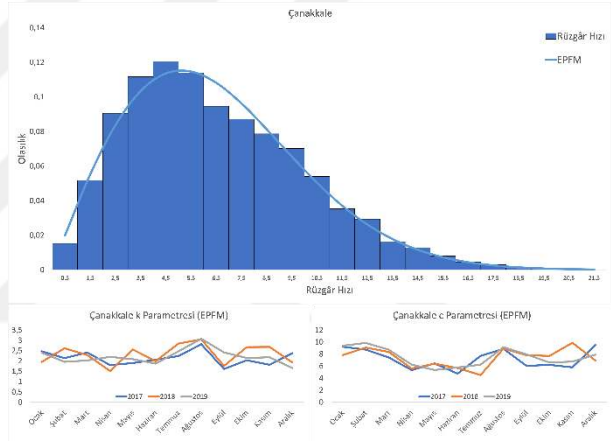
MLM



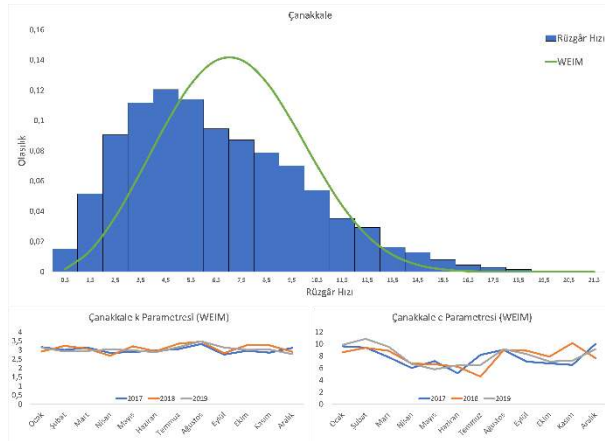
MMLM



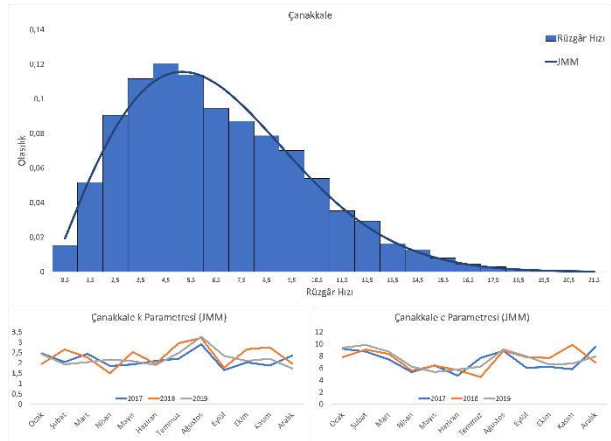
EPFM



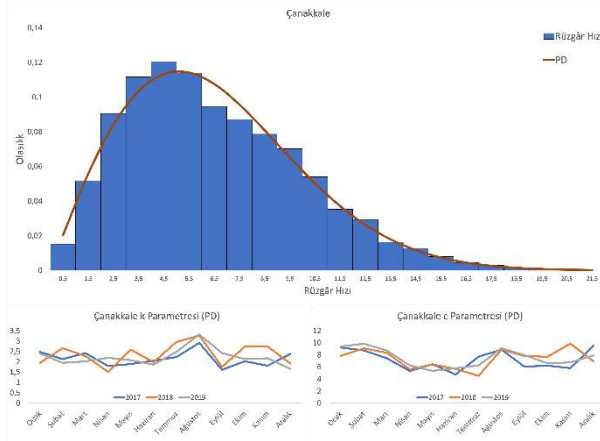
WEIM



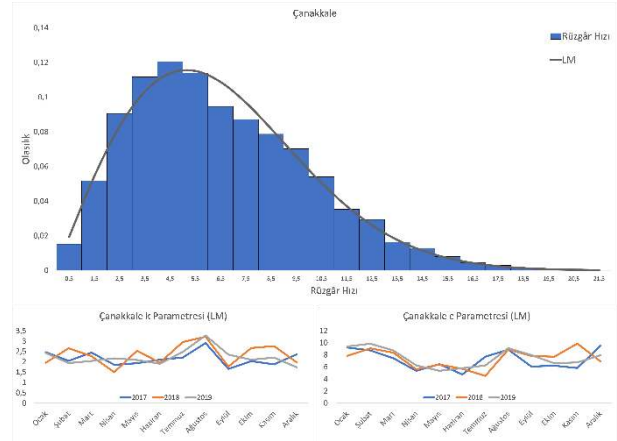
JMM



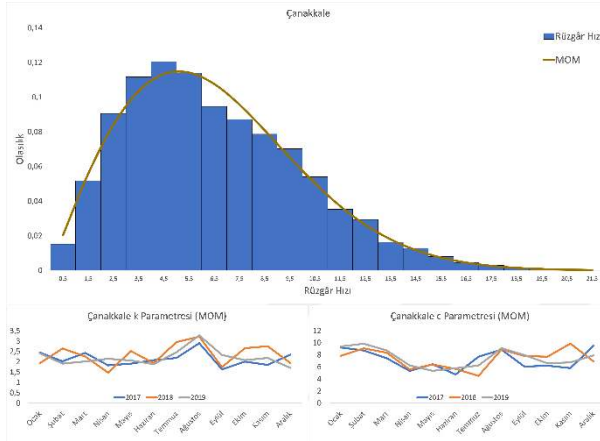
PD



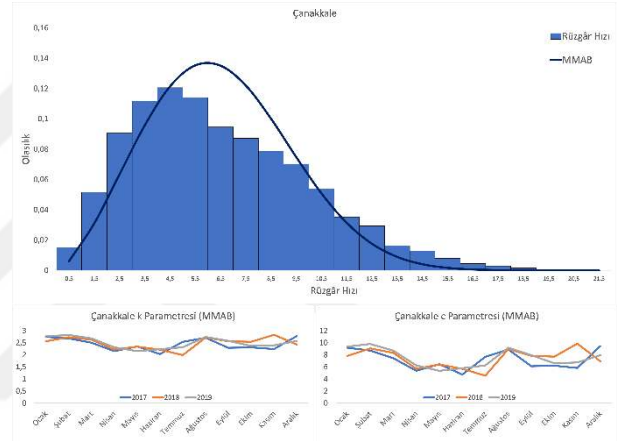
LM



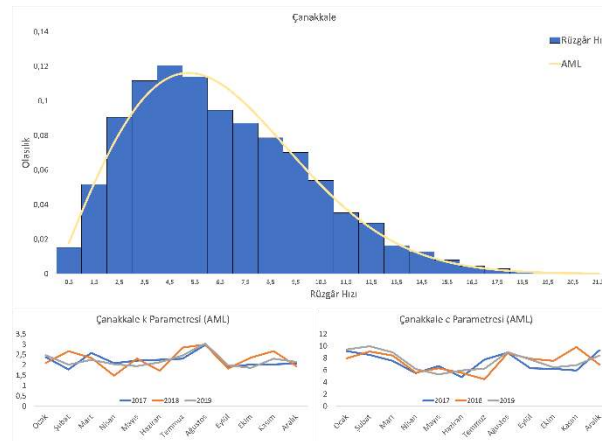
MOM



MMAB

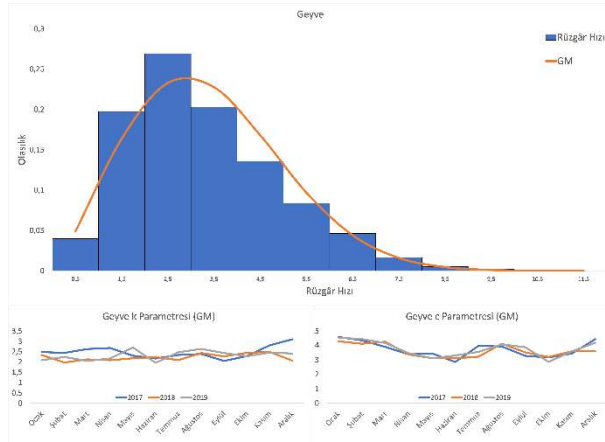


AML

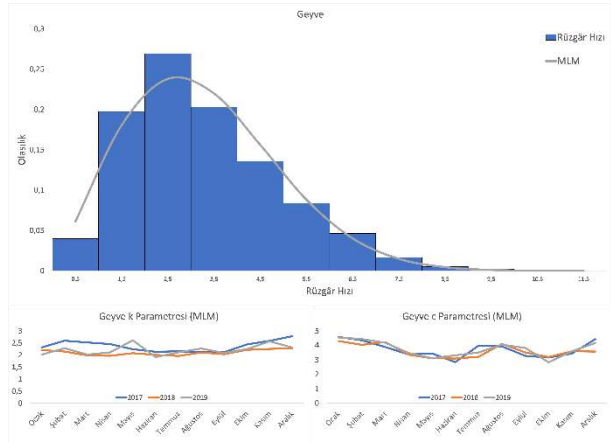


EK-5: Geyve Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

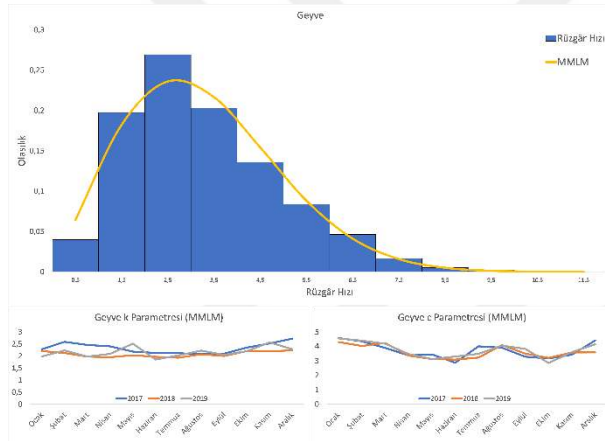
GM



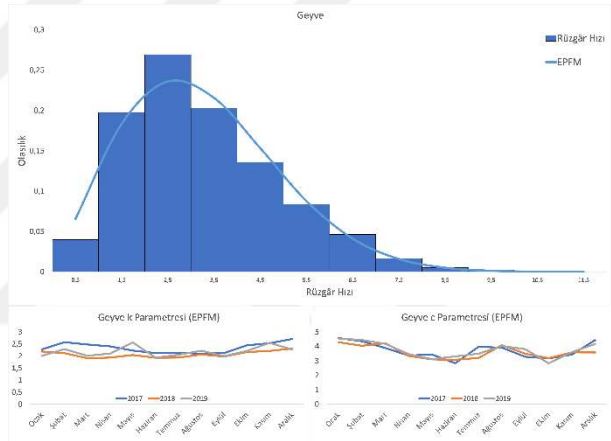
MLM



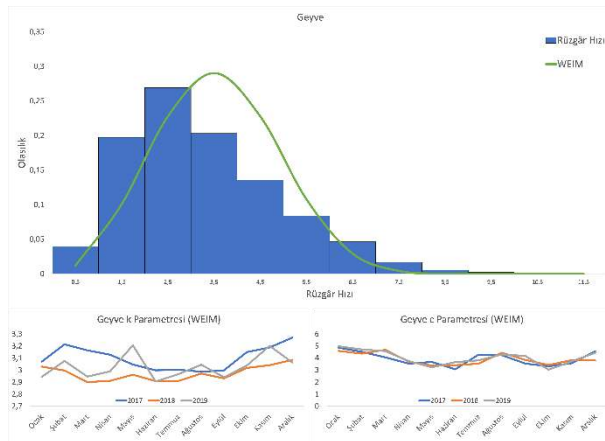
MMLM



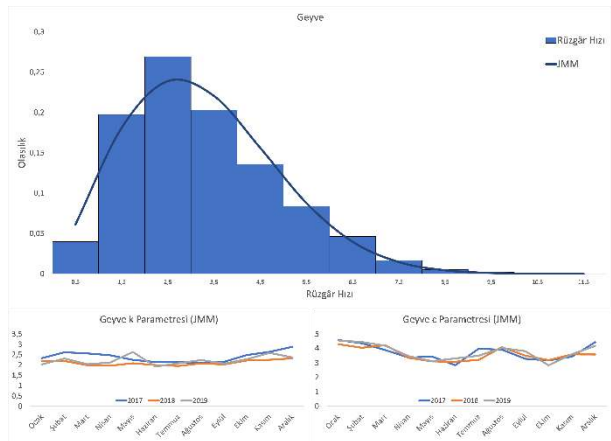
EPFM



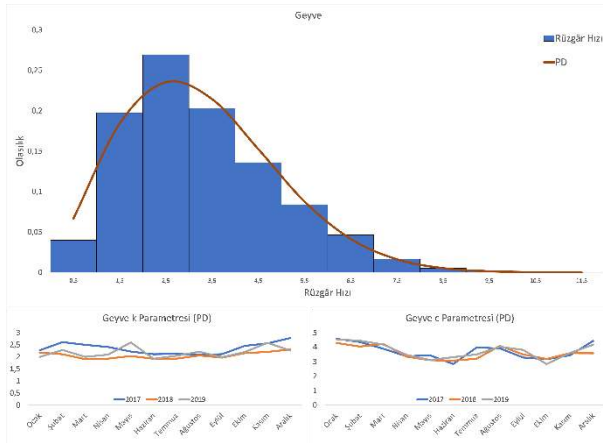
WEIM



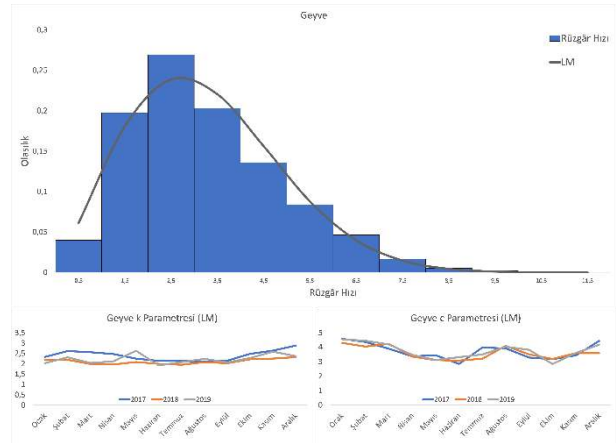
JMM



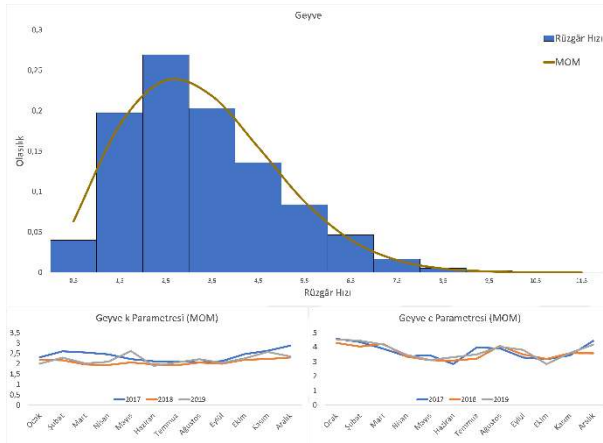
PD



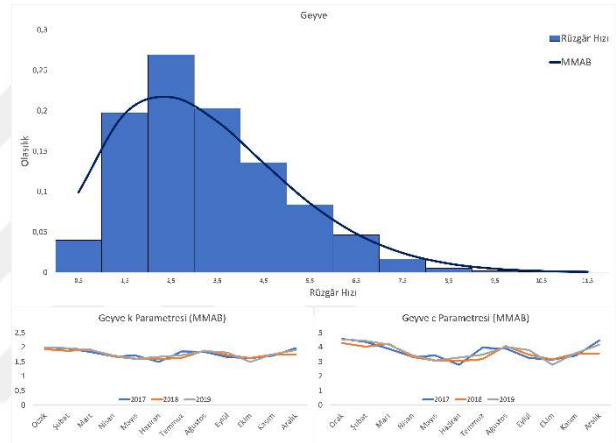
LM



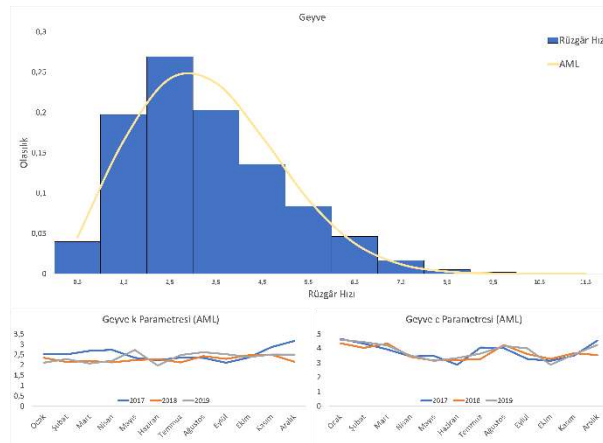
MOM



MMAB

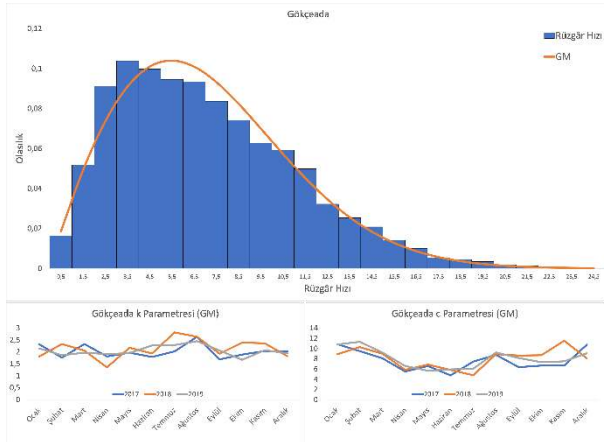


AML

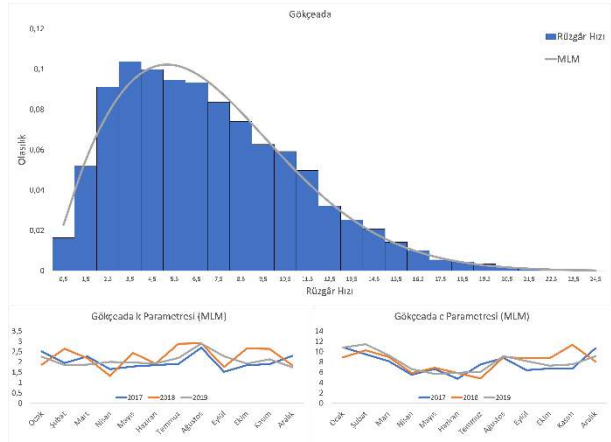


EK-6: Gökçeada Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

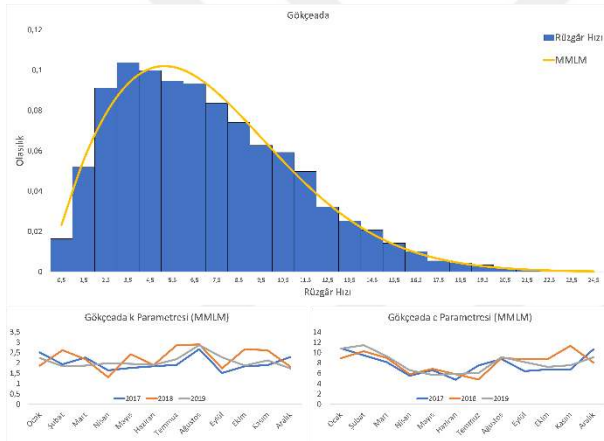
GM



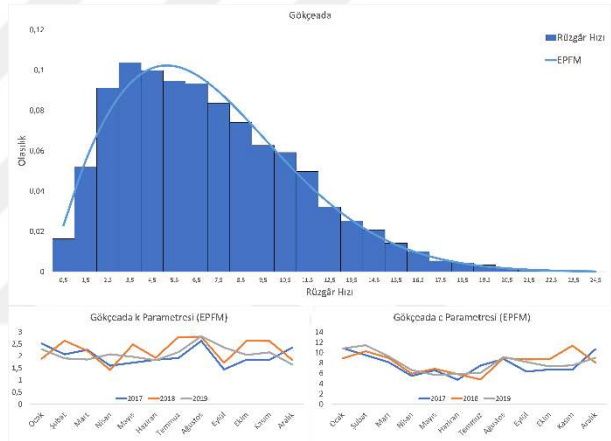
MLM



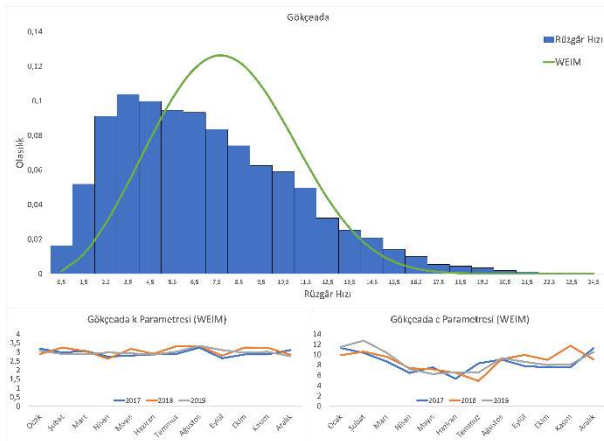
MMLM



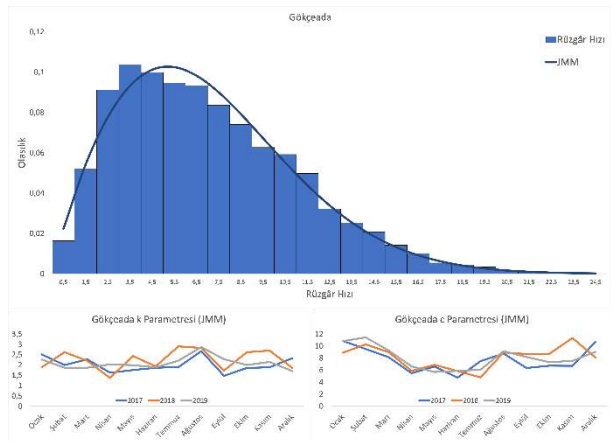
EPFM



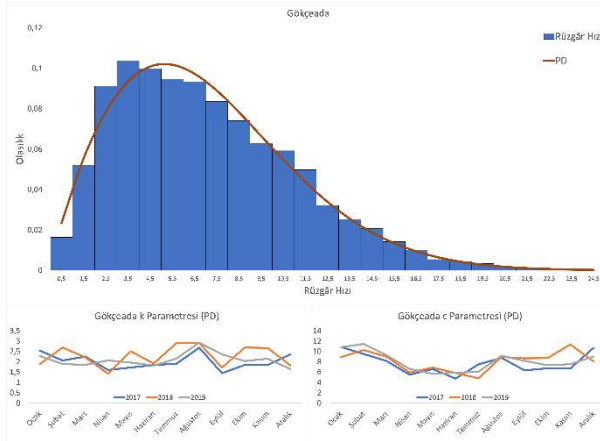
WEIM



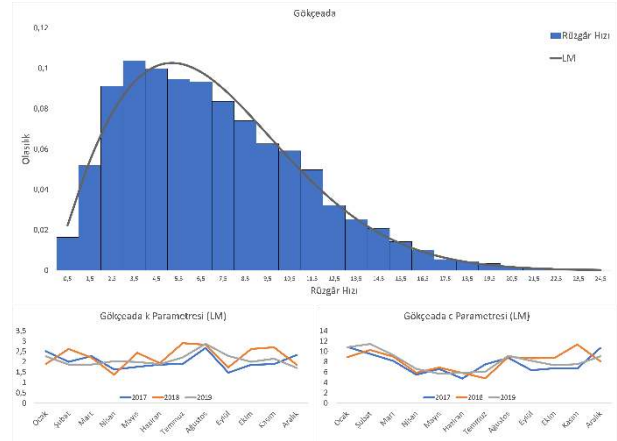
JMM



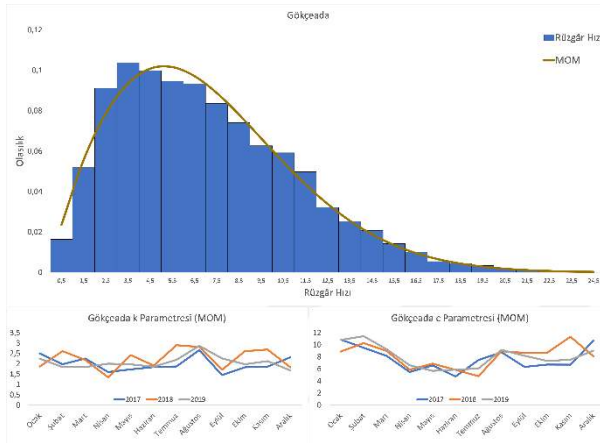
PD



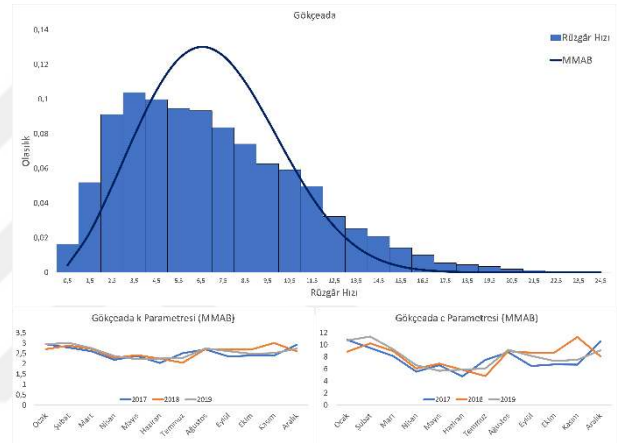
LM



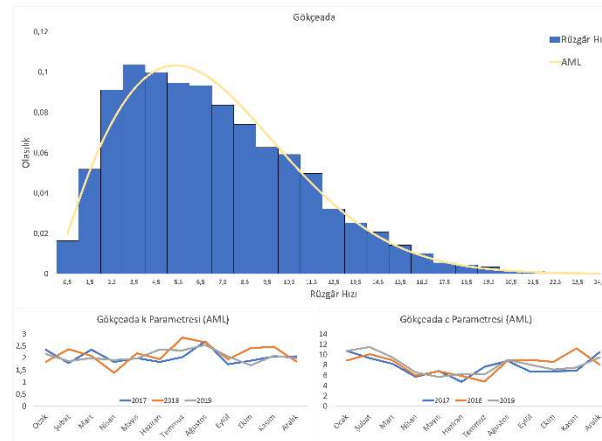
MOM



MMAB

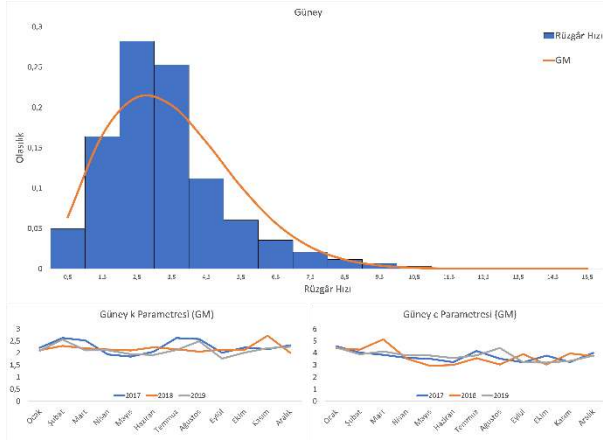


AML

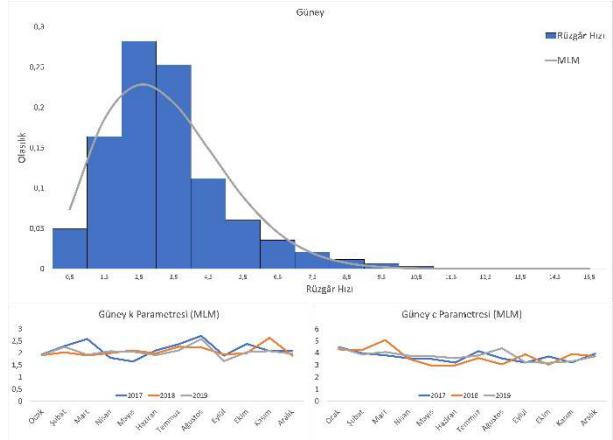


EK-7: Güney Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

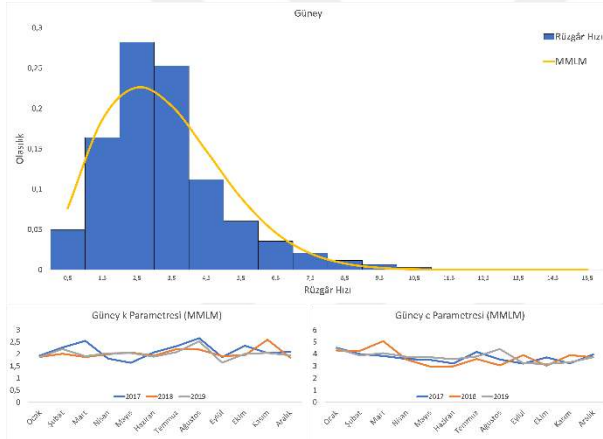
GM



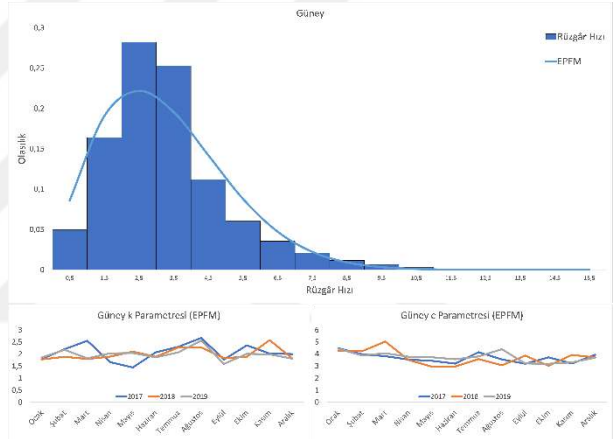
MLM



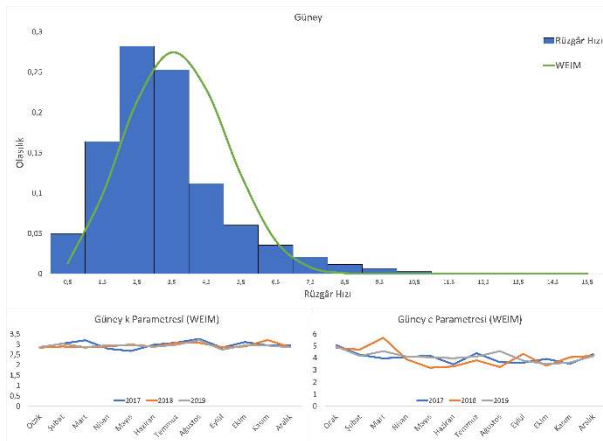
MMLM



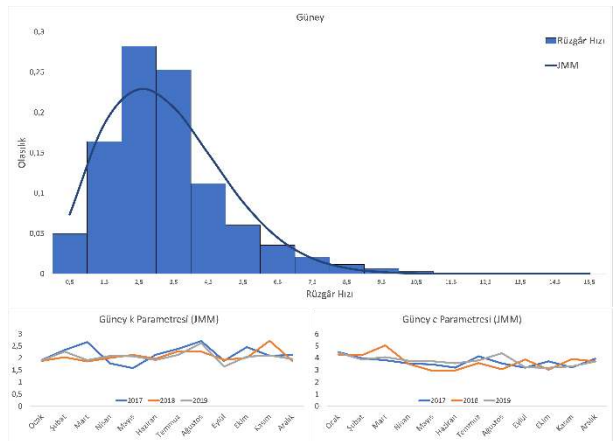
EPFM



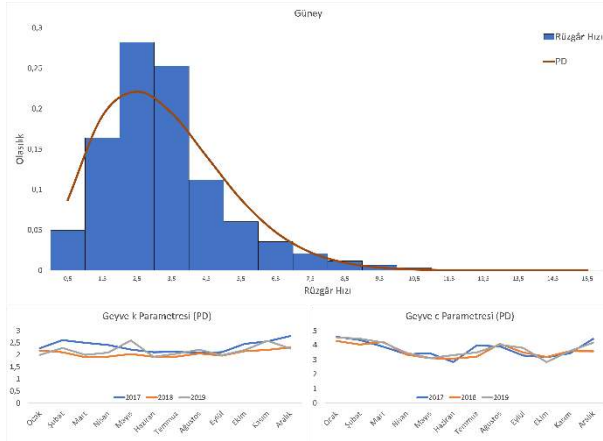
WEIM



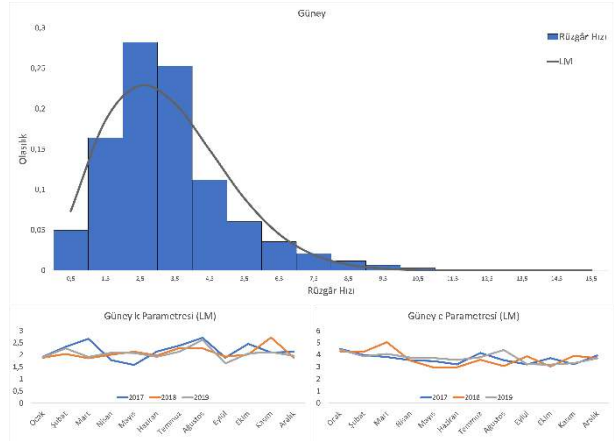
JMM



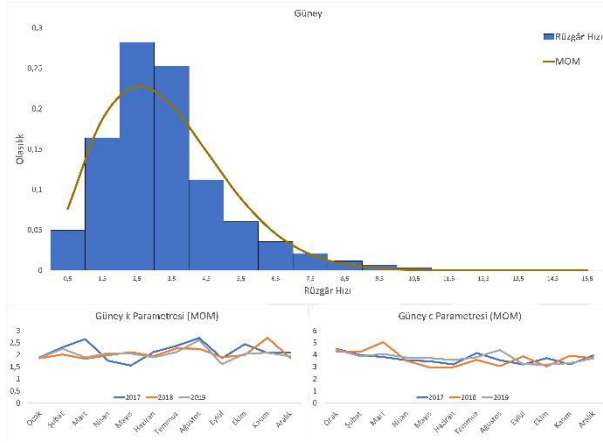
PD



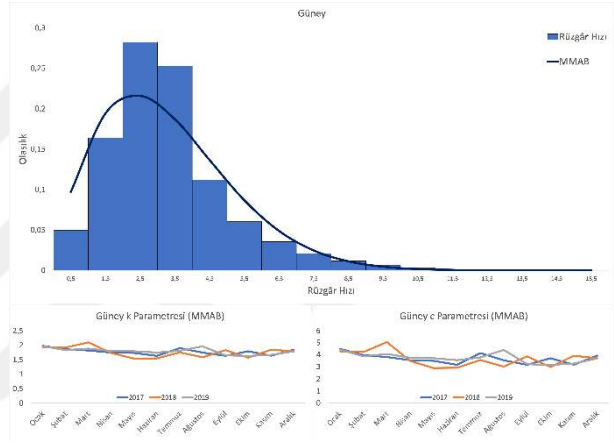
LM



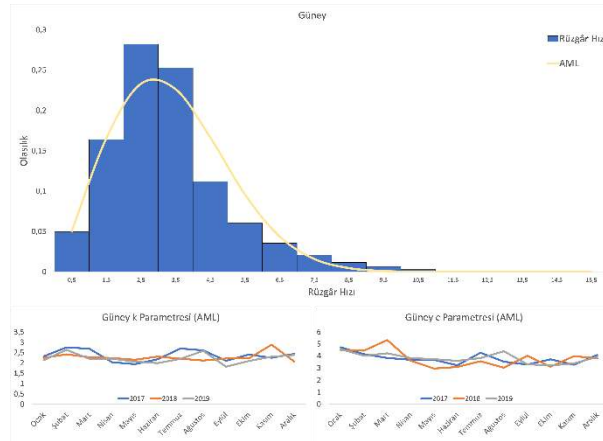
MOM



MMAB

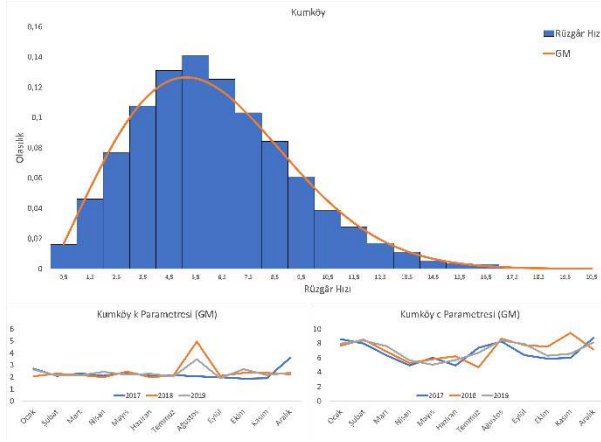


AML

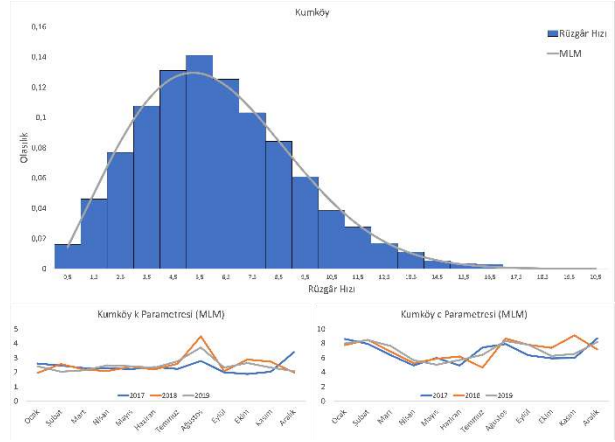


EK-8: Kumköy Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

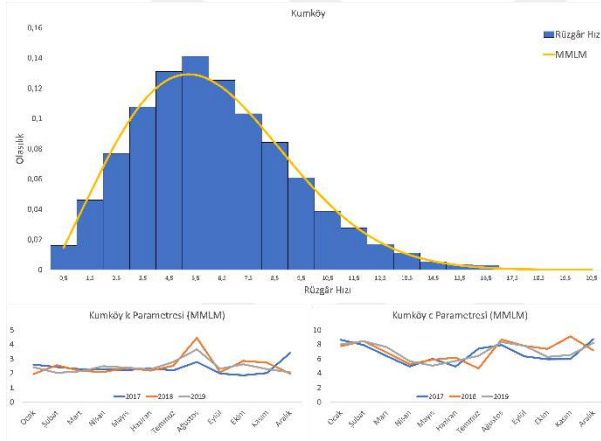
GM



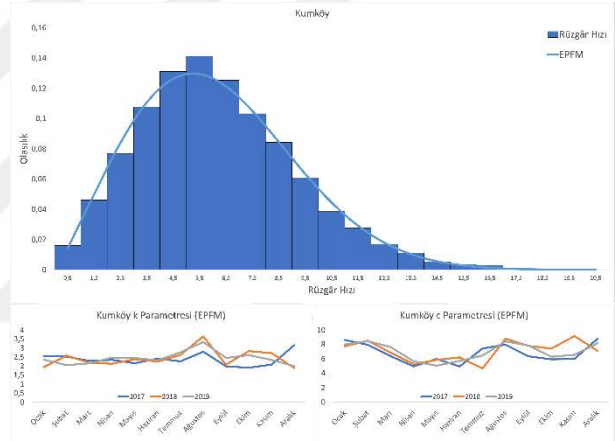
MLM



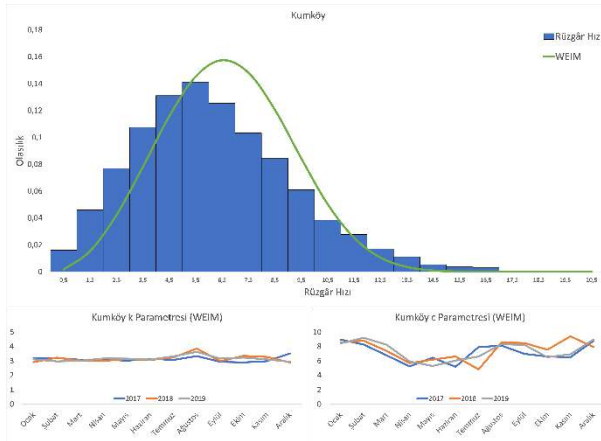
MMLM



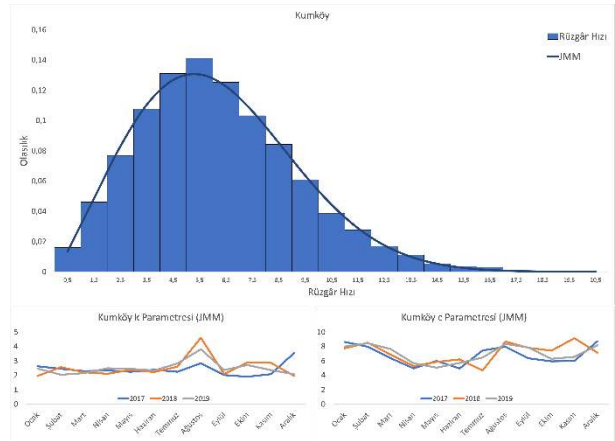
EPFM



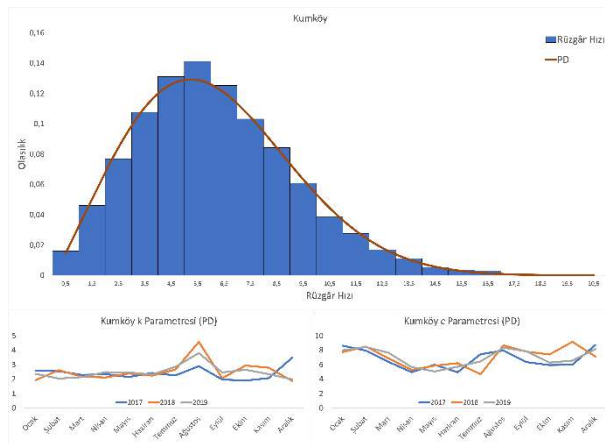
WEIM



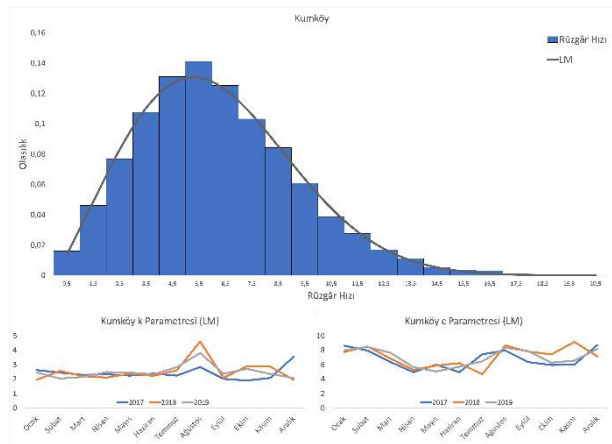
JMM



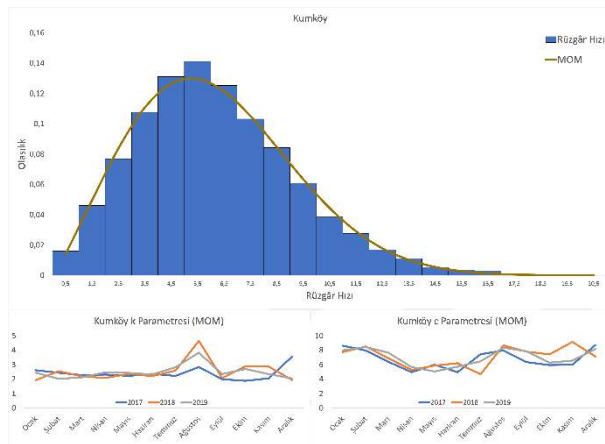
PD



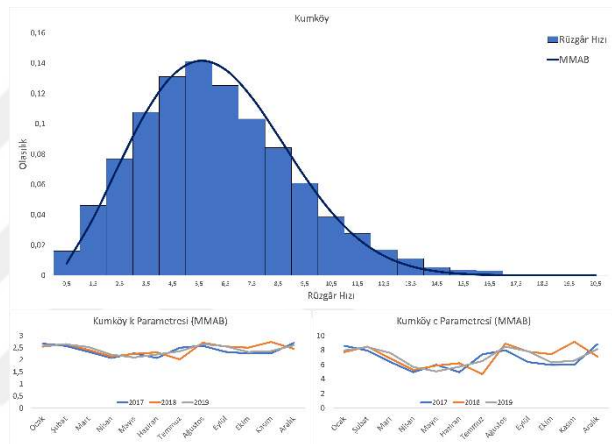
LM



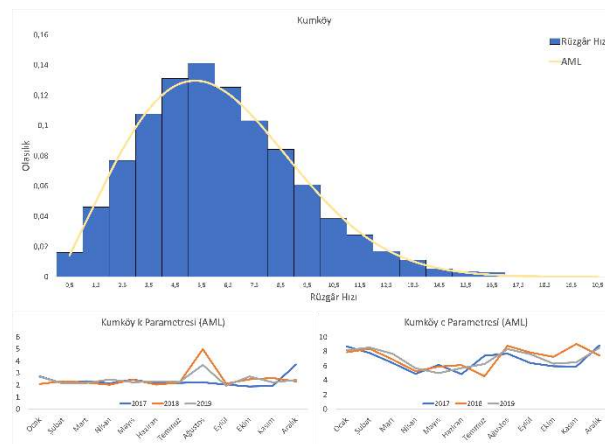
MOM



MMAB

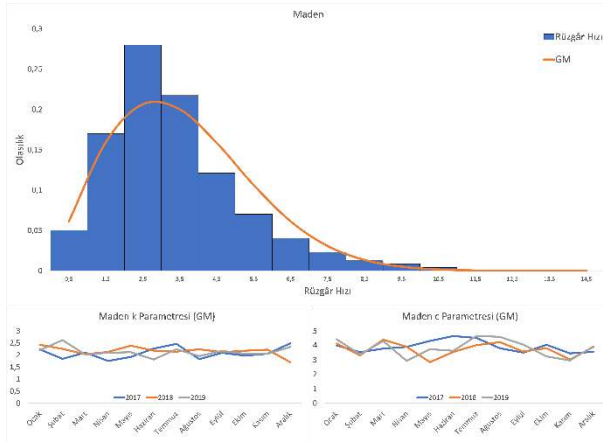


AML

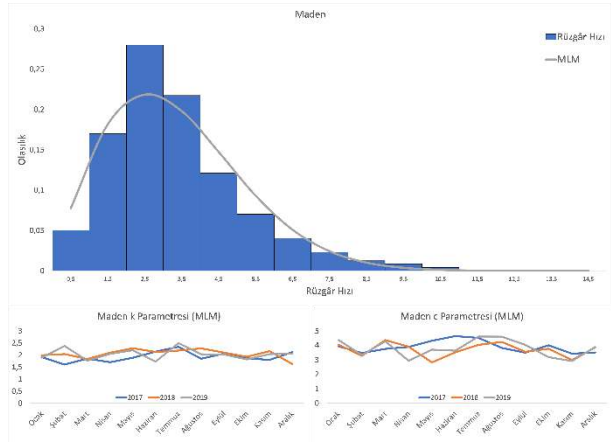


EK-9: Maden Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

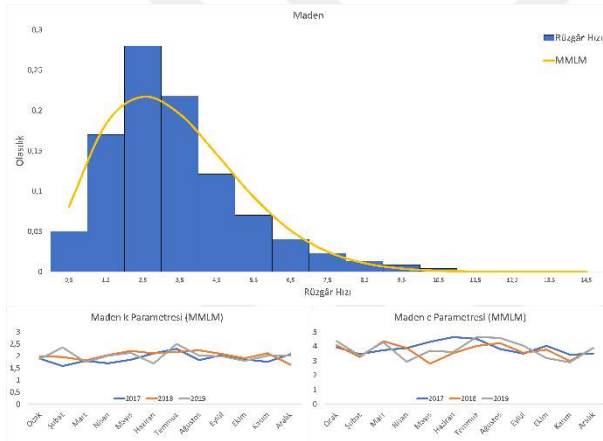
GM



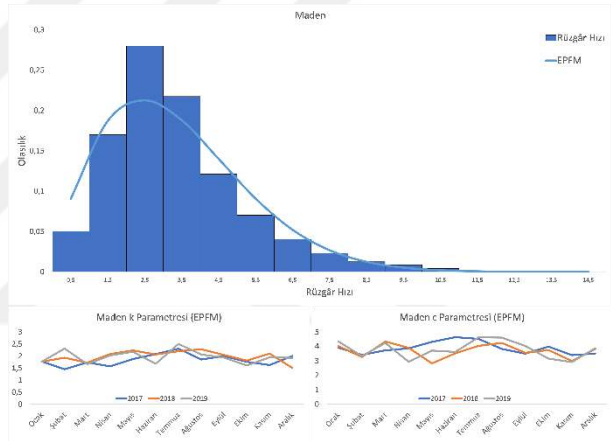
MLM



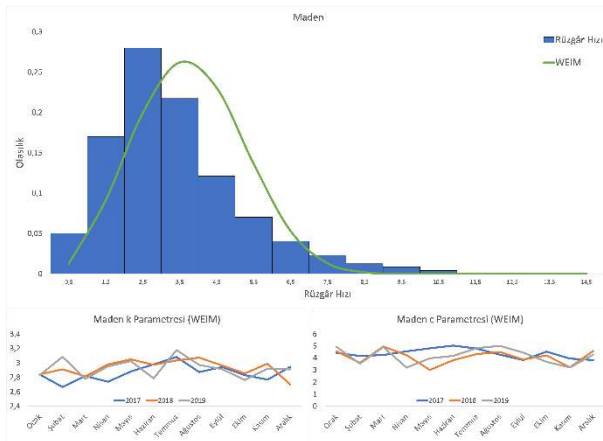
MMLM



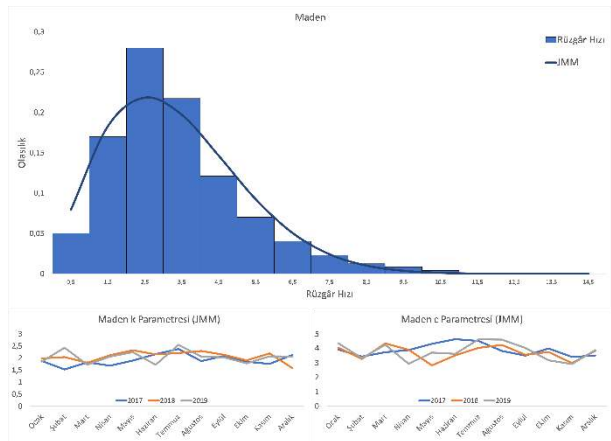
EPFM



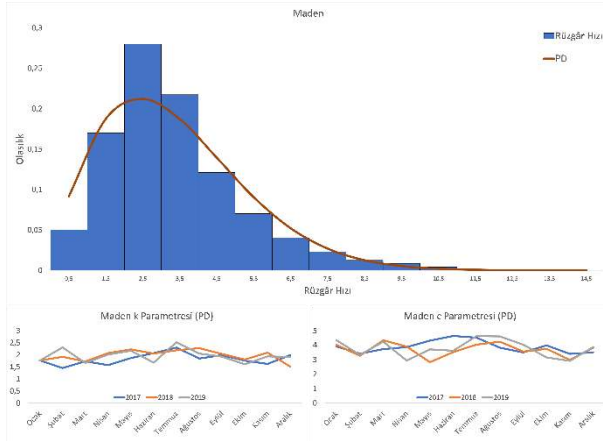
WEIM



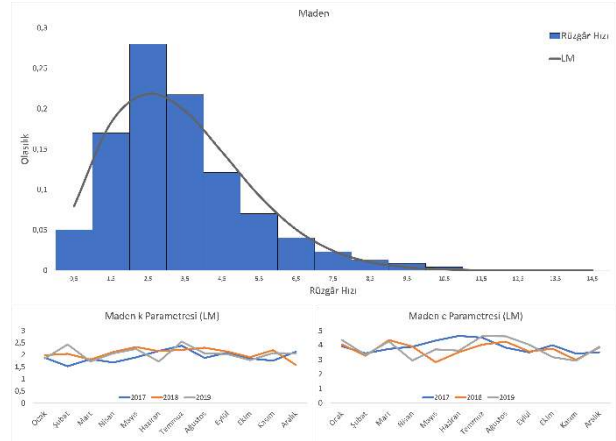
JMM



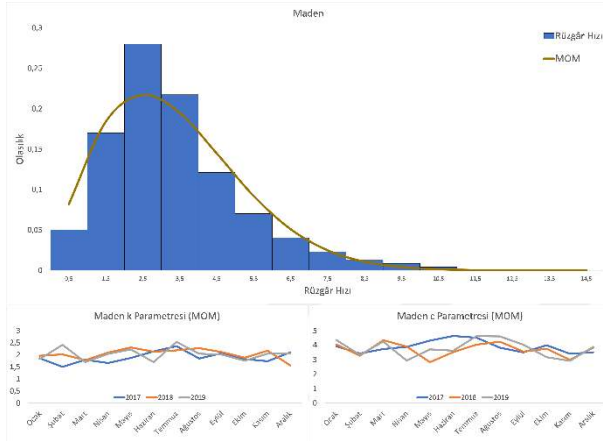
PD



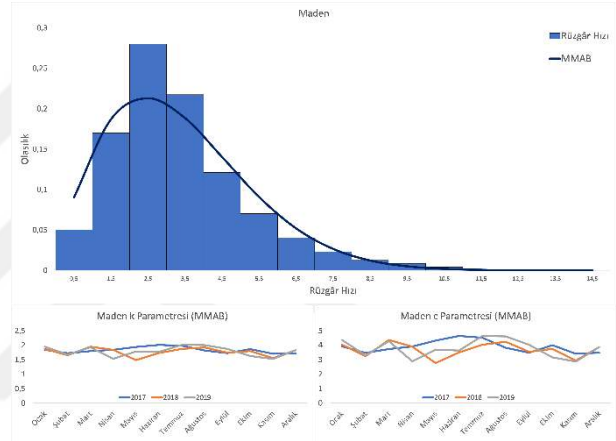
LM



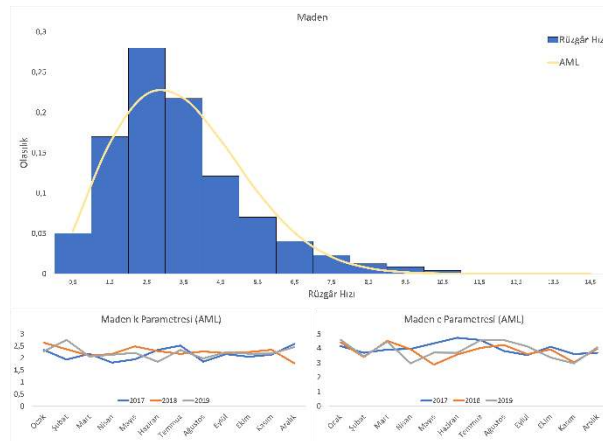
MOM



MMAB

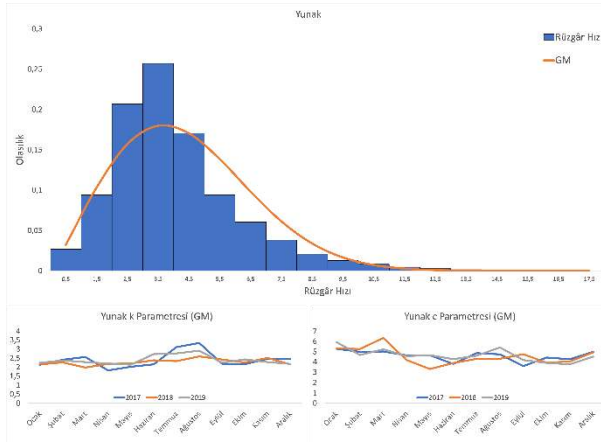


AML

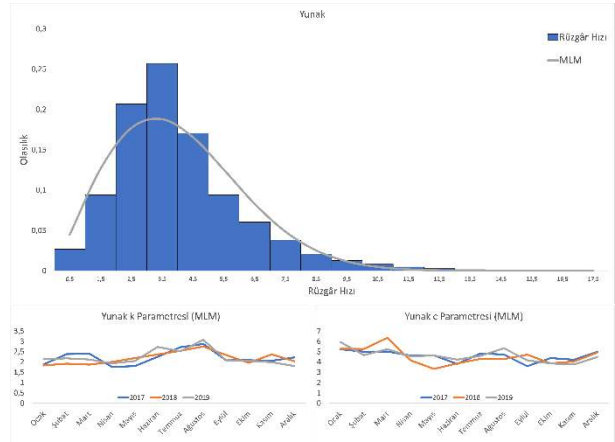


EK-10: Yunak Bölgesi Metotların PDF Grafikleri

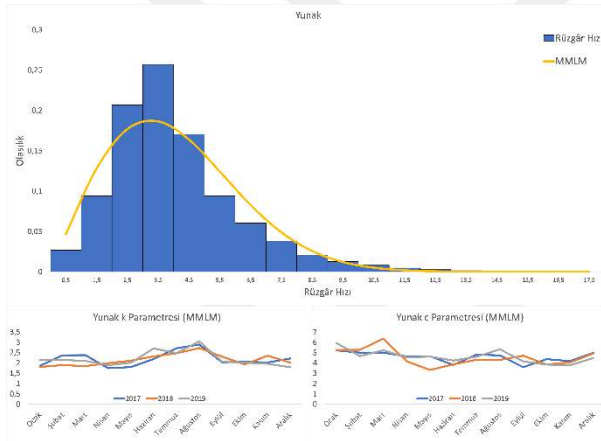
GM



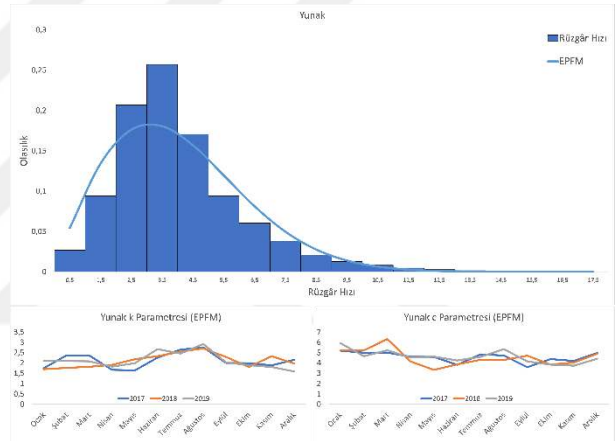
MLM



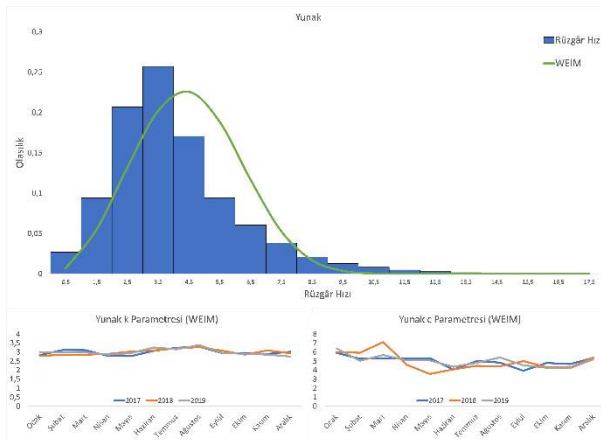
MMLM



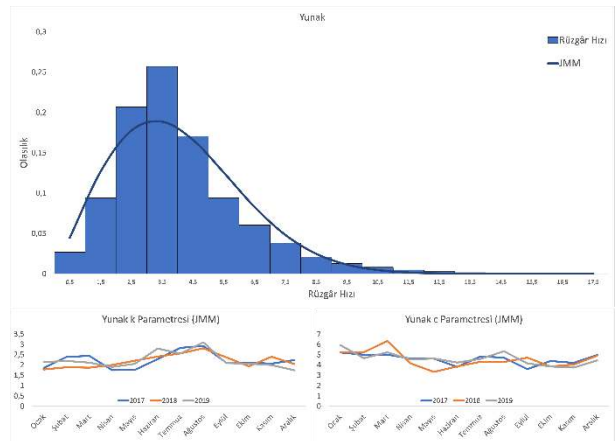
EPFM



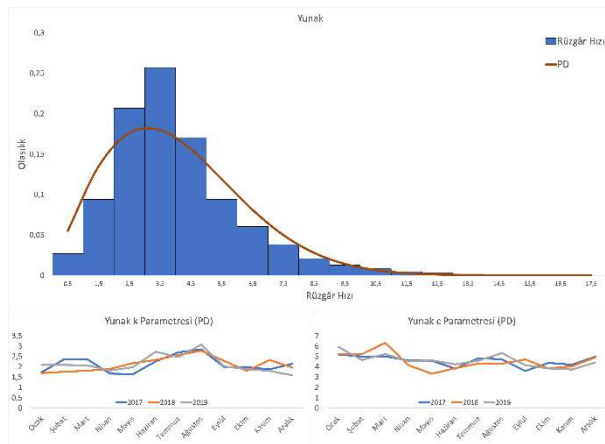
WEIM



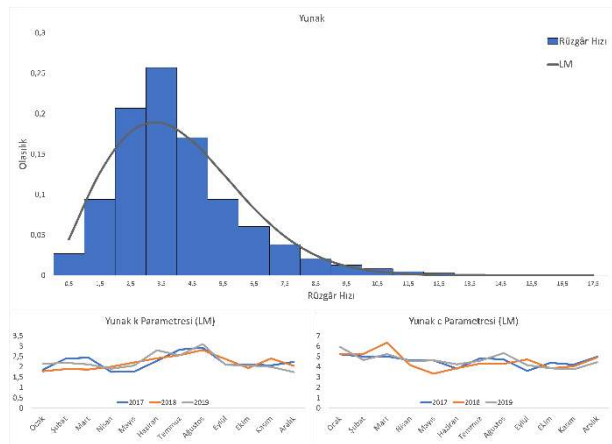
JMM



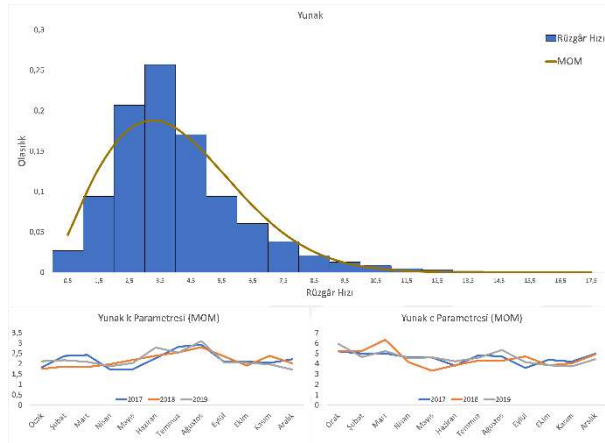
PD



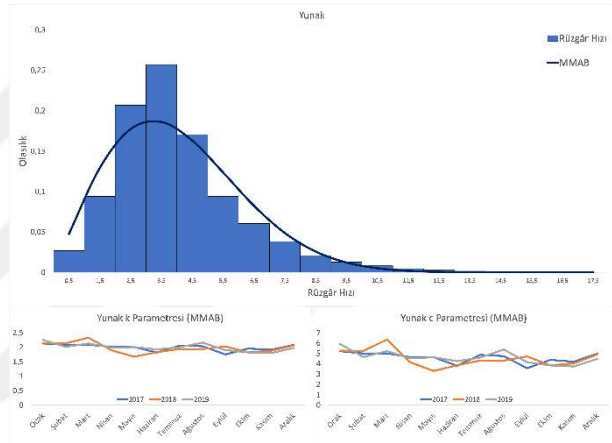
LM



MOM



MMAB



AML

