

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BULANIK MANTIK ve GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMLERİ
KULLANILARAK PARAMETRE BELİRLEME ve ÖLÇEKLENDİRME:
RÜZGAR TÜRBİNİ KURULUM UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Fatih TOPALOĞLU

**TEMMUZ 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında
Fatih TOPALOĞLU Tarafından Hazırlanan**

**BULANIK MANTIK ve GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ KULLANILARAK
PARAMETRE BELİRLEME ve ÖLÇEKLENDİRME: RÜZGAR TÜRBİNİ KURULUM
UYGULAMASI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 /06/2018 gün ve 1759 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan Hüseyin BALIK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN

Üye : Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ

Üye : Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

Üye : Doç. Dr. Metin ZONTUL

[Handwritten signatures of the jury members]

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Rüzgar santrali kurulumu, yatırımcılar ve karar vericiler için önemli bir konu olup, karar verme aşamasında gerek meteorolojik gerekse finansal bir çok parametrenin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kadar kapsamlı ve dinamik bir sürecin basit matematiksel ve aritmetik işlemlerle çözümü sağlıklı sonuçlar sağlamayabilir. Günümüze kadar rüzgar santrali kurulumu için genel kabul görmüş bir skalanın olmaması, değerlendirme sonuçlarının değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere ve kurumlara göre farklılıklar göstermesi ve rüzgar santrali kurulumu ile ilgili sınırlı sayıda bilgiye ulaşılması nedeniyle tez çalışması planlanmış ve tasarlanacak model için de bulanık mantık ve genetik algoritma teknikleri seçilmiştir.

Tez çalışmasında rüzgar santrallerinin kurulumu için gerekli parametrelerin tespiti ve ölçeklendirmesi sağlanılarak karar verme aşamasında temel teşkil edecek bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanmıştır. Böylelikle proje geliştiriciler, karar vericiler, dağıtım şirketleri, rüzgar enerji santrali işletmecileri, rüzgar enerji santrali kurmayı planlayan girişimciler ile rüzgar enerjisi konusunda araştırmalar yapan araştırmacıların ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenmiştir.

Çalışmalarında bilgilerini, desteğini ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Doktora eğitimim boyunca sabır, destek ve sevgileriyle yanımda olan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Fatih TOPALOĞLU

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma Yöntemleri Kullanılarak Parametre Belirleme ve Ölçeklendirme: Rüzgar Türbini Kurulum Uygulaması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/07/2018

Fatih TOPALOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması.....	2
1.3. Tezin Amacı ve Yapısı.....	5
1.3. Enerjinin Tanımı ve Kaynakları	8
1.4. Bulanık Mantık	11
1.4.1. Bulanık Mantık Kavramı.....	12
1.4.2. Bulanık Kümeler.....	14
1.4.3. Üyelik Fonksiyonları.....	15
1.4.3.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu.....	17
1.4.3.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu.....	17
1.4.3.3. Gaussian Üyelik Fonksiyonu.....	18
1.4.3.4. Çan Şekilli Üyelik Fonksiyonu.....	18
1.4.3.5. Sigmodial Üyelik Fonksiyonu.....	19
1.4.3.6. S Üyelik Fonksiyonu.....	19
1.4.3.7. Π Üyelik Fonksiyonu.....	20
1.4.4. Bulanık Kontrol.....	21
1.4.4.1. Bulandırma Birimi.....	23
1.4.4.2. Kural Tabanı.....	23
1.4.4.3. Karar Verme Birimi.....	24
1.4.4.3.1. Mamdani Yöntemi.....	24

1.4.4.3.2.	Larsen Çıkarım Yöntemi.....	25
1.4.4.3.3.	Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Yöntemi.....	26
1.4.4.3.4.	Tsukamoto Yöntemi.....	28
1.4.4.4.	Durulaştırma Birimi.....	29
1.4.4.4.1.	En Büyüklük İlkesi.....	29
1.4.4.4.2.	Ağırlık Merkezi Yöntemi (Centroid Method).....	30
1.4.4.4.3.	Ağırlıklı Ortalama Yöntemi.....	30
1.4.4.4.4.	Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi.....	31
1.4.4.4.5.	Toplamların Merkezi Yöntemi.....	31
1.4.4.4.6.	En Büyük Alanın Merkezi Yöntemi.....	32
1.4.4.4.7.	En Büyük İlk veya Son Üyelik Derecesi Yöntemi.....	32
1.4.5.	Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları.....	33
1.5.	Genetik Algoritma.....	34
1.5.1.	Problemin Genetik Olarak Kodlanması.....	35
1.5.2.	Uygunluk Fonksiyonunun Belirlenmesi.....	36
1.5.3.	Seçim.....	36
1.5.4.	Çaprazlama.....	38
1.5.5.	Mutasyon.....	39
1.5.6.	Durma Kriteri.....	40
1.6.	Wasp Modeli.....	40
1.6.1.	Rüzgar Veri Analizi.....	41
1.6.2.	Topografik Veriler	42
1.6.3.	Güç Üretimi.....	43
1.6.4.	Wake Effect Modelleme.....	44
1.6.5.	Wasp Sınırlamaları.....	45
1.6.6.	WASP Programı Ara Yüzü.....	47
1.7.	Rüzgar Enerjisi.....	47
1.7.1.	Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi.....	47
1.7.2.	Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Türleri ile Karşılaştırılması.....	49
1.7.3.	Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	50
1.7.4.	Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	53
1.7.5.	Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyeli	54
1.7.6.	Rüzgar Türbinleri.....	56

1.7.6.1.	Rüzgar Türbinlerinin Tarihçesi.....	56
1.7.6.2.	Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	58
1.7.6.3.	Rüzgar Türbinlerinin Parçaları.....	60
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	63
2.1.	WASP Yazılımı ile Verilerin Analizi.....	67
2.1.1.	Çalışmada Seçilen Arapgir İlçesinin Coğrafi Durumu.....	69
2.1.2.	Rüzgar Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi.....	70
2.1.3.	Bölgesel Rüzgar Atlasının Oluşturulması.....	77
2.1.4.	Mikro-konuşlandırma ve Türbin Seçimi.....	79
2.1.5.	Bölgenin Kapasite Faktörünün Hesaplanması.....	82
2.1.6.	Verilerin Ekonomik Analizi.....	84
2.2.	Bulanık Mantık Uygulaması.....	89
2.2.1.	Dilsel Değişkenler/Bulanık Değerler Tanımlanması.....	90
2.2.2.	Üyelik Fonksiyonlarının Hazırlanması.....	94
2.2.3.	Farklı Üyelik Fonksiyonlarının Etkilerinin Analizi.....	98
2.2.4.	α -Kesme Tekniği ile Üyelik Fonksiyonu Değer Aralıklarını Tanımlanma..	107
2.2.5.	Bulanık Kural Tabanlarının Hazırlanması.....	112
2.2.6.	Bulanık Çıkarım Sistemi.....	116
2.2.6.1.	Bulanık Tabanlı Karar Sisteminin Tasarlanması.....	116
2.2.6.2.	Mamdani ve Sugeno Çıkarım Yöntemlerinin Uygulanması.....	119
2.2.6.2.1.	Mamdani Tipi Çıkarım Sistemi Tasarlama.....	120
2.2.6.2.2.	Sugeno Tipi Çıkarım Sistemi Tasarlama.....	122
2.3.	Genetik Algoritma Uygulaması.....	124
2.4.	Karar Sonuçlarının Analizi	131
2.4.1.	Sistemin Matlab/Simulink Modelinin tasarlanması.....	132
2.4.2.	Uygulama Sonuçlarının Analizi.....	139
3.	SONUÇLAR.....	144
4.	ÖNERİLER.....	149
5.	KAYNAKLAR.....	151
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BULANIK MANTIK ve GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK
PARAMETRE BELİRLEME ve ÖLÇEKLENDİRME: RÜZGAR TÜRBİNİ KURULUM
UYGULAMASI

Fatih TOPALOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Hüseyin PEHLİVAN
2018, 159 Sayfa

Elektrik üretiminde özellikle rüzgar ve güneş enerjileri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının oldukça düşük olduğu ve bu kaynaklarımızın büyük bir kısmının değerlendirilmeyi beklediği söylenebilir. Rüzgâr enerjisi potansiyelimizden azami ölçüde yararlanmak ve daha fazla rüzgâr santralının elektrik dağıtım/iletim sistemine entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Rüzgar santralleri kurulum sürecinde, proje geliştiriciler ve yatırımcılar gerek meteorolojik gerekse finansal parametreleri birlikte değerlendirmek zorundadır. Ayrıca bu kadar kapsamlı ve dinamik bir sürecin basit matematiksel ve aritmetik işlemlerle çözümü sağlıklı sonuçlar ortaya koymayabilir. Bu durumda değerlendirilecek parametreler için genel kabul görmüş bir skala da mevcut olmadığından, değerlendirme sonuçları, değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere veya kurumlara göre farklılık gösterebilmektedir.

Tez çalışmasında rüzgar santrallerinin kurulumu için gerekli parametrelerin tespiti ve ölçeklendirmesi sağlanarak karar verme aşamasında temel teşkil edecek bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem verilerin hazırlanması, bulanık mantık uygulaması ve karar sonuçlarını değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır. İlk olarak meteorolojik ve finansal verilerin hazırlanması ve analizi sağlanmıştır. İkinci aşamada bulanık kümeler, bulanık kurallar, bulanık çıkarım işlemlerinin gerçekleştirildiği ve genetik algoritma tekniği ile optimizasyonunun sağlandığı bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır. Üçüncü aşamada sistemin Matlab/Simulink modeli tasarlanarak gerçek sistem üzerinde uygulanmış ve bir kurulum faktörü üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini kurulumu, Bulanık mantık, Genetik algoritma, Üyelik fonksiyonu, Bulanık kümeler, Bulanık kural tabanı, Bulanık çıkarım yöntemi, WAsP.

PhD. Thesis

SUMMARY

PARAMETER DETERMINATION AND SCALING USING FUZZY LOGIC AND GENETIC ALGORITHM METHODS: APPLICATION OF WIND TURBINE INSTALLATION

Fatih TOPALOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Öğr.Üyesi Hüseyin PEHLİVAN
2018, 159 Pages

It can be said that the usage rates of renewable energy sources such as wind and solar power in electricity production are very low and that a large part of these resources are waiting to be evaluated. We need to make the most of our wind energy potential and integrate more wind power plants into the electricity distribution / transmission system. In the process of wind power plants installation, project developers and investors have to evaluate both meteorological and financial parameters together. Moreover, such a comprehensive and dynamic process with simple mathematical and arithmetic operations may not produce healthy results. Since there is no generally accepted scale for the parameters to be assessed in this case, the evaluation results may differ according to the persons or institutions performing the evaluation.

In the thesis study, the determination and scaling of the parameters required for the installation of the wind power plants were designed and a fuzzy based decision system which is the basis for the decision making phase was designed. In the second stage, fuzzy sets, fuzzy rules, fuzzy decision system which realized by fuzzy inference process and optimization by genetic algorithm technique are designed. In the second stage, fuzzy sets, fuzzy rules, fuzzy based decision system in which fuzzy inference processes are performed are designed. In the third stage, Matlab / Simulink model of the system was designed and applied on the real system and an installation factor was produced.

Key Words: Wind turbine setup, Fuzzy logic, Genetic algorithm, Membership function, Fuzzy sets, Fuzzy rule base, Fuzzy inference method, WAsP.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tasarlanan sistemin blok diyagramı	6
Şekil 1.2. Tasarlanan sistemin Matlab / Simulink modeli	7
Şekil 1.3. Karar destek sistemine ait detaylı şema.....	8
Şekil 1.4. Bulanık sistemin genel yapısı	13
Şekil 1.5. Klasik ve bulanık küme farkı.....	14
Şekil 1.6. Üyelik fonksiyonunun yapısı.....	16
Şekil 1.7. Üçgen üyelik fonksiyonu	17
Şekil 1.8. Yamuk üyelik fonksiyonu	17
Şekil 1.9. Guassian üyelik fonksiyonu	18
Şekil 1.10. Çan şekilli üyelik fonksiyonu.....	19
Şekil 1.11. Sigmodial üyelik fonksiyonu.....	19
Şekil 1.12. S üyelik fonksiyonu.....	20
Şekil 1.13. Π üyelik fonksiyonu.....	20
Şekil 1.14. Bulanık mantık denetleyicilerinin temel yapısı.....	22
Şekil 1.15. Bulanık mantık denetleyici konfigürasyonu.....	22
Şekil 1.16. Mamdani çıkarım yönteminin gösterimi.....	25
Şekil 1.17. Larsen çıkarım yönteminin gösterimi	26
Şekil 1.18. TSK çıkarım yönteminin gösterimi.....	27
Şekil 1.19. Tsukamoto çıkarım yönteminin gösterimi	28
Şekil 1.20. En büyük üyelik derecesi durulaştırma	29
Şekil 1.21. Sentroid yöntemi ile durulaştırma.....	30
Şekil 1.22. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırması.....	30
Şekil 1.23. Ortalamaların en büyük üyelik durulaştırılması.....	31
Şekil 1.24. Toplamların merkezi durulaştırması	31
Şekil 1.25. En büyük alan merkezi ile durulaştırma	32
Şekil 1.26. İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma	32
Şekil 1.27. Genetik algoritmanın temel çalışma yapısı.....	34
Şekil 1.28. Denklem 1.26'daki problem için örnek birey kodlaması.....	36
Şekil 1.29. Rulet çarkı yöntemi.....	37

Şekil 1.30.	Rank seçim yöntemi.....	37
Şekil 1.31.	Tek noktalı çaprazlama.....	38
Şekil 1.32.	Çift noktalı çaprazlama.....	39
Şekil 1.33.	Mutasyon işlemi.....	39
Şekil 1.34.	WAsP'da analiz edilen bir meteorolojik veri çıktısı örneği.....	42
Şekil 1.35.	WAsP'ın rüzgar türbini çıkışı hesaplama örneği.....	44
Şekil 1.36.	WAsP harita düzenleyicisi	46
Şekil 1.37.	WAsP programı ara yüzü	47
Şekil 1.38.	Heron'un ilk rüzgarla çalışan su pompası	48
Şekil 1.39.	Ülkelere göre rüzgâr enerjisi kurulu gücü (2016, GWEC)	51
Şekil 1.40.	Dünyadaki toplam kurulu kapasite (2013-2017).....	52
Şekil 1.41.	(a) Dünyadaki yeni kurulu kapasite (b) Dünyadaki büyüme oranı	52
Şekil 1.42.	Türkiye'nin kurulu rüzgar enerji gücü.....	53
Şekil 1.43.	Panemone rüzgar türbini.....	57
Şekil 1.44.	Yatay eksenli rüzgar türbini.....	59
Şekil 1.45.	Dikey eksenli rüzgar türbini.....	60
Şekil 1.46.	Modern bir rüzgar türbininin başlıca parçaları	60
Şekil 2.1.	Arapgir ilçesinin uydudan görünümü	69
Şekil 2.2.	Rüzgar ölçüm istasyonunun yeri.....	70
Şekil 2.3.	Bölgeye ait rüzgar gülü.....	72
Şekil 2.4.	Bölgeye ait weibull dağılımı	73
Şekil 2.5.	Rüzgar esme yönlerine göre Hellmann katsayısı değişimi.....	75
Şekil 2.6.	Bölgede hesaplanan ortalama rüzgar şiddeti haritası.....	78
Şekil 2.7.	Bölgenin güç yoğunluğu haritası.....	79
Şekil 2.8.	Rüzgar türbinlerinin mikro-konuşlandırması.....	80
Şekil 2.9.	Türbinlerin mikro-konuşlandırma işlemi.....	81
Şekil 2.10.	Rüzgar santrali kurulumunda kWh maliyet oluşumu	87
Şekil 2.11.	Rüzgar hızına ait üyelik fonksiyonu	91
Şekil 2.12.	Üyelik fonksiyonunun yapısı	94
Şekil 2.13.	(a) Ortalama rüzgar hızına ait üyelik fonksiyonu (b) Ortalama güç yoğunluğuna ait üyelik fonksiyonu (c) Kapasite faktörüne ait üyelik fonksiyonu (d) Meteorolojik fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu	95

Şekil 2.14.	(a) Öz sermaye giriş değerine ait üyelik fonksiyonu (b) Öngörülemez gider değerine ait üyelik fonksiyonu (c) kWh Maliyeti değerine ait üyelik fonksiyonu (d) Finans fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu.....	96
Şekil 2.15.	(a) Meteorolojik fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu (b) Finans fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu (c) Amortisman süresi değerine ait üyelik fonksiyonu (d) Karar fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu.....	97
Şekil 2.16.	Sistemin Matlab/Simulink modeli	99
Şekil 2.17.	(a) Üçgen üyelik fonksiyonu Simulink modeli (b) BMD'nin simulink blok diyagramı	99
Şekil 2.18.	(a) Meteorolojik_fuzzy (b) Ortalama rüzgar hızına ait üçgen üyelik fonksiyonu (c) Ortalama rüzgar hızına ait yamuk üyelik fonksiyonu (d) Ortalama rüzgar hızına ait gaussian üyelik fonksiyonu	100
Şekil 2.19.	Matlab/ Simulink meteorolojik_fuzzy kural tabanı	101
Şekil 2.20.	Üçgen üyelik fonksiyonu sonuç değeri	102
Şekil 2.21.	Üçgen üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim	102
Şekil 2.22.	Yamuk üyelik fonksiyonu sonuç değerleri.....	103
Şekil 2.23.	Yamuk üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim.....	103
Şekil 2.24.	Gaussian üyelik fonksiyonu sonuç değerleri.....	104
Şekil 2.25.	Gaussian üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim.....	104
Şekil 2.26.	Simülasyon sonuçları (a).....	106
Şekil 2.27.	Simülasyon sonuçları (b).....	106
Şekil 2.28.	Bulanık sayı desteği ve kesimi.....	107
Şekil 2.29.	Sayıların Komşuluğu.....	108
Şekil 2.30.	(a) Meteorolojik fuzzy (b) α - kesme tekniği uygulanacak rüzgar hızı üyelik fonksiyonu (c) α - kesme tekniği uygulanacak güç yoğunluğu üyelik fonksiyonu (d) α - kesme tekniği uygulanacak kapasite faktörü üyelik fonksiyonu	109
Şekil 2.31.	Tasarlanan sisteme etki eden meteorolojik parametreler.....	117
Şekil 2.32.	Tasarlanan sisteme etki eden finansal parametreler	117
Şekil 2.33.	Tasarlanan bulanık tabanlı sistem	118
Şekil 2.34.	Tasarlanan sisteme etki eden parametrelerle birlikte gösterimi	119
Şekil 2.35.	(a) Ortalama rüzgar hızı (b) Ortalama güç yoğunluğu (c) Kapasite faktörü (d) Uygunluk faktörü	120
Şekil 2.36.	Mamdani tipi kural tablosu.....	121

Şekil 2.37.	(a) Mamdani tipi FIS'in yüzey görünümü (b) Rüzgar hızı ile uygunluk faktörü (c) Güç yoğunluğu ile uygunluk faktörü (d) Kapasite faktörü ile uygunluk faktörü	121
Şekil 2.38.	(a) Sugeno tipi FIS'in yüzey görünümü (b) Rüzgar hızı ile uygunluk faktörü (c) Güç yoğunluğu ile uygunluk faktörü (d) Kapasite faktörü ile uygunluk faktörü	123
Şekil 2.39.	GA kullanarak optimizasyon için akış şeması	124
Şekil 2.40.	(a) Hata için üyelik fonksiyonu (b) Hata oranı için üyelik fonksiyonu (c) Çıkış için üyelik fonksiyonu	126
Şekil 2.41.	(a) Hata için optimal üyelik fonksiyonu (b) Hata oranı için optimal üyelik fonksiyonu (c) Çıkış için optimal üyelik fonksiyonu	128
Şekil 2.42.	(a) Zamana karşı en iyi yanıt cevabı (b) En iyi performansı gösteren Genetik Algoritma İterasyonu	130
Şekil 2.43.	Bulanık sistem yapısı.....	133
Şekil 2.44.	Simulink çalışma modeli.....	133
Şekil 2.45.	Simulink kütüphane tarayıcısı.....	134
Şekil 2.46.	Simulink kütüphane tarayıcısından parametrelerin seçimi.....	136
Şekil 2.47.	Seçilen blok parametrelerinin boyutlandırılması ve yapılandırılması	136
Şekil 2.48.	Blok girişlerinin ve çıkışlarının bağlanması	137
Şekil 2.49.	Simülasyon parametrelerinin yapılandırılması	137
Şekil 2.50.	M- File dosyası	138
Şekil 2.51.	Optimize edilmemiş sistem analizi.....	140
Şekil 2.52.	Optimize edilmiş sistem analizi	141
Şekil 2.53.	Kurulu RES sistemi analizi.....	143

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri açısından değerlendirilmesi	49
Tablo 1.2. Enerji üretim metotlarının maliyet ömür ilişkisi.....	50
Tablo 1.3. Türkiye'nin farklı bölgelerinde rüzgar enerji potansiyeli	55
Tablo 1.4. Türkiye'nin 50 m yükseklikte iyi - sıra dışı arası rüzgar kaynağı.....	55
Tablo 2.1. Rüzgar verilerinin aylık ortalama değerleri.....	71
Tablo 2.2. Bölgede hesaplanan ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu	71
Tablo 2.3. Sektörlere göre rüzgar frekans bilgileri ile weibull değerleri değişimi...	75
Tablo 2.4. Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklere göre weibull parametreleri	76
Tablo 2.5. Vestas V80'in teknik özellikleri.....	80
Tablo 2.6. 6 adet V80 rüzgar türbinlerinin yıllık üretim değerleri.....	81
Tablo 2.7. 6 adet V80 rüzgar türbinlerine ait üretim ve kayıp değerleri.....	82
Tablo 2.8. Bölgenin kapasite faktörü.....	83
Tablo 2.9. Türbin kurulum maliyeti.....	85
Tablo 2.10. Yıllık Gelir / Gider Tablosu.....	86
Tablo 2.11. Farklı giriş değerine göre üyelik fonksiyonlarının ürettiği sonuçlar.....	105
Tablo 2.12. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan ortalama rüzgar hızı üyelik fonksiyonu aralıkları	110
Tablo 2.13. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan güç yoğunluğu üyelik fonksiyonu aralıkları.....	111
Tablo 2.14. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan kapasite faktörü üyelik fonksiyonu aralıkları	111
Tablo 2.15. Meteorolojik_fuzzy kural tabanı	115
Tablo 2.16. Finansal_fuzzy kural tabanı.....	115
Tablo 2.17. Karar_fuzzy kural tabanı.....	116
Tablo 2.18. Uygunluk faktörü üyelik fonksiyonu.....	122
Tablo 2.19. 180 kural için belirlenen meteorolojik kural tablosu.....	127
Tablo 2.20. Genetik algoritma için kullanılan parametreler	127
Tablo 2.21. Optimize edilmiş meteorolojik kural tabanı	129

Tablo 2.22.	Optimize edilmiş finansal kural tabanı	129
Tablo 2.23.	Optimize edilmiş karar kural tabanı.....	129
Tablo 2.24.	En iyi ölçek faktörleri ve uygunluk fonksiyonu.....	130
Tablo 2.25.	Karova RES ilk kurulum maliyeti.....	142



SEMBOLLER DİZİNİ

RES	: Rüzgar Enerji Santrali
WAsP	: Wind Atlas Analysis and Application Program (Rüzgar Atlası Analizi ve Uygulam Programı)
ETKB	: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
OMGİ	: Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
EWEA	: European Wind Energy Association (Avrupa Rüzgar Enerji Derneği)
GWEC	: Global Wind Energy Council (Küresel Rüzgar Enerji Konseyi)
WWEA	: World Wind Energy Association (Dünya Rüzgar Enerji Derneği)
FL	: Fuzzy Logic (Bulanık Mantık)
YSA	: Yapay Sinir Ağları
GA	: Genetik Algoritma
FLC	: Fuzzy Logic Controller (Bulanık Mantık Denetleyici)
FIS	: Fuzzy Interference System (Bulanık Çıkarım Sistemi)
FRB	: Fuzzy Rule Base (Bulanık Kural Tabanı)
TSK	: Takagi-Sugeno-Kang
ÜF	: Üyelik Fonksiyonu
KF	: Kapasite Faktörü
FAC	: Fuzzy Alpha Cutting (Bulanık Alfa Kesme)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji, ekonomik büyümenin temel girdisidir ve mevcudiyeti ile bir ülkenin büyümesi arasında yakın bir bağ vardır. Enerji, üretim sürecini yürütmek için gerekli olduğu için, ekonomik kalkınma süreci daha yüksek düzeyde enerji tüketiminin kullanılmasını gerektirir. Kişi başına gayrisafi milli hasıla ve enerji tüketimi arasında güçlü bir korelasyon vardır. Bu nedenle enerji ihtiyacındaki artışın karşılanmasında, tükenmeyen/yenilebilir enerji kaynaklarından etkin bir şekilde faydalanmak gerekmektedir.

Yenilenebilir enerjiler temiz, tükenmez ve giderek artan rekabet enerjisidir. Fosil yakıtlardan, çeşitlilikleri, bolluğu ve gezegenin herhangi bir yerinde kullanım potansiyeli bakımından farklıdırlar, ama her şeyden önce, hem sera gazı üretmez ki bu iklim değişikliğine neden olur hem de emisyonları kirletir. Maliyetleri de düşmekte ve sürdürülebilir bir oranda kalmaktadır [1].

Türkiye, son 15 yılda dünyanın en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biri haline gelmiştir. Türkiye'de yenilenebilir enerji son yıllarda devlet teşviklerinin artırılması, yeni düzenlemeler ve rekabetçi teknolojinin küresel yayılımının bir sonucu olarak önemli ölçüde artmıştır. Türkiye'de hidroelektrik santralinin yenilenebilir enerji kaynaklarının payı hariç tutulduğunda, yüzyılın başında yüzde 0,3'ten bugün yüzde 8'e yükselmiş ve yükselmeye devam etmektedir.

Türkiye gerek coğrafi özellikleri, topoğrafyası, gerekse denizlerle çevrili bir ülke olması sebebiyle rüzgar enerjisi potansiyeli açısından çok önemli konumdadır. Türkiye'nin hesaplanan rüzgar enerjisi potansiyeli, 50 metredeki rüzgar hızının 7 m / s'den yüksek olduğu alanlarda üretilen 48.000 MW'lık potansiyelden 130 milyar kWh elektrik üretebilir. Türkiye OECD ülkeleri içinde en yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip ülkedir [2].

2018 yılı itibarıyla Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK)'dan lisans ve ön lisans alan tüm rüzgar enerji santralleri devreye girdiğinde Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü 12.722 MW olacak ve tüketilen elektriğin %12'si rüzgar enerji santrallerinden sağlanacaktır. Ayrıca EPDK'nın 2018 yılı sonuna kadar 3.000 MW daha rüzgar enerji santrali başvurusu kabul etmesi beklenmektedir [3].

Birçok alanda karar sistemi olarak kullanılan yapay zeka tekniklerinin gerek yatırımcıların kaynaklarını garantiye almak, gerekse proje geliştiricilerin süreci doğru yönetebilmeleri için rüzgar türbinlerinin kurulumunda da kullanılması önemli bir alternatif sunmaktadır. Rüzgar santrali kurulumu gibi kapsamlı bir konunun sadece uzman görüşü ve tecrübesiyle değil bilimsel ve teknik bir zeminde değerlendirilmesi şarttır. Yapılan çalışmada karar sisteminin tasarımında yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

Bulanık mantık araştırma, anlam ve hassasiyet arasında iyi bir iş çıkardığı için çok uzun bir süredir kullanılmakta olan bir tekniktir. Bu anlamda, bulanık mantık hem eskidir hem de yenidir, çünkü bulanık mantığın modern ve metodik bilimi hala genç olmasına rağmen, bulanık mantık kavramları insan akıl yürütmesinin yaşlanma becerilerine dayanır.

Benzer şekilde bir rüzgar türbinin kurulumunda meteorolojik ve finansal parametreleri doğru şekilde belirleyip ölçeklendirmek suretiyle sisteme sunulduğunda bulanık mantık sistemi kurulumu dair en doğru kararı bizim için verebilir. Bulanık mantığın sağladığı bazı avantajları anlaşılması kolay, esnek, kesin olmayan verilere toleranslı, uzman deneyimleri üzerine inşa edilebilir olması, geleneksel kontrol teknikleriyle harmanlanabilir olması ve doğal dile dayanması şeklinde sayabiliriz.

1.2. Literatür Taraması

Günümüze kadar rüzgar santrali kurulumu için genel kabul görmüş bir skalanın olmaması, değerlendirme sonuçlarının değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere veya kurumlara göre farklılık göstermesine yol açmaktadır. Aşağıda bugüne kadar yapılmış bazı çalışmalardan bahsedilmiştir.

Yalçın (2010) yaptığı çalışmada, İstanbul İli Terkos Bölgesi'nin rüzgar atlasını oluşturarak bölgede kurulacak bir rüzgar enerjisi santralinin enerji üretim potansiyelini belirlemek üzere üç senaryo hazırlanmıştır. WAsP modeli ile yapılan analizlerde, teze konu olan bölgede 52 m. yükseklikten alınan rüzgar ölçümleri değerlendirilmiş elde edilen sonuçlar yorumlanarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirilmiştir, tasarlanan 3 senaryo için kurulması öngörülen rüzgar santrallerinin maliyet analizleri yapılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen bütün bu sonuçlardan hareketle, İstanbul Terkos bölgesinde kurulması planlanan bir rüzgar santralinin ekonomik olduğunu söylemiştir [4].

Talayoglu (2010) yaptığı çalışmada, WAsP modelini kullanarak seçilen Denizli'nin Tavas ilçesi için rüzgar enerji potansiyeli ve enerji üretim hesaplamalarını yapmıştır. Farklı zaman aralıklarına ait rüzgar verilerinin ve Helmann katsayılarının değişiminin rüzgar enerjisi üretimine etkileri incelemiştir. Bunun yanında, aynı WAsP modeli içerisinde farklı türbin tipleri kullanılarak, bölgeye uygun türbin konumlandırma işlemlerini yapmıştır. WAsP ile yapılan çalışmalara ek olarak, çalışmalarda kullanılan verilerin saatlik, aylık ve mevsimsel olarak analizleri yapılmış, rüzgar yönlerine ve Helmann katsayılarına göre frekans dağılımlarını da içeren değerleri hesaplamıştır. Yapılan tez çalışmasında elde edilen değerlerin rüzgar enerjisi santrali kurulması için gereken değerleri karşıladığını gözlemlemiştir [5].

Güzel (2012) yaptığı Bozcaada ve Gökçeada örnek çalışmalarında WaSP modelini kullanılmıştır. WaSP'ta analizi yapılmak üzere Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Gökçeada ve Bozcaada meteoroloji istasyonlarına ait 1999-2010 tarihleri arasındaki saatlik rüzgar hızı ve yönü verileri temin edilmiştir. Türbin yerleşimi ve ileri analizler için adalara ait sayısal topografik haritalar Shuttle Radar Topography Mission dosyalarının Global Mapper programında vektör haritasına dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. WaSP Map Editor programında sayısal haritalar pürüzlülük, batimetri ve harici alanlar bazında işlenmiştir. İşlenen tüm veriler WaSP'a aktarılmış, rüzgar atlası ve veri haritaları oluşturulmuştur. Fizibilite çalışması için 20m'den sığ, ve 45m'den sığ tüm derinlik kategorilerini kapsayacak şekilde 2 farklı derinlik senaryosu ve her derinlik senaryosunda uygulanacak 4 farklı türbin senaryosu hazırlanmıştır. Her senaryoya göre Bozcaada ve Gökçeada'nın veri haritasında türbin yerleşimleri yapılmış, WaSP aracılığıyla üretilen toplam enerji elde edilmiş, sonrasında kapsamlı bir maliyet çalışması ile fayda-maliyet analizi yapılarak en uygun senaryolar belirlenmiştir. Sonuç olarak bölgede bir Açık Deniz rüzgar tarlasının uygun olup olmadığı ve uygunsa hangi koşullar ve senaryolar altında olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Tezdeki örnek çalışmalardaki geri ödeme süreleri düşük enerji alım fiyatından dolayı uzun olduğu görülmüştür [6].

Yalçın (2007) yaptığı çalışmada, rüzgar enerjisi için uygun yerin seçiminde kullanılacak bulanık analitik hiyerarşi prosesi yöntemini açıkladıktan sonra kriter ve alt kriterleri bulunarak öncelikleri belirlemiş ve istenen hiyerarşik yapıyı kurmuştur. Bu konudaki verimliliği arttırmak ve maksimum çıktıyı sağlayabilmek adına iyi hazırlanmış fizibilite etütleri ve sağlıklı veriler ile minimum yanılma payına ulaşma amacını ortaya koymuştur. Çok kriterli karar verme teknikleri arasında Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

yönteminin, karar verme problemlerinde kullanılan pek çok diğer yöntemle göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerden biri olduğunu ifade etmiştir. Konuyla ilgili uzman kişilerin görüş ve değerlendirmelerine dayanan bu yöntemde, en doğru sonuca varmak için, insani düşünme biçiminden kaynaklanan belirsizliği de hesaba katmak gerektiğinden Bulanık AHP yöntemini tercih etmiştir. Rüzgar enerjisi santral yeri seçimi problemi için ana ve alt kriterleri belirlemiş, istenen hiyerarşik yapıyı oluşturmuş ve bulanık AHP çalışması sonucunda Bölge 1 – 0.35, Bölge 2 - 0.41 ve Bölge 3 – 0.24 ağırlıklarını elde etmiş ve en iyi alternatifin Bölge 2 olduğunu bulmuştur. Çalışmanın son bölümünde alt kriterleri sabit tutmak şartı ile sadece ana kriterleri tek tek arttırmış ve sonuca olan etkilerini incelediğinde değerleri değiştirecek nitelikte ancak seçim sonucunu değiştirmeyecek nitelikte olduğunu belirtmiştir [7].

Ceylan (2006) yaptığı çalışmada, Muğla bölgesinde mermer endüstrisinin elektrik enerjisi talebini karşılamak için, Matlab paket programı ile rüzgar çiftliği tasarım aracı tasarlamıştır. Rüzgar verileri, sekiz farklı rüzgar türbin güç eğrileri ve katalog bilgileri, dört farklı türbin yerleşim verim değerleri, bölgenin topografya bilgileri, MATLAB yazılım programı ile yazılan “Rüzgar Çiftliği Tasarım Aracına” uygulanarak çeşitli analizler yapılmıştır. Çalışmada tasarlanan RTA’da; farklı seçeneklerde rüzgar çiftliklerinde üretilen enerji, kapasite faktörleri, emisyon tasarrufları, birim enerji ve yatırım maliyetleri, rüzgar iklim analizleri yapılmaktadır. Ayrıca, RTA basit ve esnek bir kullanıma sahip olduğunu belirtmiştir. Kullanıcı; türbin çeşitlerini, arazinin özelliğine göre sürtünme katsayısı ve yerleşim verim değerlerini, şebekeye uzaklığına göre elektriksel verim değerini, ülkenin elektrik piyasasına göre sistem kullanım bedelini, enerji hat kayıp oranını, ülkenin faiz oranını, türbin yatırım maliyetlerini ve elektriğin birim satış fiyatı değiştirilerek kendi şartlarına uygun en verimli rüzgar çiftliği tasarımını yapabileceğini belirtmiştir. Rüzgar çiftliği tasarım aracı tek Datça bölgesine özgün olmadığını farklı bölgeler içinde değişkenlerin değiştirilerek rüzgar çiftliği tasarım aracını kullanılabileceğini söylemiştir [8].

Özcan (2011) yaptığı çalışmada, meteorolojik veriler kullanılarak yapay zeka yöntemleriyle Isparta ilindeki mevcut rüzgar potansiyeli tahmin edilmiştir. Ayrıca örnek bir rüzgar türbini santralinin ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışma için Meteoroloji İl Müdürlüğü’nden temin edilen 1975 – 2008 yılları arasındaki aylık rüzgar hızları kullanılmıştır. Temin edilen 408 veriden 79 adedi test için ayrılmıştır. Yapay zeka yöntemiyle tahmin için YSA ve ANFIS metotları kullanılmıştır. YSA metodu kullanılarak

yapılan tahminde Tanjant-sigmoid fonksiyonu kullanılmış ve en iyi sonucun LM12 algoritmasıyla alındığı belirlenmiştir. Bu iki metot arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma neticesinde ANFIS metoduyla elde edilen korelasyon katsayısı değerinin YSA metoduyla elde edilen değere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple ANFIS metodunun yapay zeka yöntemiyle yapılan tahmin için daha uygun olduğu görülmüştür [9].

Literatür taramasından da görüldüğü üzere rüzgar türbini kurulumu ile ilgili araştırmalar daha çok WAsP modeli ile parametrelerin belirlenmesi ve ekonomik analizlerine yönelik iken [4-6] bu çalışmada ele alınan temel konu hesaplanan meteorolojik ve finansal parametrelerin kurulum sürecinde nasıl değerlendirileceğine dair bulanık bir karar sisteminin oluşturulmasıdır. Ayrıca literatür taramasındaki karar ve tahmin sistemlerinden [7-9] farklı olarak karar sürecinde insan temelli hataları minimuma indirebilmek için karar sisteminde farklı üyelik fonksiyonlarının analizi, farklı çıkarım sistemlerinin analizi ve en önemlisi bulanık kural tabanının Genetik Algoritma ile optimizasyonunu içermesi ve bu başarı düzeyini diğer yöntemlerle karşılaştırmaktır. Bu sistemi geliştirirken bulanık mantık ve genetik algoritma gibi yapay zeka tekniklerinden yararlanılmış ve rüzgar türbini kurulum aşamasında geliştiriciler ve firma yetkilileri için temel teşkil edecek bir ölçek/skala tasarlanması hedeflenmiştir.

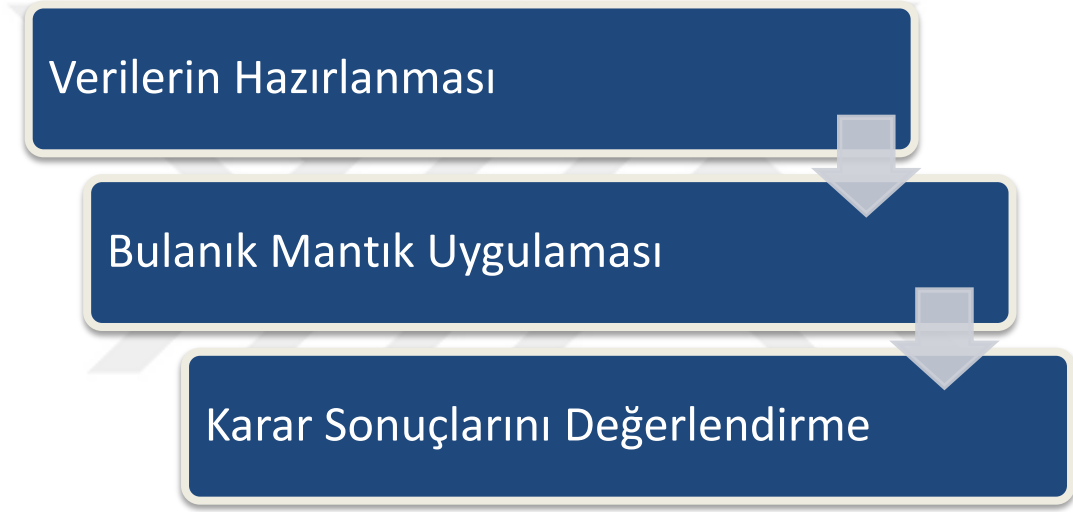
1.3. Tezin Amacı ve Yapısı

Rüzgar santrali kurulumu, yatırımcılar ve karar vericiler için önemli bir konu olup, karar verme aşamasında gerek meteorolojik gerekse finansal bir çok parametrenin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kadar kapsamlı ve dinamik bir sürecin basit matematiksel ve aritmetik denklemlerle çözümü sağlıklı sonuçlar sağlamayabilir. Halbuki proje geliştiriciler ve yatırımcılar, kaynaklarını, zaman ve parayı, en doğru şekilde kullanabilmeleri ve süreci doğru yönetebilmeleri için genel resmi görebilmeleri, olası teknik ve ticari riskleri baştan belirlemeleri şarttır.

Günümüze kadar rüzgar santrali kurulumu için genel kabul görmüş bir skalanın olmaması, değerlendirme sonuçlarının değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere ve kurumlara göre farklılıklar göstermesi ve rüzgar santrali kurulumu için bulanık mantık kullanımına ilişkin sınırlı sayıda bilgiye ulaşılması nedeniyle tez çalışması planlanmış ve tasarlanacak model için bulanık mantık ve genetik algoritma yöntemleri uygulanmıştır.

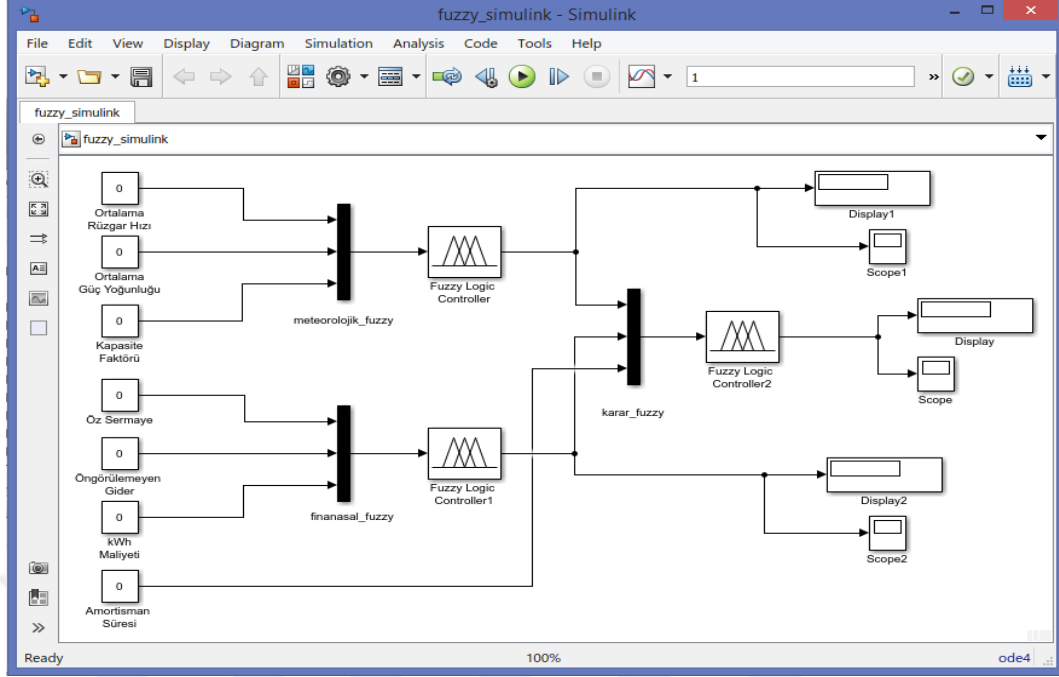
Tez çalışmasında rüzgar santrallerinin kurulumu için gerekli parametrelerin tespiti ve ölçeklendirmesi sağlanılarak karar verme aşamasında temel teşkil edecek bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanmıştır. Böylelikle proje geliştiriciler, karar vericiler, dağıtım şirketleri, rüzgar enerji santrali işletmecileri, rüzgar enerji santrali kurmayı planlayan girişimciler ile rüzgar enerjisi konusunda araştırmalar yapan araştırmacıların konu hakkında teknik bilgi ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenmiştir.

Tasarlanan karar sistemi bir çok aşamadan ve üç farklı fuzzy sistemin birleşiminden oluşan kapsamlı bir sistemdir. Tasarlanan sisteme ait blok diyagramı Şekil 1.1'de, Matlab/Simulink modeli Şekil 1.2'de ve detaylı akış şeması Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tasarlanan sistemin blok diyagramı

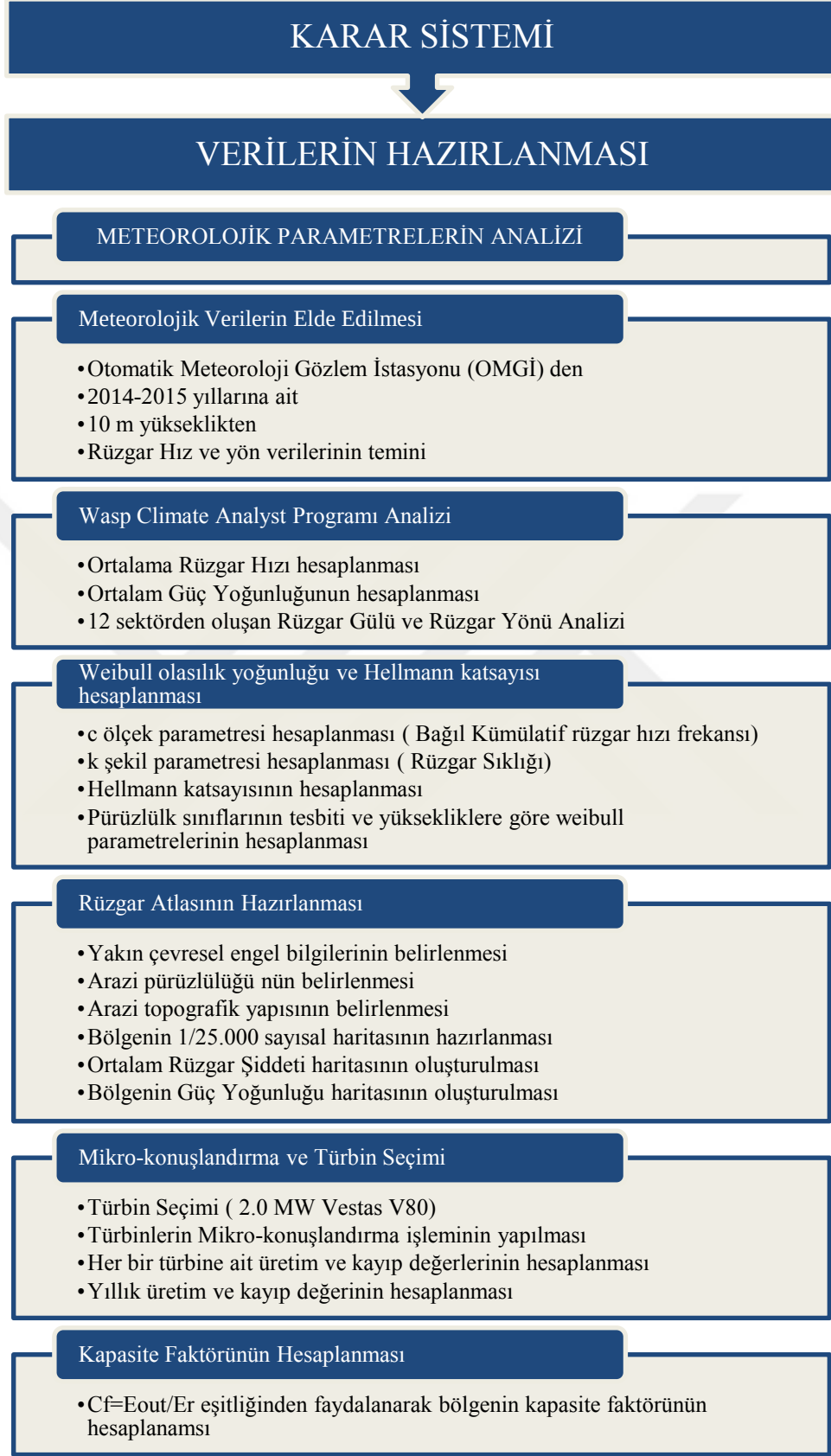
Şekil 1.1'de tasarlanan karar sistemine ait blok diyagram verilmiştir. Tasarlanan sistem verilerin hazırlanması, bulanık mantık uygulaması ve karar sonuçlarını değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır. İlk olarak verilerin hazırlanması aşamasında meteorolojik ve finansal verilerin hazırlanması ve analiz edilmesi yapılmıştır. İkinci aşamada bulanık kümeler, bulanık kurallar, bulanık çıkarım işlemlerinin gerçekleştirildiği bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise sistemin Matlab/Simulink modeli tasarlanarak gerçek sistem üzerinde uygulanmış ve bir kurulum faktörü üretilmiştir.



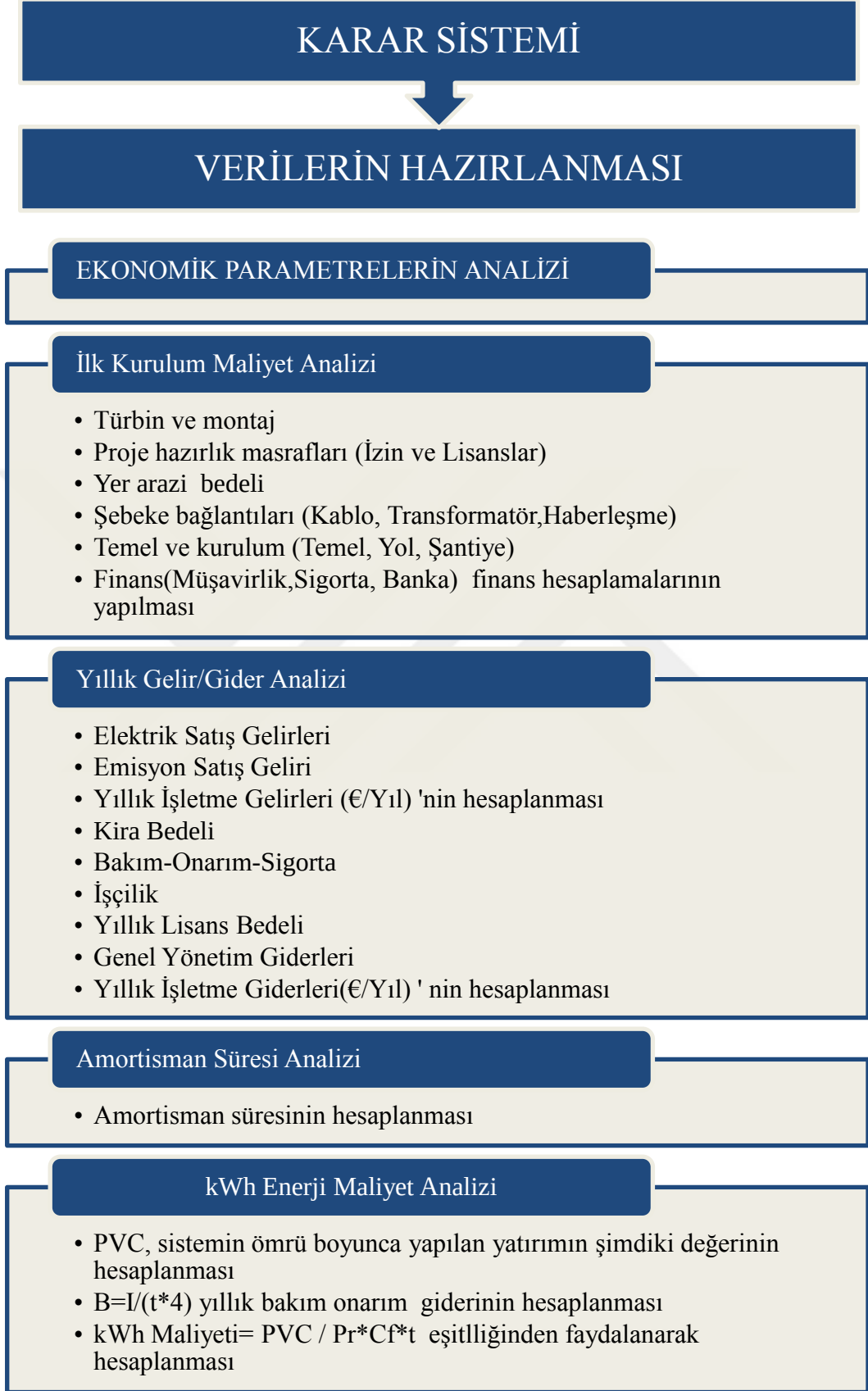
Şekil 1.2. Tasarlanan sistemin Matlab / Simulink modeli

Şekil 1.2'de sisteme ait Matlab/simulink modeli verilmiştir. Modelde, meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip meteorolojik_fuzzy, finansal tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip finansal_fuzzy ve bu iki fuzzy sisteminin çıkışı ile ek parametrelerin değerlendirileceği ve çıkış parametresinin karar verme aşamasında kurulum faktörü olarak kullanacağımız kural tabanına sahip karar_fuzzy bulanık sistemlerinden oluşmaktadır.

Sisteme etki eden parametreler ve giriş çıkış değişkenleri şu şekilde tanımlanmıştır: meteorolojik_fuzzy sisteminde, ortalama rüzgar hızı X_1 , ortalama güç yoğunluğu X_2 ve kapasite faktörü X_3 giriş değerlerine karşın Y_1 çıkış değeri üretmektedir. Finans_fuzzy sisteminde, öz sermaye X_4 , öngörülemez gider X_5 ve kWh maliyeti X_6 giriş değerlerine karşın Y_2 çıkış değerini üretmektedir. Karar_fuzzy sisteminde, meteorolojik_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y_1 , finans_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y_2 ve amortisman süresi X_7 giriş değerlerine karşın Y_3 çıkış değerini üretmektedir. Tasarlanan sistem Matlab/Simulink ile gerçek veriler üzerinde iki şekilde analiz edilmiştir. İlk olarak literatür taraması ve uzman görüşü alınarak hazırlanan kural tabanlarından oluşan sistemin analizi, ikincisi ise Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilen kural tabanlarından oluşan sistemin analizidir.



Şekil 1.3. Karar destek sistemine ait detaylı şema



Şekil 1.3.'ün devamı



Şekil 1.3.'ün devamı

Şekil 1.3'de tasarlanan karar sistemine ait işlemler daha detaylı görülmektedir. Bu şekilde çalışmanın kapsamı ve akışı daha iyi anlaşılmaktadır. Sonraki bölümlerde akışta yer alan kısımlar detaylı bir biçimde anlatılacaktır.

1.4. Bulanık Mantık

İnsan zihni, her zaman açık bir ölçüm ve hesaplama kullanmadan çok çeşitli fiziksel ve zihinsel görevleri koordine etme konusunda olağanüstü bir yetenek göstermiştir. 1950'lerin başından beri, zekanın bilimsel bir teorisinin gelişmesine ve algı, biliş ve davranış sistemlerine uygun beyinsel bir yapay modelin geliştirilmesine yönelik önemli çabalar sarf edilmiştir. 1965 yılında Lotfi A. Zadeh, $[0.0, 1.0]$ aralığında ki sayılarla ifade ettiği teorisinin adına "Bulanık Mantık" ismini vermiştir [10].

Başlangıçta, bulanık mantık teorisi, olağandışı belirsizliği nedeniyle mühendislik alanlarında akran topluluğu tarafından iyi karşılanmadı. Bununla birlikte, 1970'den bu yana, kontrol uygulamalarında, birbirini izleyen kilometre taşlarını tesis ederek yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bulanık mantık uygulamaları iki değerli kuvvetli bir alternatif sunmuştur [11].

İlkeleri, 1974 yılında Londra Üniversitesi'nde Mamdani tarafından laboratuvar yapımı bir buhar makinesini kontrol etmek için kullanıldı ve ilk endüstriyel uygulama 1979'da Danimarka'da inşa edilen bir çimento fırın kontrolörü oldu.

ABD'de doğmuş ve Avrupa'da teorik olarak doğrulanmış olmasına rağmen, Japonya'da birkaç Japon şirketi, toplumda yüksek etkiyle başarılı pratik uygulamalara öncülük etmiştir. En ünlü projelerden biri, Hitachi'nin Japonya'nın Sendai kentindeki bir metro kontrolünü bulanık bir sisteme devretmesiyle 1987 yılında sunuldu.

Bulanık kontrol teknikleri, trenin kontrol sisteminin hızlandırma, kesme ve durdurma işlemleri gibi tüm kritik işlemlerinde, aynı zamanda trafik planlamasında ve müşterinin metro tesislerinin kullanımının tahmin edilmesinde de kullanılmıştır. 1987'de Yamakawa, tersine çevrilmiş bir sarkaç deneyine uygulayan başarılı bir kontrolör geliştirdi [12].

Birkaç yıl sonra, NASA, Ticari Buzdolabı İnkübatörünü taşımıştır. Deneysel bir yük olarak modül, önceden programlanmış bir profile göre bir test odasının hava sıcaklığının kontrolüne başarılı bir şekilde izin vermiştir [13]. O zamandan beri, birkaç şirket, yüzlerce ev donanımını kontrol etmek, karar verme sistemleri uygulamak ve klima,

video kamera, televizyon, çamaşır makinesi, otobüs zaman çizelgeleri gibi günlük hayatımızda bulunan birçok elektronik cihazın performansını iyileştirmek için rol modeli insan beyni olan bulanık mantık kullanmaktadır [14].

1.4.1. Bulanık Mantık Kavramı

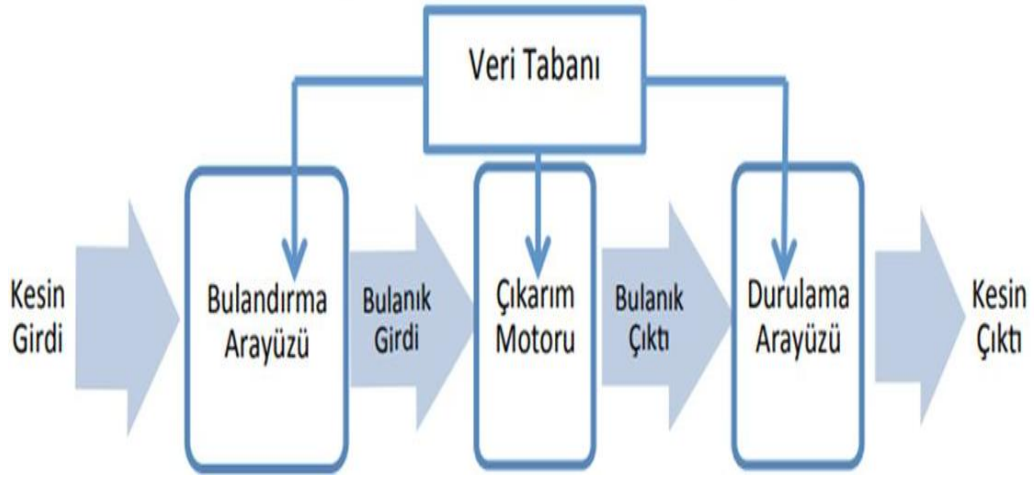
Öncelikli olarak belirsizlikler ve kararsızlıklar, bir karar sürecinin dezavantajı olarak görülebilir, ancak insanların seçimleri hızlı bir şekilde yapmalarını sağlayan önemli bir sıkıştırma mekanizmasıdır. Bu tür araçlar olmaksızın, bir karar almak hiç bitmeyen bir süreç olacaktır. Bu, bilginin çok küçük parçalarını ve ilgili birleşimlerinin dikkate alınmasını gerektirir.

Zadeh, 1965'te bu problemle karşı karşıya kaldı ve onun belgesinde, hesaplama nesnelerinin doğal dilden alınan sözcükler ve önermeler olduğu bulanık mantık olarak bilinen bir metodolojinin temel taşı yerleştirdi. Boolean mantıksal sonuçları “0 ve 1” değerleri ile sınırlandırılırken, bulanık mantık ilk kez mutlak doğru ve mutlak yanlış değerleri arasındaki ara sonuçları verimli bir şekilde işlemek için bir hesaplama çerçevesi tanımlar [15].

Bulanık bilgi temsili, net bir ölçümü bir dilsel etikete ait bir dereceye dönüştürmenin basit bir yolundan daha fazlası olmayan bulanık kümelere dayanmaktadır [16]. Bu, bulanık kümelerin, her kavramın atıfta bulunduğu belirli sıcaklık aralıklarını bilmeden “çok soğuk”, “soğuk”, “sıcak”, “çok sıcak” gibi günlük yaşamda ele aldığımız bazı kavramları ele alabileceği anlamına gelir [17]. Bu nedenle, bulanık mantık, gerçeklerin derecelerine ve dilsel değişkenlerin kullanımına duyulan güveni nedeniyle insan düşüncesine daha çok benzemektedir.

Dilbilimsel bilgiyi manipüle etmenin en çok tercih edilen yöntemlerinden biri, If-Then kurallarına dayanan bulanık mantık sistemleri kullanmaktır; bu, insan algısı ve düşüncesine daha yakın bir yerde modelleri geliştirmek ve algoritmaları kontrol etmek için kolaylıkla kullanılabilen bir yöntemdir.

Bazen If-Then kurallarını kompakt cebirsel işlemleri kullanarak tanımlamak zordur. Bununla birlikte, bu yaklaşım problemin yüksek bir boyutluluğa sahip olduğu durumlarda özellikle yararlıdır. Sistemi tanımlamak için kullanılan mevcut kuralların sayısı o kadar yüksektir ki, bu hesaplama, verimsiz bir süreç ile sonuçlanabilir. Bulanık sistemin genel yapısı Şekil 1.4'de gösterilmektedir.



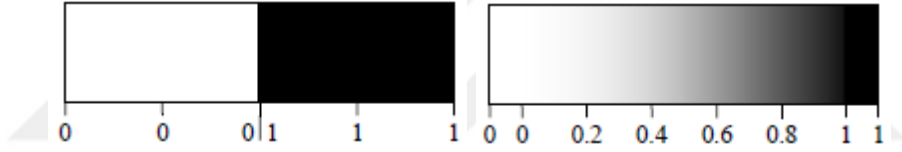
Şekil 1.4. Bulanık sistemin genel yapısı

Tipik bir bulanık sistem kural tabanını, üyelik fonksiyonunu ve çıkarım prosedürünü içermektedir [18]. Bulanık mantık sistemleri genellikle iki ana çıkarım çerçevesi etrafında geliştirilmiştir: Mamdani ve Takagi-Sugeno yöntemleri. İki yöntem arasındaki farklara rağmen, doğrusal olmayan bulanık kümeler, dilsel etiketleri modellemek için kullanıldığında modelleme ve kontrol teknikleri için destek olarak kullanıldıklarında, büyük önem taşıyan bir özellik olan evrensel yeteneklerine sahip doğrusal olmayan yapılar haline gelirler [19]. Bulanık mantık sistemler dört ana elemandan oluşur:

- Bir Bulanık Küme tarafından tanımlanan bulanık bir alana net bir sayı gösteren bir arabirim olan bulanıklaştırıcı.
- Bulanık mantık sisteminin kalbi olan ve uzmanlar tarafından verilen ya da sayısal verilerden elde edilen bilgilerden oluşan kural tabanı, genellikle bir If-Then ifadesi olarak düzenlenir.
- Bulanık Kümeleri işlemek için gerekli olan cebirleri uygulayan mekanizma olan çıkarım birimi. İnsanların birçok çıkarımsal prosedürü kullandığı gibi, bulanık mantıkta bunu yapmak için birkaç yöntem vardır. Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım mekanizmaları en popüler iki tanesidir.
- Bulanık mantık sisteminin son aşaması olan durulaştırıcı birim. Bulanık mantık sisteminde uygulama senaryosuna uygun tek bir net değere toplamak için kusurlaştırma prosedürlerini uygular.

1.4.2. Bulanık Kümeler

Zadeh ve Goguen tarafından bulanık küme teorisindeki ilk yayınlar, bir kümenin klasik kavramını ve uyum sağlama önerisini genelleme niyetini göstermektedir. İnsan dilinde, yani insan kararında, değerlendirmede ve kararlarda yer alması anlamında bulanıklıktır. Bulanık küme kavramı, sıradan kümeler halinde kullanılan çerçeveye birçok açıdan paralel olan kavramsal bir çerçevenin inşası için uygun bir çıkış noktası sağlar, ancak bu durum, ikincisinden daha geneldir ve potansiyel olarak, özellikle desen sınıflandırması ve bilgi işleme alanlarında daha geniş bir uygulanabilirliğe sahip olduğunu kanıtlayabilir. Esasen, böyle bir çerçeve, belirsizlik kaynağının rastgele değişkenlerin varlığından ziyade keskin bir şekilde tanımlanmış sınıf üyeliği ölçütlerinin bulunmadığı problemlerle baş etmenin doğal bir yolunu sunmaktadır. Şekil 1.5'de klasik ve bulanık küme farkını göstermektedir.



Şekil 1.5. Klasik ve bulanık küme farkı

Bulanık küme teorisi bir kesin matematiksel çerçeve (bulanık küme teorisi hakkında bulanık bir şey yoktur!) belirsiz kavramsal fenomenlerin tam olarak ve titizlikle çalışıldı. Ayrıca, bulanık ilişkilerin, kriterlerin ve fenomenlerin var olduğu durumlar için de uygun olan bir modelleme dili olarak düşünülebilir.

Bu teorinin kabulü, geçen yüzyılda 1960'larda ve 1970'lerde yavaş yavaş büyüdü. Bununla birlikte, 1970'lerin ikinci yarısında, bulanık kontrol (ısıtma sistemleri, çimento fabrikaları, vb.) olarak adlandırılan bulanık hiyerarşik sistemlerle teknolojik süreçlerin kontrolünde ilk başarılı pratik uygulamalar, bu alandaki ilgiyi önemli ölçüde artırdı. Uygulamalar, yıkama makinelerinde, videolarda, kameralarda, vinçlerde, metro trenlerinde ve benzeri yerlerde. Japonya, 1980'lerde daha fazla ilgi ve araştırmayı tetikledi, böylece 1984'te yaklaşık 4000 yayın yapıldı ve 2000'de 30.000'den fazla. Kabaca söylemek gerekirse, son on yıllarda bulanık küme teorisi iki çizgi boyunca gelişmiştir:

Birincisi, biçimsel bir teori olarak, daha sofistike ve daha belirgin hale gelip özgün fikirler ve genişlemelerle büyütülen, cebir, grafik teorisi, topoloji, vb. Gibi klasik matematiksel alanların “genelleştirilmesi” veya “bulanıklaştırma” gibi kavramlarla genişlettiği biçimsel bir teori olarak. Bu gelişme hala devam ediyor.

İkincisi, uygulama odaklı bir 'bulanık teknoloji' olarak, bir çok durumda mevcut yöntemlerden üstün olduğu kanıtlanmış modelleme, problem çözme ve veri madenciliği için bir araç olarak ve diğer durumlarda klasik yaklaşımlara çekici 'eklenti' olarak.

1992'de, Avrupa, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde üç eşzamanlı konferansta, bulanık küme teorisi, sınır ağları ve evrimsel hesaplama (genetik algoritmalar) üç alanı güçleri birleştirdi ve bundan sonra hesaplama zekasıyla bilinir oldu.. Benzer şekilde, “yumuşak bilgi işlem” terimi, esas olarak belirsizlik ve belirsizlikle uğraşan birçok yaklaşım için kullanılır.

Bulanık bir işlev, klasik işlev kavramının genelleştirilmesidir. Klasik bir fonksiyon f , fonksiyonun tanımının D alanının bir boşluk S 'ye eşlenmesidir; $f(D) \subseteq S$, f aralığı olarak adlandırılır. Bir fonksiyonun klasik kavramının farklı özellikleri, net olmaktan ziyade bulanık olarak düşünülebilir. Bu nedenle, bir fonksiyonun klasik kavramının farklı “derece” inkar edilmesi akla yatkındır:

- Alanın bulanıklığını taşıyan bulanık bir kümeden net bir haritalama olabilir ve bu nedenle bulanık bir set oluşturur. Kesin bir argümanın görüntüsü yine net olacaktır.
- Haritanın kendisi bulanık olabilir, böylece net bir argümanın görüntüsünü bulanıklaştırır. Bu normalde bulanık bir işlev olarak adlandırılır.
- Olağan işlevler, sınırlamalara sahip olabilir ya da bulanık kısıtlamalarla kısıtlanabilir.

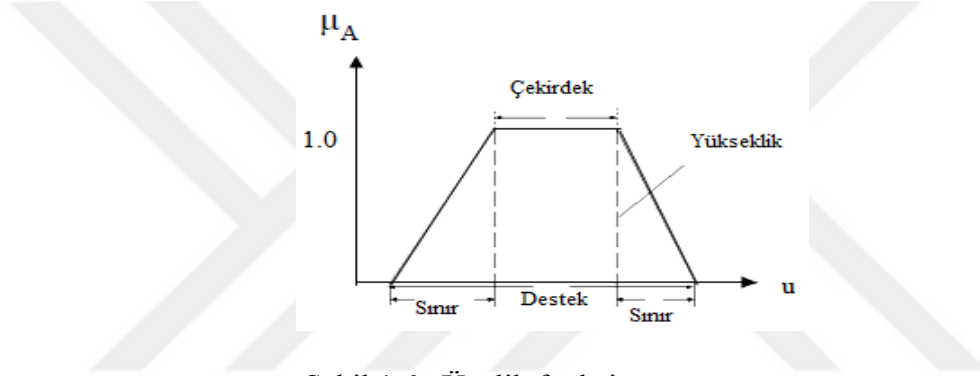
Bulanık fonksiyonların ekstremisi, bulanık fonksiyonların integrali, keskin bir aralıkta bütünleşme, bulanık bir aralıkta gevrek bir fonksiyonun bütünleştirilmesi, bulanıklığın farklılaşması ve benzerleri gibi klasik analiz kavramları için tanımlar.

1.4.3. Üyelik Fonksiyonları

Bir üyelik işlevi, her bir öğeye karşılık gelen üyelik değerini veya üyelik derecesini atayarak bulanık kümenin özelliğini tanımlayan bir eğridir. Giriş alanındaki her noktayı kapalı birim aralığında $[0,1]$ bir üyelik değeriyle eşler [20]. Şekil 1.6, genel üyelik fonksiyonu eğrisini göstermektedir.

Yatay eksen, giriş değişkenli bir x 'i temsil eder ve dikey eksen, x giriş değişkeninin karşılık gelen üyelik değerini $\mu(x)$ tanımlar. Üyelik fonksiyonu eğrisinin desteği, Giriş değişkeni sıfır olmayan üyelik değerine sahip olacaktır.

Bu şekilde, x noktası a ve d noktası arasında herhangi bir nokta olduğunda $\mu(x) \neq 0$. Üyelik fonksiyonu eğrisi, giriş değişkeni x 'in tam üyelik derecesine sahip olduğu aralığı ($\mu(x) = 1$) yorumlarken, diğer bir deyişle $[b, c]$ aralığındaki keyfi nokta tamamen bulanık bir kümeye aittir. Bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonunun yapısı Şekil 1.6'daki gibi göbek, sınırlar ve bunların birleşimi olan mevcut kısım, destek olmak üzere 3 kısımdan oluşur [21].



Şekil 1.6. Üyelik fonksiyonunun yapısı

Şekle bakılmaksızın, tek bir üyelik fonksiyonu sadece bir bulanık set tanımlayabilir. Genellikle, tek bir giriş değişkenini tanımlamak için birden fazla üyelik fonksiyonu kullanılır. Örneğin, otomobilin yakıt tüketimini ele alarak, tüm durumu temsil etmek için, bulanık kümeler olan "Düşük", "Orta" ve "Yüksek" olan üçlü bulanık bir sistem uygulanabilir.

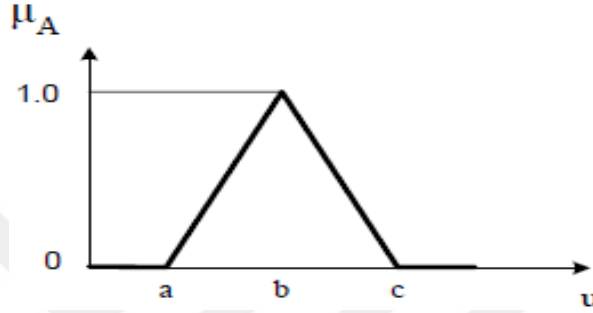
Fonksiyonların grafikleri farklı şekillere sahip olabilir ve belirli özelliklere sahip olabilir. Belirli bir şeklin uygun olup olmadığı sadece uygulama bağlamında belirlenebilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, bulanık kümeler tarafından yakalanan anlam semantiği, şekildeki değişikliklere karşı çok hassas değildir ve basit işlevler uygundur.

Yapay sinir ağları, sezgi, genetik algoritma, açılı bulanık küme ve çıkarım bulanık mantık üyelik fonksiyonları belirlemede kullanılan yöntemler arasında sayılabilir [22]. Birçok pratik örnekte, bulanık kümeler, parametrelili fonksiyonların aileleri tarafından açıkça temsil edilebilir, en yaygın olanları üçgen, trapez, gauss, genelleştirilmiş bell ve sigmoidal üyelik fonksiyonlarıdır [23].

1.4.3.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.7’de gösterilen üçgen üyelik işlevi $u: X \rightarrow [0, 1]$, üç parametre ile verilir. Üçgen üyelik fonksiyonu için kullanılan denklem 1.1’de görüldüğü gibidir.

$$A_{\Delta} = \max\left(\min\left(\frac{x-x_1}{x_T-x_1}, \frac{x_2-x}{x_2-x_T}\right), 0\right) \quad (1.1)$$

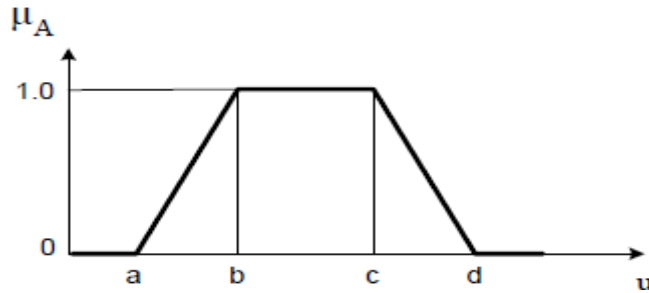


Şekil 1.7. Üçgen üyelik fonksiyonu

1.4.3.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.8’de gösterilen yamuk üyelik fonksiyonu, $u: X \rightarrow [0, 1]$, aşağıdakilere göre dört parametre ile verilir. Yamuk üyelik fonksiyonu için kullanılan denklem 1.2’de verilmektedir.

$$A_{\gamma} = \max\left(\min\left(\frac{x-x_1}{x_{T1}-x_1}, 1, \frac{x_2-x}{x_2-x_{T2}}\right), 0\right) \quad (1.2)$$



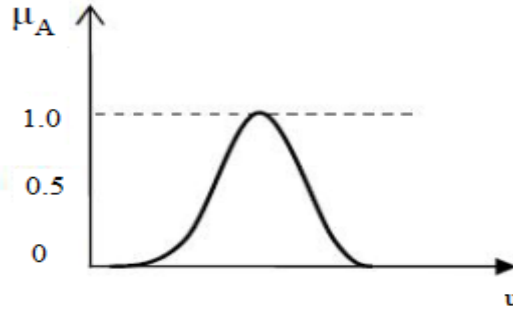
Şekil 1.8. Yamuk üyelik fonksiyonu

1.4.3.3. Gaussian Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.9'da m ve σ parametreleri ile tanımlanan Gaussian fonksiyonu $u: \rightarrow [0, 1]$ için üyelik tanımı iki parametre ile verilir. Gaussian üyelik fonksiyonu için kullanılan bağıntı denklem 1.3'de verilmektedir.

$$\mu_A(X, m, \sigma) = \exp\left\{\frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right\} \quad (1.3)$$

Mid orta noktadır ve a eğimli değeri yansıtır. b pozitif olmalı ve fonksiyonun hiç bir zaman sıfıra ulaşmadığını unutmayın. Gaussian fonksiyonu farklı sol ve sağ slooplara sahip olacak şekilde genişletilebilir.



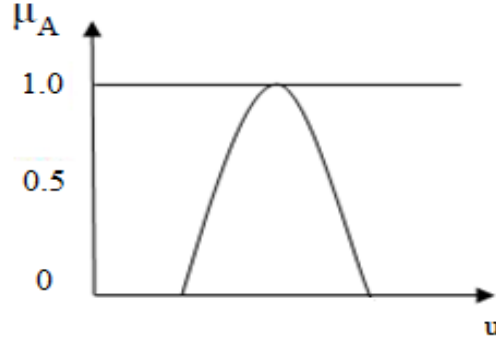
Şekil 1.9. Gaussian üyelik fonksiyonu

1.4.3.4. Çan Şekilli Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.10'da gösterilen çan eğrisi fonksiyonu a , b ve c ile temsil edilen üç parametre ile tanımlanır. Çan şekilli üyelik fonksiyonu için kullanılan bağıntı denklem 1.4'de verilmektedir.

$$\mu_A(u; a, b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left| \frac{u-c}{a} \right|^{2b}} \right\} \quad (1.4)$$

Burada b parametresi genellikle pozitif değer almaktadır. a ve c değerlerinde değişiklik yapılarak fonksiyonun genişliği ve merkezi değiştirilebilmekte ve b değeri geçiş noktalarındaki eğimi kontrol etmektedir.

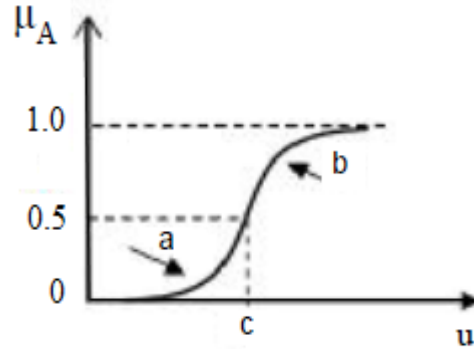


Şekil 1.10. Çan şekilli üyelik fonksiyonu

1.4.3.5. Sigmodial Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.11’de gösterilen Sigmodial üyelik fonksiyonu a ve b olmak üzere iki parametre ile tanımlanır. Sigmodial üyelik fonksiyonu için kullanılan bağıntı denklem 1.5’de verilmektedir.

$$\mu_A(u; a, b) = \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \right\} \quad (1.5)$$



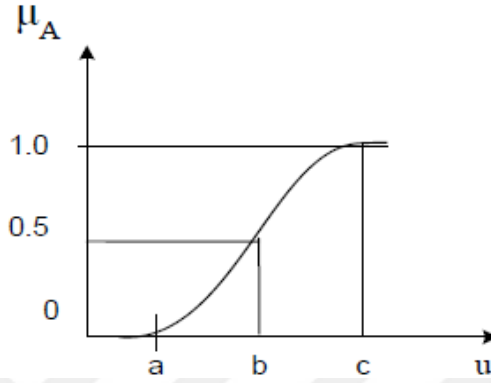
Şekil 1.11. Sigmodial üyelik fonksiyonu

1.4.3.6. S Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.12’de gösterilen S üyelik fonksiyonu a ve b parametreleri ile tanımlanan Tipik sigmoidal üyelik işlevi veya S işlevi, $u: X \rightarrow [0, 1]$, iki parametreye ihtiyaç duyar ve denklem 1.6’daki gibi ifade edilir.

$$\sigma(u; a, b) = \frac{1}{1+e^{-\beta(u-a)}} \quad (1.6)$$

a orta noktadır ve b inflexion noktasındaki slop değeridir. Benzer şekilde, Gaussian'da olduğu gibi, b pozitif olmalıdır. Bu S-fonksiyonu asla ne 0 ne de 1'e ulaşmaz.

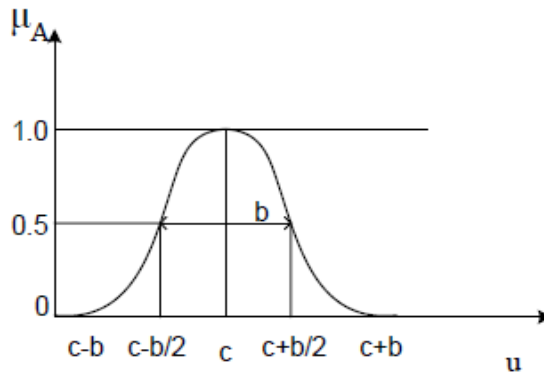


Şekil 1.12. S üyelik fonksiyonu

1.4.3.7. Π Üyelik Fonksiyonu

Şekil 1.13'de gösterilen Π fonksiyonunun S fonksiyonundan farkı Π fonksiyonları iki taraflı olarak "0" değerine doğru asimptotik olarak azalır. Π üyelik fonksiyonu için kullanılan bağıntı denklem 1.7'de verilmektedir.

$$\Pi = \mu_A(x; b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left\{ \frac{x-b}{c} \right\}^2} \right\} \quad (1.7)$$



Şekil 1.13. Π üyelik fonksiyonu

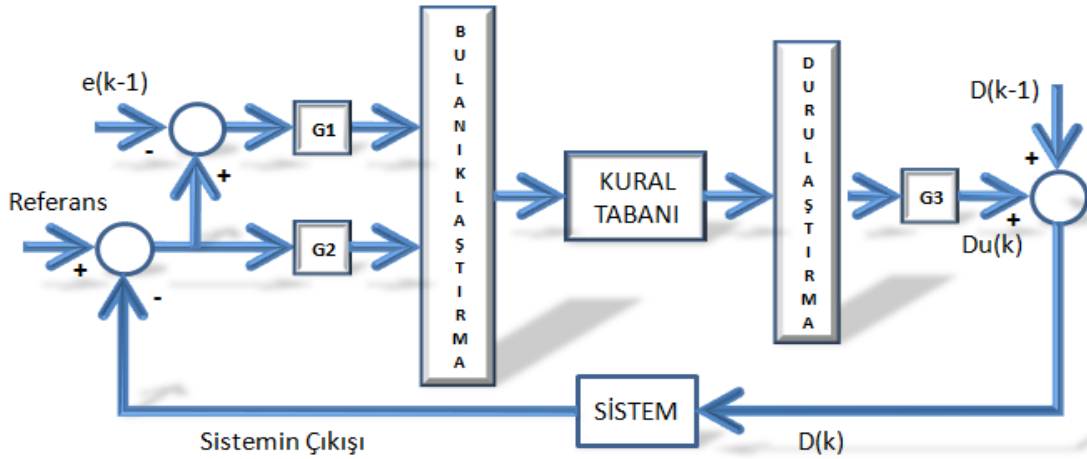
1.4.4. Bulanık Kontrol

Bulanık kontrol bulanık mantığa dayalı bir kontrol yöntemidir. Bulanık mantık basitçe sayılardan ziyade kelimelerle hesaplanırken, bulanık kontrol basitçe " denklemler yerine cümlelerle kontrol olarak tanımlanabilir. Bulanık bir denetleyici ampirik kuralları içerebilir ve bu özellikle operatör kontrollü tesislerde faydalıdır. Buradaki amaç, mühendisler için çeşitli tasarım seçeneklerini tanımlamak ve açıklamaktır. Kural tabanlı bir denetleyicide, kontrol stratejisi az çok doğal bir dilde depolanır. Kontrol stratejisi, denklem temelli bir açıklamaya karşı bir kural üssünde izole edilir. Kural tabanlı bir denetleyicinin, uzman olmayan son kullanıcı için anlaşılması ve bakımı kolaydır.

Bulanık mantık mühendisliğinde ana uygulama, kontrol sistemleri alanındadır. Bir kontrol sisteminin istenen yanıtı bilmesi gerektiği ve bu girdiyi işlemesi ve bunu başarmaya çalışması anlamına gelir [24]. Süreç, kontrol edilen ve tipik olarak değiştirilemeyen sistemdir. Bulanık mantık tabanlı denetleyici, uygun işlem girdisini belirlemek için bulanık üyelik işlevlerini ve çıkarım kurallarını kullanır. Bir bulanık denetleyici tasarlanması, denetlenebilir bir dilbilimsel kural tabanı kullandığından, denetleyici tasarımına yönelik daha sezgisel bir yaklaşımdır [25].

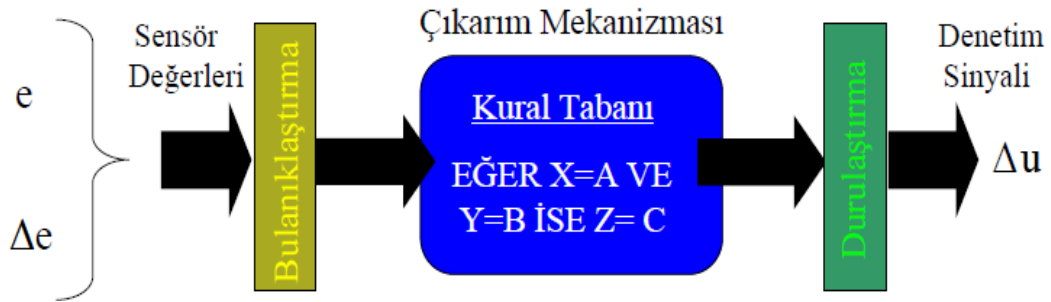
Bulanık küme teorisinin arkasındaki temel motivasyon, geleneksel yöntemlerin bu kadar karmaşık hale gelmesi, araştırmacıların bunları uygulamaya çalıştıkları karmaşık bir sistemle karmaşık bir araç arasında seçim yapmak zorunda kalmalarıdır. Bulanık kontrol, bir sistemin nasıl kontrol edileceğine dair bir sezgisel sezgisel bilgiyi temsil etmek, manipüle etmek ve uygulamak için resmi bir metodoloji sağlar.

Şekil 1.14'de bir bulanık mantık denetleyicinin yapısını görebiliriz. Bulanık kontrolü gerçek bir ürüne uygulamak ya da gerçek bir problemi çözmek için birbirini takip eden üç aşamaya ihtiyaç duyulmaktadır: bulanıklaştırma, bulanık karar blokları ve durulaştırma. Bulanıklaştırma, bulanık çıkarım sistemini uygulayan ilk adımdır. Gerçek dünyada var olan değişkenlerin çoğu, net veya klasik değişkenlerdir. Bu net değişkenleri bulanık değişkenlere dönüştürmeli ve sonra uygulamalıdır. İstenen çıktıyı elde etmek için bu verileri işlemek için bulanık çıkarım. Son olarak, çoğu durumda, bu bulanık çıktıların istenen kontrol hedeflerini tamamlamak için net değişkenlere dönmesi gerekir.



Şekil 1.14. Bulanık mantık denetleyicilerinin temel yapısı

Şekil 1.15'de bir bulanık kontrolör üç ana işleme ayrılabilir. Bunlardan birincisi, bulanıklaştırmadır; bu, girdileri işlemek ve bunları bulanıklaştırmak için tanımlanmış üyelik işlevlerini kullanır. Bu karışmış girişler daha sonra ikinci kısma, kural tabanlı çıkarım sistemi kullanılır. Bu sistem, bulanık bir yanıt oluşturmak için önceden tanımlanmış dil kurallarını kullanır. Bulanık cevap, daha sonra son süreçte durulaştırma ile çözülür. Bu süreç bir çıktı olarak gerçek bir sayı sağlayacaktır [26].



Şekil 1.15. Bulanık mantık denetleyici konfigürasyonu

Bulanık bir denetleyicinin tasarlanması, birkaç farklı bilgisayar tabanlı araçla yapılabilir. Kullanacağımız araç, Simulink ile Matlab'da bulanık mantık araç kutusudur. Bu araç, üyelik fonksiyonlarını ve çıkarım kurallarını tanımlamak için bir yapı sağlar ve Simulink ile entegre edilebilir.

1.4.4.1. Bulandırma Birimi

Bulanık girdiyi, bulanık bilgi tabanında saklanan üyelik işlevlerini kullanarak bir dil değişkenine dönüştürür. Genel olarak bulanıklaştırma iki süreci içerir: girdi ve çıktı değişkenleri için üyelik işlevlerini türetmek ve bunları dilsel değişkenlerle temsil etmek. Bu süreç klasik setin bulanık setini değişken derecelere dönüştürmek veya eşlemekle eşdeğerdir.

Bulandırma, gerçek giriş değerlerini dilsel olarak tanımlanmış bulanık kümelerdeki üyelik fonksiyonlarına atayan birimdir. Diğer bir ifade ile üyelik fonksiyonlarından yararlanarak giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık kümeleri ve üyelik derecesini tespit edip, girilen sayısal değeri küçük, en küçük gibi dilsel değişkenler ile tanımlamaktır [27].

1.4.4.2. Kural Tabanı

Bulanık kural tabanı, bir dizi dil kuralları içerir. Bu dil kuralları dilsel değerler ve dilbilimsel değişkenler kullanarak ifade edilir. Dilsel değişkenlere farklı dilsel değerler atanabilir. Bu dilsel değerler bulanık kümeler olarak modellenmiştir. Dilsel değerlere dayanarak, karşılık gelen üyelik işlevleri, uygulama gereksinimlerine göre ifade edilebilir [28]. Yani, bulanık mantık denetleyicisinin işinin aşağıdaki üç adımı gerçekleştireceğini söyleyebiliriz:

- Analiz etmek veya kontrol etmek istediğimiz bazı sistemlerde bulunan bir veya daha fazla sayıda ölçüm veya diğer değerlendirme koşullarını almak.
- Tüm bu girdileri, yalın bir dille ifade edilebilen, insan temelli, bulanık "If-Then" kurallarına göre işlemek.
- Elde edilen çıktıları, tüm bireysel kurallardan, ne yapılacağına karar verecek veya ne yapılacağına karar veren tek bir çıktı kararına veya sinyaline ortalamak ve ağırlık vermek. Sonunda gelen çıkış sinyali kesin görünen, anlamsız, "net" bir değerdir.

Kural Tabanının temel kullanım amacı uzman bilgilerini sebep-sonuç ilişkisi içerisinde gösterebilmektir. Bulanık denetim kurallarını çıkarmak için genel olarak uzman tecrübesi ve denetim mühendisliği bilgisi, operatörün kontrol hareketlerinin modellenmesi, sürecin bulanık modeli ve öğrenme olmak üzere dört yöntem kullanılmaktadır.

1.4.4.3. Karar Verme Birimi

Bulanık mantık kullanılarak girdi ve çıktı arasında bir eşleştirme oluşturma süreci, bulanık çıkarım olarak bilinir. Haritalama, kararların alınabileceği temeldir ya da fark edilen kalıplardır. Toolbox kutusunda iki tip bulanık çıkarım sistemi uygulanabilir: Mamdani tipi ve Sugeno tipi.

En yaygın olarak kullanılan yöntem, Mamdani'nin bulanık çıkarım sistemidir. Bu, 1975 yılında Ebrahim Mamdani tarafından önerilen bulanık küme teorisi kullanılarak inşa edilen ilk kontrol sistemlerinden biriydi. Deneyimli insan operatörlerinden elde edilen bir dizi dilsel kontrol kurallarını sentezleyerek bir buhar motoru ve kazan kombinasyonunu kontrol etme çabasıyla geliştirilmiştir. Bir buhar motoru ve kazan kombinasyonunu kontrol etmek amacıyla, bir dizi dilsel kontrol kuralını sentezleyerek geliştirildi. Toplama işleminden sonra, net değerleri elde etmek için her çıkış değişkeni için bulanık bir set elde ederiz.

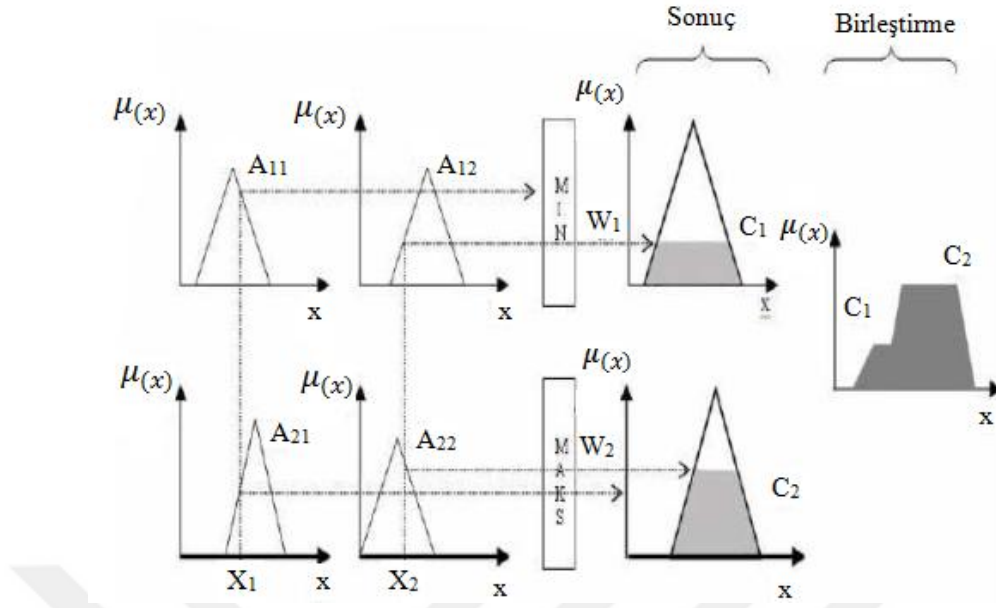
1.4.4.3.1. Mamdani Yöntemi

İlk kez 1974 yılında Ebrahim MAMDANI tarafından kullanılmıştır. Bu ilk çalışma bulanık uzman sistemlerin kullanılabilirliğini göstermiş ve kendisinden sonra birçok çalışmaya örnek olmuştur. Bu yöntemin kural yapısı denklem 1.8 ve denklem 1.9'da verilmiştir.

$$\text{IF } (X_1 = A_{11}) \text{ ve } (X_2 = A_{12}) \text{ ise } (Z_1 = C_1) \quad (1.8)$$

$$\text{IF } (X_1 = A_{21}) \text{ ve } (X_2 = A_{22}) \text{ ise } (Z_2 = C_2) \quad (1.9)$$

Şekil 1.16'da gösterilen çıkarım modelinde girdi verilen bu FIS'in çıktısını hesaplamak bulanık kural kümesinin belirlenmesi, giriş üyelik işlevlerini kullanarak girişleri bulanıklaştırma, kural kuvveti oluşturmak için bulanık girişleri bulanık kurallara göre birleştirmek, kuralı birleştirerek kuralın sonucunu bulma, bir çıktı dağılımı elde etmek için sonuçları birleştirmek, çıkış dağılımının bulanıklaştırılması adımlarını izler.



Şekil 1.16. Mamdani çıkarım yönteminin gösterimi

1.4.4.3.2. Larsen Çıkarım Yöntemi

Bu yöntem Mamdani çıkarım yöntemine benzemekle birlikte temel farkı, sonuç aşamasında bulanık sonuç kümesini bulurken çarpım (product) işlemcisini kullanmasıdır. Bu işlemin matematiksel gösterimi;

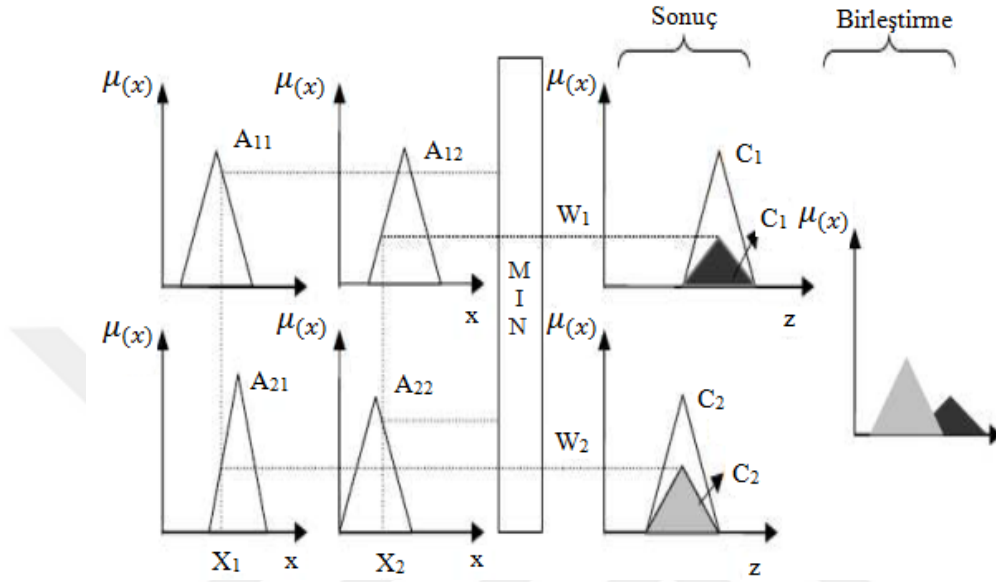
$$\mu_{c'i}(z) = w_i \cdot \mu_{c'i}(z) \quad (1.10)$$

Denklem 1.10'da görüldüğü gibi esik değeri ile sonuç kümesinde bulunan elemanlara ait üyelik dereceleri çarpılarak bulanık sonuç kümeleri (C) elde edilir. Larsen yöntemine ait kural yapısı denklem 1.11 ve denklem 1.12'de verilmiştir.

$$\text{IF } (X_1 = A_{11}) \text{ ve } (X_2 = A_{12}) \text{ ise } (Z_1 = C_1) \quad (1.11)$$

$$\text{IF } (X_1 = A_{21}) \text{ ve } (X_2 = A_{22}) \text{ ise } (Z_2 = C_2) \quad (1.12)$$

Şekil 1.17'de gösterildiği gibi Larsen yönteminde sonuç kesin sayı olmayıp yine bir bulanık küme olduğu için, bu kümeler kesin kontrol değerini elde etmek amacı ile durulaştırma işlemine tabi tutulmaktadır.



Şekil 1.17. Larsen çıkarım yönteminin gösterimi

Mamdani ve Larsen çıkarım yöntemleri daha çok karar destek sistemlerinin (KDS) oluşturulmasında kullanılır. Bu KDS'nin doğru karar verip vermediğini kontrol etmek için sistemin vermiş olduğu kararlar ile konunun uzmanının vermiş olduğu kararlar karşılaştırılır. Sistem ile uzmanın vermiş olduğu kararların % 90'nın üzerinde benzer olması istenir.

1.4.4.3.3. Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Yöntemi

Bu çıkarım yöntemi tek başına Sugeno olarak da adlandırılmaktadır. Birçok bakımdan Mamdani ile benzer özelliklere sahiptir. Bu iki yöntem arasındaki temel farklılık, TSK yönteminde çıktı değişkeni sabit olduğundan durulaştırma yapılmaz. TSK yöntemine ait kural yapısı

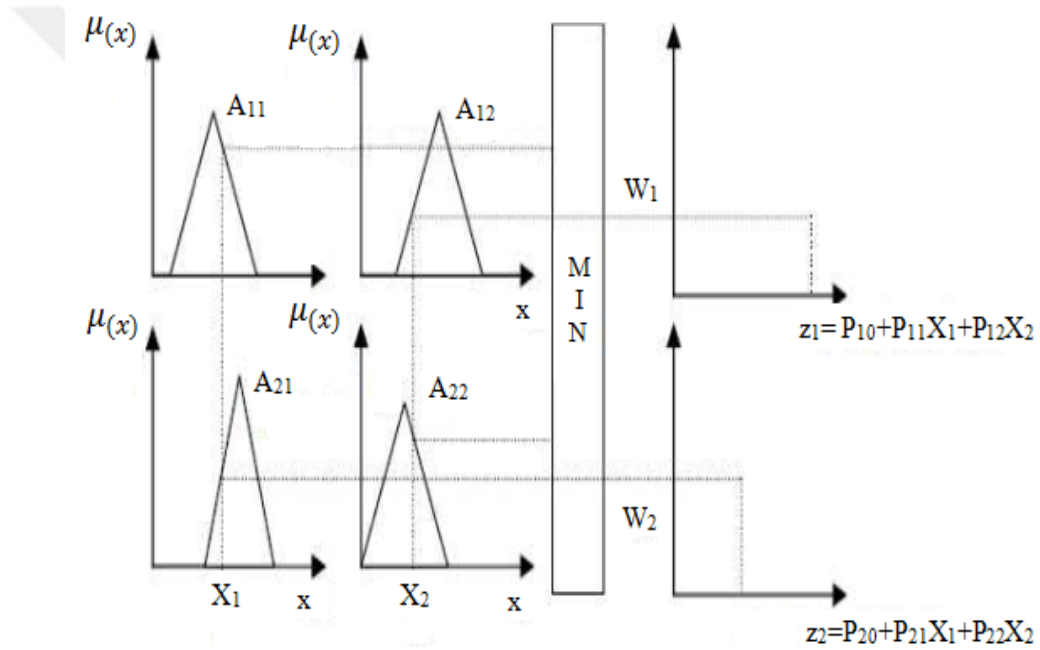
$$\text{IF } (X_1 = A_{11}) \text{ ve } (X_2 = A_{12}) \text{ ise } (z_1 = P_{10} + P_{11}X_1 + P_{12}X_2) \quad (1.13)$$

$$\text{IF } (X_1 = A_{21}) \text{ ve } (X_2 = A_{22}) \text{ ise } (z_2 = P_{20} + P_{21}X_1 + P_{22}X_2) \quad (1.14)$$

veya

$$\text{IF } (X_1 = A_{11}) \text{ ve } (X_2 = A_{12}) \text{ ise } (Z_1 = C_1) \quad (1.15)$$

$$\text{IF } (X_1 = A_{21}) \text{ ve } (X_2 = A_{22}) \text{ ise } (Z_2 = C_2) \quad (1.16)$$



Şekil 1.18. TSK çıkarım yönteminin gösterimi

Şekil 1.18'de gösterilen çıkarım yönteminde bir veya birden çok girdi değişkeni tek bir çıktı değişkeni (z_i) vardır. Çıktı değişkeni olan Z_i , X_1 ve X_2 girdi değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyonu olabildiği gibi sabit (C_i) bir sayıda olabilir. Çıktı değişkeni doğrusal bir fonksiyon olarak tanımlandığında P_{i0} , P_{i1} ve P_{i2} bu fonksiyonun parametreleridir. Bu parametreler her kural için farklı değerlere sahiptir. Parametre değerleri hesaplanırken başlangıçta girdi değişkenlerinin ilk değerleri için rastgele değerler atanır. Bu ilk parametre değerlerinin hiçbir önemi yoktur. İstenirse bu değerler olay hakkında hiçbir bilgisi ve tecrübesi olmayan bir kişi tarafından da rastgele belirlenebilir.

1.4.4.3.4. Tsukamoto Yöntemi

Bu yöntem TSK yönteminin biraz değiştirilmesi ile elde edilmiştir. TSK yönteminden farkı, her bulanık kuralın çıktığı değeri (Z_f), eşik değerinin sistem içerisinde tanımlanan bir monotonik üyelik fonksiyonunu kestiği noktadaki değerdir. Bu durumda bu yöntemde çıktı değeri monotonik üyelik fonksiyonu tarafından temsil edilen bir bulanık küme elemanı olur. Monotonik fonksiyon X_1, X_2 A için:

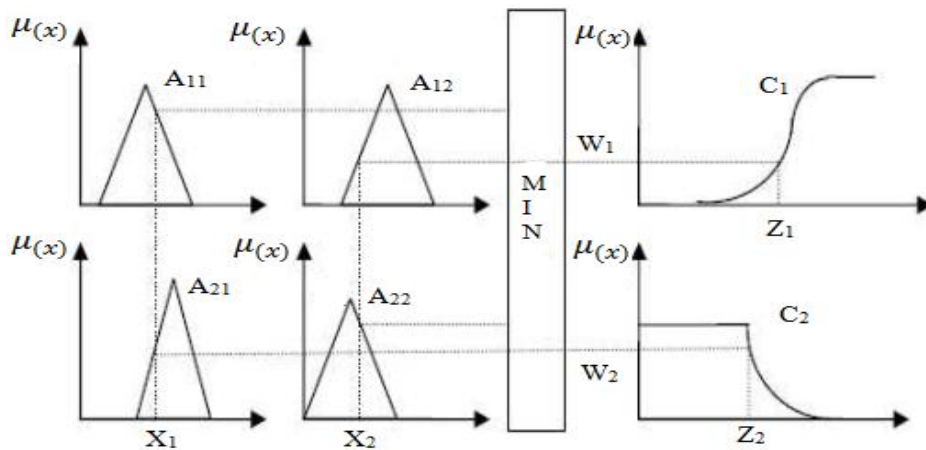
$$X_1 < X_2 \text{ için. } f(X_1) < f(X_2) \quad (1.17)$$

$$X_1 < X_2 \text{ için. } f(X_1) \leq f(X_2) \quad (1.18)$$

koşullarından birini sağlayan fonksiyona denir. Tsukamoto yönteminde kural yapısı

$$\text{IF } (X_1 = A_{11}) \text{ ve } (X_2 = A_{12}) \text{ ise } (Z_1 = C_1) \quad (1.19)$$

$$\text{IF } (X_1 = A_{21}) \text{ ve } (X_2 = A_{22}) \text{ ise } (Z_2 = C_2) \quad (1.20)$$



Şekil 1.19. Tsukamoto çıkarım yönteminin gösterimi

Şekil 1.19'da gösterilen çıkarım yöntemde aşağıdaki eşitlik kullanılarak sonuç kesin bir değer olarak hesaplanır.

$$\text{Sonuç değerleri} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1.21)$$

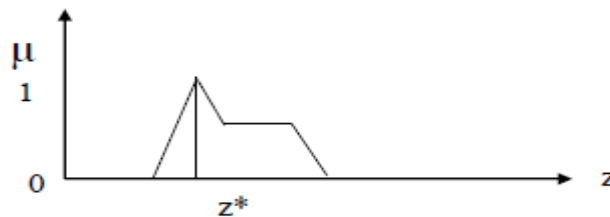
Bu nedenle TSK yönteminde olduğu gibi Tsukamoto yönteminde de durulama işlemine gerek yoktur. Tsukamoto yöntemi diğer çıkarım yöntemlerine nazaran daha kullanışsız bir yöntemdir.

1.4.4.4. Durulaştırma Birimi

Durulaştırıcı, bulanık set çıkışını keskin bir çıkışa dönüştüren bir çıktı haritasıdır. Durulaştırma birimi çıkarım biriminden gelen bulanık bilgileri gerçek hayatta ve uygulamalarda kullanılacak kesin bilgilere dönüştürmeyi sağlar. Diğer bir ifadeyle bulanıklaştırma biriminde bulanıklaştırılarak çıkarım motoruna gelen ve burda ki kurallarla işlenerek tekrar bulanık halde olan verilerin Bulanıklaştırma birimindeki gibi gerçek sayısal değerlere dönüştürülmesi işlemidir.

1.4.4.4. 1. En Büyüklük İlkesi

Şekil 1.20'de gösterilen en büyüklük ilkesi yönteminin kullanılabilmesi için çıkarım aşamasında elde edilen bulanık birleşim kümesinin tepe noktasının olması gerekir. Durulaştırılmış değer bulanık birleşim kümesinde en yüksek üyelik derecesine sahip değere eşittir.

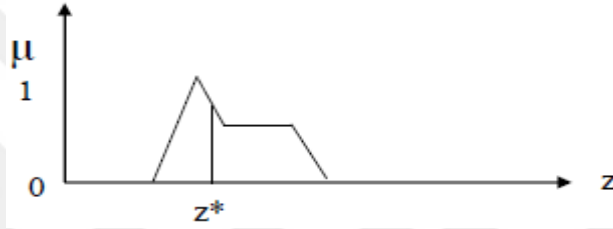


Şekil 1.20. En büyük üyelik derecesi durulaştırma

1.4.4.4. 2. Ağırlık Merkezi Yöntemi (Centroid Method)

Şekil 1.21'de gösterilen yöntem, bulanık kümenin ağırlık merkezine dayalı net bir değer sağlar. Temsil etmek için kullanılan üyelik işlevi dağıtımının toplam alanı birleşik kontrol eylemi bir dizi alt alana bölünmüştür. Her bir alt-alanın alanı ve ağırlık merkezi ya da merkezi hesaplanır ve daha sonra ayrı bir bulanık kümenin bulanıklaştırılmış değerini bulmak için tüm bu alt alanların toplamı alınır ve denklem 1.22'deki gibi ifade edilir.

$$Z^* = \frac{\int \tilde{U}_\zeta(z).zdz}{\int \tilde{U}_\zeta(z)dz} \quad (1.22)$$

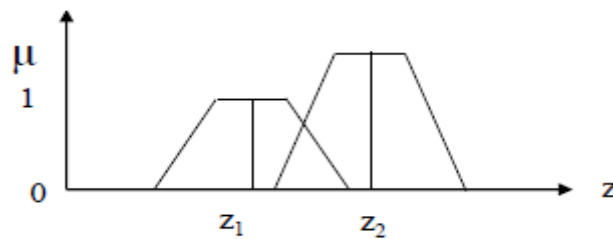


Şekil 1.21. Centroid yöntemi ile durulaştırma

1.4.4.4. 3. Ağırlıklı Ortalama Yöntemi

Şekil 1.22'de gösterilen yöntem, simetrik çıkış üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kümeler için geçerlidir ve Ağırlık Merkezi yöntemine çok yakın sonuçlar üretir. Bu yöntem daha az hesaplama yoğun. Her üyelik işlevi maksimum üyelik değerine göre ağırlıklandırılır ve denklem 1.23'deki gibi ifade edilir.

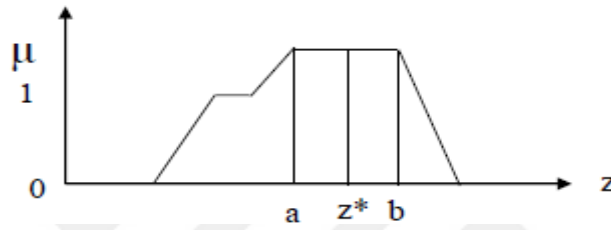
$$Z^* = \frac{\int \tilde{u}_\zeta(z).zdz}{\int \tilde{u}_\zeta(z)dz} \quad (1.23)$$



Şekil 1.22. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırması

1.4.4.4. 4. Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi

Şekil 1.23'de gösterilen yöntemde, durulaştırılacak değer, en yüksek üyelik değerlerine sahip öge olarak alınır. Maksimum üyelik değerlerine sahip birden fazla öge olduğunda, maksimum değerın ortalama değeri alınır. $X, x \in X$ üzerinde tanımlanmış üyelik fonksiyonu $\mu_A(X)$ olan, X 'in söylemin bir evreni olduğu bulanık bir set olsun. Z^* bir belirsizlik kümesinin durulaştırılmış değeridir.



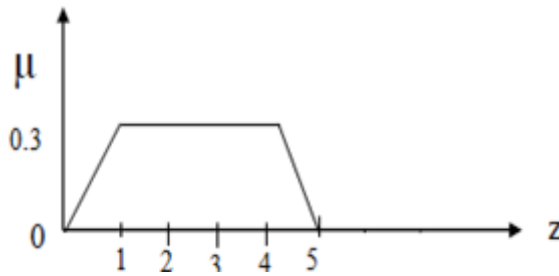
Şekil 1.23. Ortalamaların en büyük üyelik durulaştırılması

1.4.4.4. 5. Toplamların Merkezi Yöntemi

Şekil 1.24'de gösterilen yöntem en yaygın kullanılan durulaştırma tekniğidir. Bu yöntemde örtüşen alan iki kere sayılır. Belirsiz değerler denklem 1.24'deki gibi tanımlanır.

$$Z^* = \frac{\int z \sum_{k=1}^n \mu_k(z) dz}{\int \sum_{k=1}^n \mu_k(z) dz} \quad (1.24)$$

Burada, n , bulanık kümelerin sayısıdır, N , bulanık değişkenlerin sayısıdır, $(z)dz$, k bulanık kümesinin üyelik işlevidir.

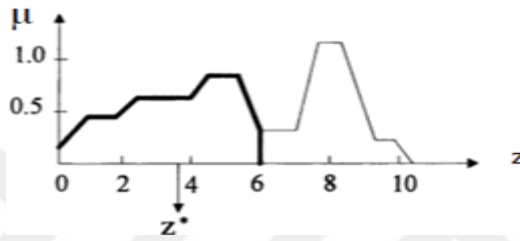


Şekil 1.24. Toplamların merkezi durulaştırması

1.4.4.4. 6. En Büyük Alanın Merkezi Yöntemi

Şekil 1.25'de gösterilen yöntem, her iki taraftaki alanların eşit olduğu eğri altındaki pozisyonu hesaplar. En büyük alanın merkezi yöntemi bölgeyi aynı alana sahip iki bölgeye ayıran eylemi üretir ve denklem 1.25'deki gibi ifade edilir.

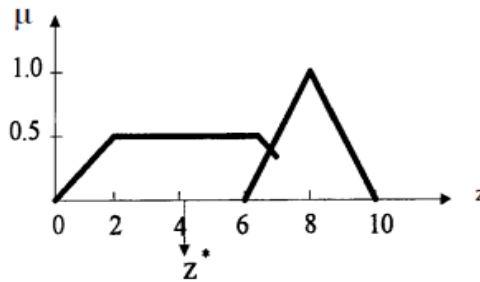
$$Z^* = \frac{\int \bar{\mu}_{eb\zeta}(z).zdz}{\int \bar{\mu}_{eb\zeta}(z)dz} \quad (1.25)$$



Şekil 1.25. En büyük alan merkezi ile durulaştırma

1.4.4.4. 7. En Büyük İlk veya Son Üyelik Derecesi Yöntemi

Şekil 1.26'da gösterilen en büyük ilk üyelik derecesi yöntemi, maksimum üyelik değeriyle alanın en küçük değerini belirler. Belirtilen bulanık kümenin Z^* 'in durulaştırma değeri $Z^* = 4$ olacaktır.



Şekil 1.26. İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma

Şekil 1.26'da gösterilen en büyük son üyelik derecesi yöntemi maksimum üyelik değeriyle alanın en büyük değerini belirler. En büyük ilk üyelik derecesi için verilen örnekte, en büyük son üyelik derecesi yöntemi için bulanıklaştırılmış değer $Z^* = 8$ olacaktır.

1.4.5. Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları

Bulanık kontrolün temel avantajı;

- Bulanık mantık kavramsal olarak anlaşılması kolaydır. Bulanık mantığın arkasındaki matematiksel kavramlar çok basittir. Bulanık mantık, geniş kapsamlı karmaşıklık olmadan daha sezgisel bir yaklaşımdır.
- Bulanık mantık esnektir. Herhangi bir sistemle, sıfırdan başlamaya gerek kalmadan daha fazla işlevsellik katmanı kolaydır.
- Bulanık mantık kesin olmayan verilere toleranslıdır. Yeterince yakından bakarsanız ve hatta dikkatli incelemelerde bile çoğu şey kesin değildir.
- Bulanık mantık, keyfi karmaşıklığın doğrusal olmayan fonksiyonlarını modelleyebilir.
- Bulanık mantık uzman deneyimlerinin üzerine inşa edilebilir. Eğitim verilerini alan ve opak, geçilmez modeller üreten sinir ağları ile doğrudan zıt olarak, bulanık mantık sisteminizi zaten anlayan insanların deneyimlerine güvenmemizi sağlar.
- Bulanık mantık geleneksel kontrol teknikleriyle harmanlanabilir. Bulanık sistemler, geleneksel kontrol yöntemlerinin yerine geçmez. Birçok durumda bulanık sistemler bunları güçlendirir ve uygulamalarını kolaylaştırır.
- Bulanık mantık doğal dile dayanır. Bulanık mantığın temeli, insan iletişiminin temelidir. Bu gözlem, bulanık mantıkla ilgili diğer ifadelerin çoğunu desteklemektedir. Bulanık mantık, günlük dilde kullanılan nitel tanımlama yapıları üzerine kurulduğundan, bulanık mantık kullanımı kolaydır.

Bazı dezavantajları ise;

- Bulanık denetimde kullanılan kurallar deneyime çok bağlıdır.
- Bulanık mantık kontrolörün parametreleri çoğunlukla deneme yanılma metodu ile bulunmaktadır. Bu da zaman almakta ve optimal kontrolü garanti etmemektedir.
- Üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir yöntem yoktur. En uygun fonksiyon deneme ile bulunur. Bu da oldukça uzun bir zaman alabilir. Ayrıca yüksek doğrulukta olmayan problemlere de uygundur.
- Denetlenen sistemin bir kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez. Yapılacak tek şey benzetim çalışmasıdır.

1.5. Genetik Algoritma

1960’larda Rechenberg: “evrim stratejileri” Gerçek değerli parametreler için optimizasyon yöntemi, Fogel, Owens ve Walsh: “evrimsel programlama” Gerçek değerli parametreler rastgele mutasyon kullanılarak evrilir algoritmasını ortaya koymuştur. 1970’lerde John Holland ve Michigan Üniversitesi’ndeki meslektaşları “genetik algoritmalar” (GA) geliştirdi. Holland’ın 1975 “Doğal ve Yapay Sistemlerde Adaptasyon” kitabı, GA’nın başlangıcıdır. Holland, GA’ların çoğu teorik analizinin çerçevesini “şemaları” tanıttı. 1990’larda John Koza: “genetik programlama”, belirli görevleri çözmek için programları geliştiren genetik algoritmalar kullanmıştır. Bu teknikleri genel olarak evrimsel hesaplama olarak adlandırılır. Şekil 1.27’de genetik algoritmanın temel çalışma yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.27. Genetik algoritmanın temel çalışma yapısı

Evrimsel algoritmalar, kullanılan nüfus tabanlı meta sezgisel optimizasyon algoritmalarıdır. Bir dizi çözümü iteratif olarak düzeltmek için biyoloji-esinli mekanizmalar ve en uygun teorinin hayatta kalması amaçlanır. Genetik algoritmalar, arama

alanının elemanlarının yer aldığı evrimsel algoritmaların alt sınıfıdır. Genetik algoritmalar, adapte olan ve gelişen biyolojik organizmaların genetik mekanizmalarından sonra şekillendirilen bilgisayar tabanlı araştırma teknikleridir. Genetik algoritmalar, zor problemlerin optimizasyonu için hızlı, güvenilir ve doğru bir çözüm sunmaktadır.

Genetik algoritma, optimizasyon ve arama problemlerine gerçek veya yaklaşık çözümler bulmak için hesaplamada kullanılan bir arama tekniğidir. Genetik Algoritma, evrimsel biyolojinin kalıtım, mutasyon, seleksiyon ve çaprazlama gibi yöntemlerden esinlenen teknikleri kullanan belirli bir evrimsel algoritma sınıfıdır. Evrim, genellikle rastgele oluşturulmuş bireylerin bir popülasyonundan başlar ve nesiller halinde gerçekleşir. Her jenerasyonda, her birinin uygunluk popülasyonundaki birey değerlendirilir, birden fazla kişi mevcut popülasyondan seçilir ve yeni bir popülasyon oluşturmak için modifiye edilir. Yeni popülasyon, algoritmanın bir sonraki iterasyonunda kullanılır. Algoritma, azami sayıda kuşak üretildiğinde veya popülasyon için tatmin edici bir uygunluk seviyesine ulaşıldığında sona erer.

1.5.1. Problemin Genetik Olarak Kodlanması

Problemin genetik olarak kodlanması işlemi, problemin çözümünün genetik bir birey olarak sunulması işlemidir. Bir birey veya diğer adıyla kromozom genlerden oluşmaktadır. Bir gen bireyin belirli bir özelliğini temsil etmektedir. Örneğin denklem 1.26'daki gibi bir minimizasyon problemimiz olduğunu düşünelim. Problemin amacı y değerini minimum yapan X_1 ve X_2 değerlerini bulmaktır. Bu parametreler ikili kodlama yöntemi ile bir birey olarak sunulabilmektedir.

$$y = X_1^2 + X_1 \cdot X_2 + X_2^2 \quad X_1, X_2 \in Z, 0 < X_1 < 16, 0 < X_2 < 16 \quad (1.26)$$

X_1 ve X_2 parametrelerinin alabileceği maksimum değer 16 dan küçük olacağı için ikili olarak 4 bit ile ifade edilebilir ve iki parametremiz olduğundan dolayı bireyin toplam uzunluğu 8 bit olarak gerçekleşir. Problem için yapılan örnek kodlama Şekil 1.28'de gösterilmiştir.



Şekil 1.28. Denklem 1.26'daki problem için örnek birey kodlaması

Bireyin genetik olarak kodlanmasında ikili sayılar kullanılabildiği gibi gerçek değerli sayılarda kullanılabilmektedir. Çaprazlama ve mutasyon operatörleri seçilen kodlama yapısına uygun olmalıdır.

1.5.2. Uygunluk Fonksiyonunun Belirlenmesi

Uygunluk fonksiyonu bir bireyin çözüme ne kadar yaklaştığını ölçmektedir. Başka bir deyişle bireyin çözüm açısından kalitesini göstermektedir. Uygunluk fonksiyonu aynı zamanda genetik algoritmanın amacını da göstermektedir. Çözüme en yakın bireyin uygunluk değerinin en yüksek olması gerekmektedir. Uygunluk fonksiyonunun verimli bir şekilde çalışması genetik algoritmanın başarısını doğrudan etkilemektedir.

1.5.3. Seçim

Seçim, genetik algoritmalarda önemli bir işlemdir. Problem bağlamında herhangi bir kromozom için değer ölçümünü ifade eder. Her genomun kromozom dizisinden seçildiği genetik algoritma aşamasıdır. Yaygın olarak kullanılan teknikler rulet çarkı yöntemi, rank yöntemi, turnuva ve elitist seçim yöntemleridir.

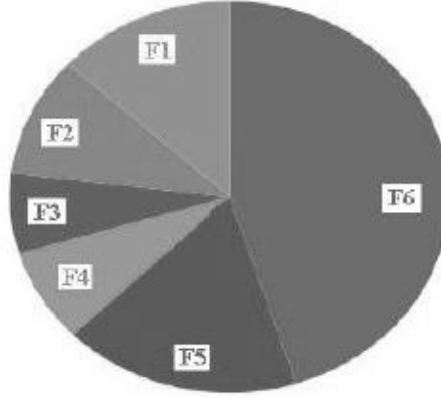
Rulet tekerleği yönteminde, ebeveynler uygunluğuna göre seçilmektedir. Daha iyi kromozomlar, ebeveynler olarak seçilme şansları daha yüksektir. Fitness orantılı seçimini uygulamak için en yaygın yöntemdir. Her bireye dairesel bir rulet çarkı verilir ve dilimin büyüklüğü, kromozomların bireysel uygunluğuyla orantılıdır, yani, daha büyük olan değer, daha büyük dilim büyüklüğüdür. Rulet tekerleğinin çalışması algoritma aşağıda açıklanmıştır:

Adım 1 (Toplam): Popülasyondaki tüm kromozom uygunluklarının toplamını bulun.

Adım 2 (Seçmek): Verilen popülasyon aralığından rastgele sayı üret.

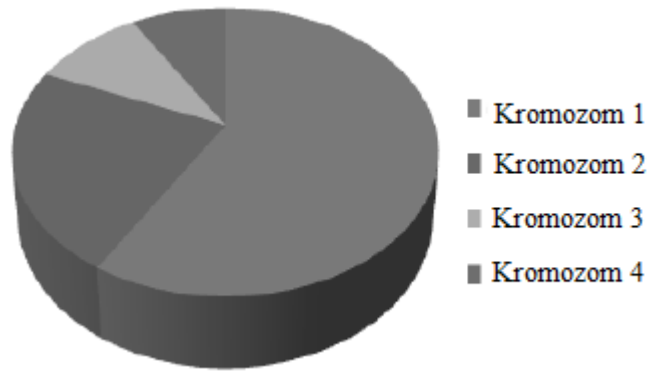
Adım 3 (Döngü): Tüm popülasyonu geçin ve uygunluğu değerlendirin. Bu toplam, bir uygunluk kriteri değerinden daha fazla olduğunda, bu kromozomu durdurun ve geri verin.

Şekil 1.29'da farklı kondisyon değerlerine sahip altı birey için rulet çarkını göstermektedir. Altıncı birey, diğerlerinden daha yüksek bir kondisyona sahiptir, rulet çarkı seçiminin altıncı bireyi diğer herhangi bir kişiden daha fazla seçmesi beklenir.



Şekil 1.29. Rulet çarkı yöntemi

Rank seçim yönteminde, popülasyonu belirli kriterlere göre sıralayan daha yavaş bir yakınsaklık tekniğidir ve her kromozom bu sıralama tarafından belirlenen kondisyon değerini alır. Bu yöntem hızlı bir şekilde yakınsamaları önler ve bir popülasyondaki bireyler uygunluğa göre sıralanır ve her bireyin beklenen değeri mutlak uygunluğundan ziyade derecesine bağlıdır.



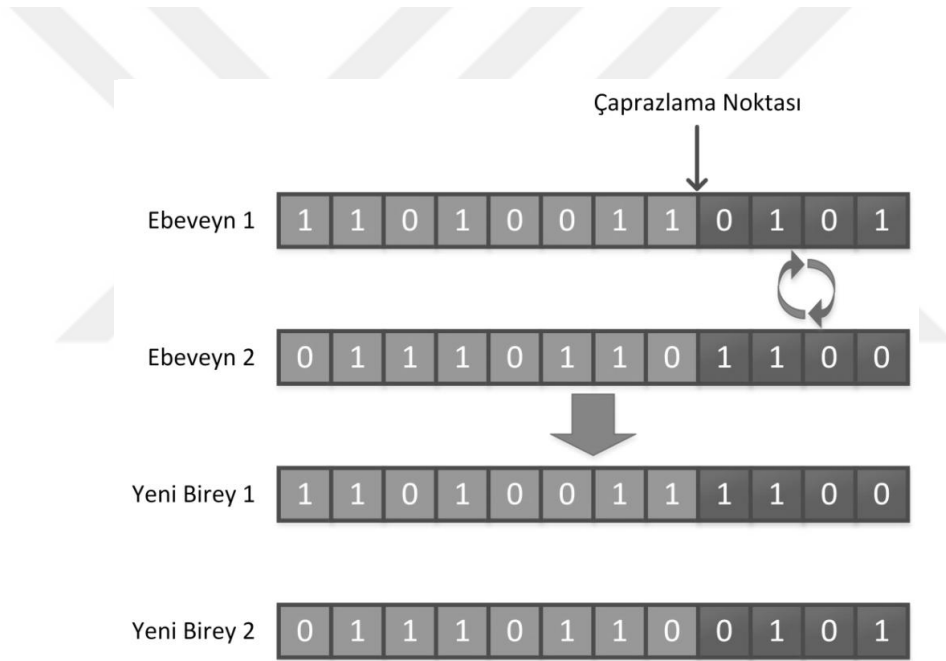
Şekil 1.30. Rank seçim yöntemi

Rank seçim yöntemi Şekil 1.30'da gösterilmiştir. Örneğin, en iyi kromozom uygunluğu yüzde 80 ise, çevresi rulet çarkının yüzde 80'ini kaplar ve daha sonra diğer

kromozomların seçilme şansı minimum olacaktır. Öte yandan, sıralama seçimi önce nüfusa göre sıralanır ve daha sonra her kromozom sıralanır. En kötüsü fitness 1'e, ikinci en kötüsü ise 2'lik bir kondisyona sahip olacak ve en iyisi de n değerinin popülasyondaki kromozom sayısı olan n değeri olan bir n değerine sahip olacaktır.

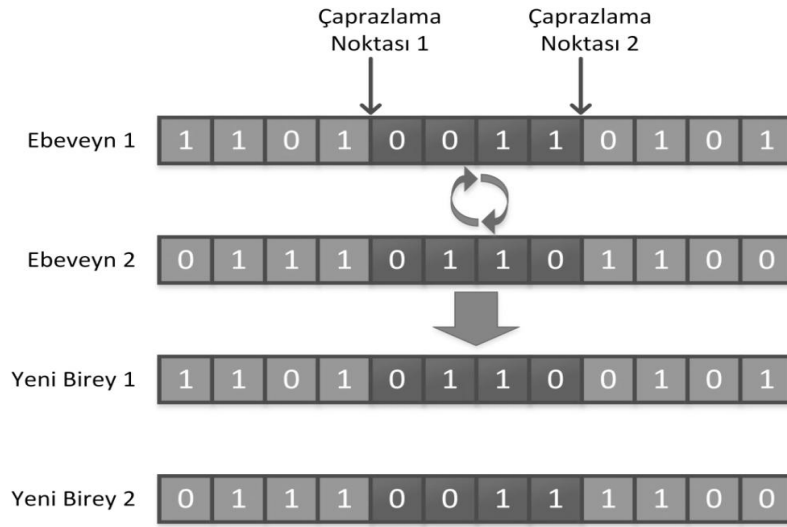
1.5.4. Çaprazlama

Seçim tek başına popülasyona yeni bireyler getiremez, yani arama alanında yeni noktalar bulamaz. Bunlar, en çok bilinenlerin çaprazlama ve mutasyon olduğu, genetik olarak esinlenmiş operatörler tarafından üretilir. Çaprazlama, bir veya iki noktalı şemadan olabilir.



Şekil 1.31. Tek noktalı çaprazlama

Şekil 1.31'de bir noktalı çaprazlama işleminde, seçilen çift dizileri bazı rastgele pozisyonlarda kesilir ve bölümleri, yeni çift dizileri oluşturmak için değiştirilir.

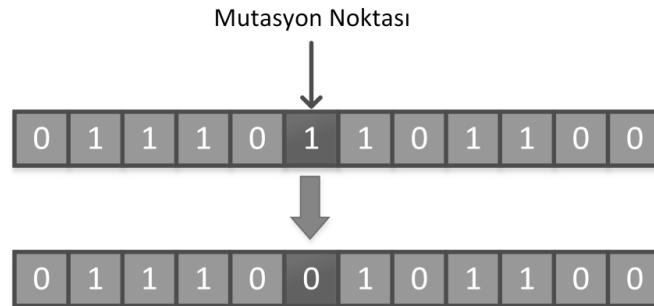


Şekil 1.32. Çift noktalı çaprazlama

Şekil 1.32'de iki noktalı çaprazlama işleminde, rastgele seçilen dizilerde iki kırılma noktası olacaktır. Kırılma noktasında, iki dizinin bölümleri değiştirilir, böylece yeni dizi diziler oluşur.

1.5.5. Mutasyon

Erken evrimleşme teknikleri, toplumda yüksek uyum gösteren ana kromozomların erken evrimleşme dönemlerinde birçok benzer türle karşılaştığı zaman ortaya çıkan popülasyonlardan oluşan çoğu optimizasyon tekniğinde kritik bir sorundur. Genetik algoritmaların çapraz işlenmesi, edinilen bilgiler kromozomları kesiştirmek için kullanıldığı için, kendi sınıflarından oldukça farklı sapmalar oluşturamaz.



Şekil 1.33. Mutasyon işlemi

Alternatif bir operatör, mutasyon, geçişin aksine yeni alanları arayabilir. Crossover, sömürü işletmecisi olarak adlandırılırken, mutasyon ise keşiftir. Çaprazlama gibi, tüm kodlama teknikleri için mutasyon da yapılabilir. Şekil 1.33'de örnek bir mutasyon örneği verilmiştir.

1.5.6. Durma Kriteri

Genetik algoritma yukarıda bahsedilen adımları gerçekleştirerek daha iyi uygunluk değerlerine sahip yeni bir popülasyon oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu işlemi tekrar tekrar yaparak problem için en iyi çözümü aramaktadır. Fakat bu işlem sonsuza kadar devam edemez. Bu nedenle bir durma kriterine ihtiyaç duymaktadır. Farklı problemler için farklı duruma kriterleri tanımlanabilmektedir. En yaygın kullanılan durma kriterleri; algoritmanın belirli bir adım sonrasında bulduğu en iyi çözümü çıkış olarak vermesi, belirlenen bir çözüm değerine ulaşılan kadar devam etmesi veya algoritmanın artık daha iyi bir çözüme ulaşamaması durumunda algoritma sonlandırılabilir.

1.6. Wasp Modeli

Sayısal model ilk olarak 1987 yılında Danimarka Teknik Üniversitesi Rüzgar Enerjisi Bölümü tarafından geliştirilmiştir. Avrupa Rüzgar Atlası'nda sunulan analizler için geliştirilmiştir. Program, rüzgar iklim istatistiklerinin yatay ve dikey tahmini, rüzgar iklimi ve rüzgar kaynaklarının tahmini için kapsamlı bir model listesi kullanmaktadır. WAsP modeli, atmosferik sınır tabakasındaki akışların fiziksel prensiplerine dayanan doğrusal bir sayısal modeldir. Model, ölçülmüş ve modellenmiş rüzgar istatistikleri ve rüzgar çiftliği üretimi arasındaki bir dizi karşılaştırmayla doğrulanmıştır. Program, farklı araziler üzerinde rüzgar akışını, barınma engellerine yakın ve belirli noktalarda tanımlayabilmektedir.

WasP ile bir bölgenin rüzgar enerji potansiyelini tespit edebilmek için aşağıdaki işlemler sırası ile yapılır:

1.6.1. Rüzgar Veri Analizi

WAsP, seçilen yerlerde rüzgar hızları, yön ve güç üretimini tahmin edip tahmin etmeden önce, sağlanan rüzgar verilerinin analiz edilmesi gerekir. Rüzgar ölçüm istasyonundan alınan 10 dakikalık rüzgar ölçümleri analiz edilir ve gözlemlenen sahaya özgü rüzgar ikliminin istatistiksel bir özeti hesaplanır. Çıktı, bir rüzgar gülü ve farklı sektörlerdeki rüzgar hızı dağılımlarıdır. Daha sonra her sektör için ölçek ve şekil parametreleri c ve k sağlamak için ölçülen histograma bir Weibull dağılım fonksiyonu yerleştirilmiştir. Weibull dağılımı, doğal dağılımın genellikle Weibull şekline uygun olması nedeniyle rüzgar istatistiklerinde kullanılmak üzere iyi bir şekilde kurulmuştur. Gözlenen rüzgar verileri, genelleştirilmiş rüzgar iklimine veya rüzgar atlası veri setine dönüştürülür.

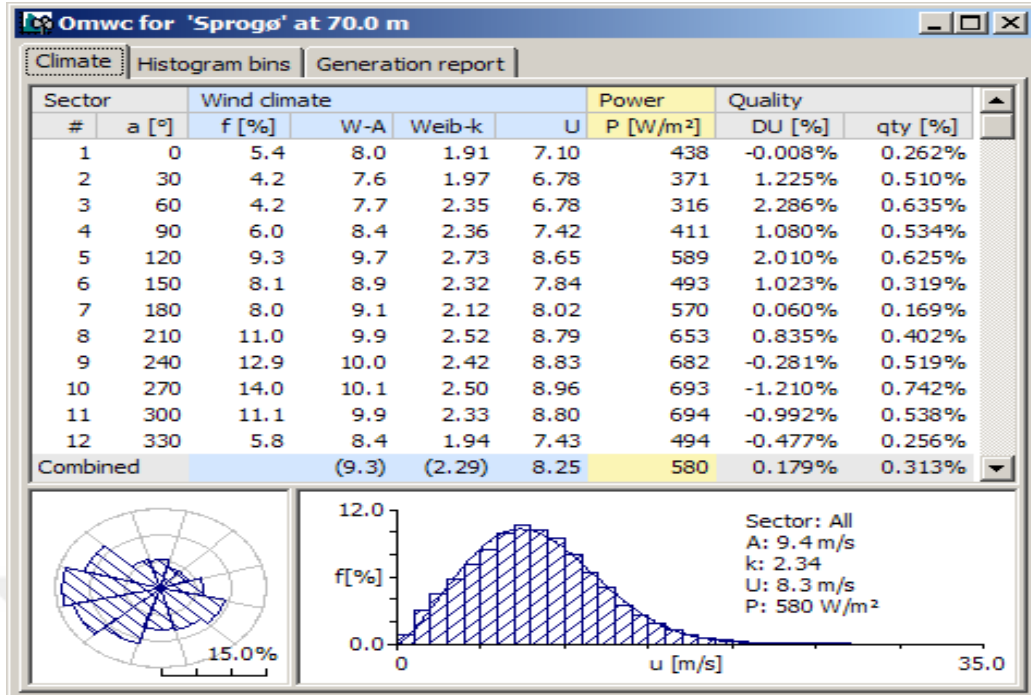
Rüzgar gözlemleri, barınak (binalar vb.), yüzey pürüzlülüğü ve orografi gibi saha koşullarına göre düzenlenmiştir. Farklı kaynaklardan elde edildi bu bilgiler daha sonra WAsP tarafından okunabilen bir harita formatına dönüştürüldü. Dönüşüm için kullanılan program Global Mapper'dır. Veriler standart koşullara dönüştürüldüğünde, dört standart pürüzlülük için Weibull c ve k parametrelerine dönüştürülmüş, zeminin üstündeki beş standart yükseklik ve 12 azimut sektörü, daha sonra genel bir rüzgar atlası oluşturabilir.

Rüzgar atlası verileri oluşturulduğunda, WAsP, rüzgar atlasını üretmek için kullanıldığı gibi ters hesaplamayı yaparak herhangi bir noktada rüzgar iklimini tahmin edebilir. İşlem şu şekilde basitleştirilebilir:

ayrık rüzgar ölçümleri → rüzgar istatistikleri

rüzgar istatistikleri + MET. Site tanımı → rüzgar atlası verileri, genelleştirilmiş rüzgar iklimi

WAsP, rüzgar hızı varyansını yükseklik ile hesaplamak için logaritmik rüzgar profilini kullanır. Bu nedenle üç değişken, zeminden yüksekliği, pürüzlülük uzunluğu ve sürtünme hızını dikkate alır. Pürüzlülük uzunluğu, yüzeyin pürüzlülüğünü parametreler ve sürtünme hızı, hareketli hava ile toprak arasındaki sürtünme kuvvetini parametreler. WAsP, atmosferin kararlı olduğunu ve akış arasındaki dengenin basınç kuvveti ve Coriolis kuvveti ile dengede olduğunu varsayar. WAsP, jeostrofik rüzgarı hesaplamak için ölçülen rüzgar istatistiklerini ve MET istasyonunun etrafındaki yüzey pürüzlülüğünü kullanır. Bu, logaritmik rüzgar profilinden sürtünme hızının hesaplanmasıyla modellenir ve daha sonra jeostrofik rüzgarı hesaplamak için jeotekstrik sürüklenme yasasında uygulanır.



Şekil 1.34. WAsP'da analiz edilen bir meteorolojik veri çıktısı örneği

Çift ekstrapolasyon metodu, modelin rüzgarın dikey ekstrapolasyonu için bir parametre olarak yüzey ısısı akışının iklimini kullanmasına izin verir. Bu, modelin sıklıkla ortaya çıkan logaritmik profilden sapmaları hesaba katmasına izin verir. Bu sapmalar, yüzdürme kuvvetlerinin türbülans dinamiğindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu sapma, yüzey ısısı akışının klimatolojik ortalama ve kök-ortalama karesini kullanan basit bir modelde açıklanmaktadır. Bu, yükseklik ve yüzeyler için farklı koşullar hesaplandığında, stabilite etkilerinin logaritmik rüzgar profiline göre sapmasına neden olur.

1.6.2. Topografik Veriler

WAsP, bölgesel rüzgar iklimini genelleştirmek için sahaya özgü topografik verileri kullanır ve daha sonra belirli bir lokasyonda öngörülen rüzgar iklimini elde etmek için ters hesaplamayı kullanır. Topoğrafik verilerin rüzgar hızı projeksiyonlarının belirsizliğini en aza indirmek için yeterli doğrulukta olması önemlidir. Bilginin WAsP tarafından okunabilen bir formatta dışa aktarılabilmesi için Coğrafi Bilgi Sistemi programına aktarılmıştır. WAsP bu bilginin olmasını gerektirir yükseklik kontur hatları olarak ihraç edilir. Kontur hatları WAsP tarafından önerilen 3 metrelik aralıklara sahiptir.

Yüzey pürüzlülük uzunlukları arazi örtüsü bilgileri ile belirlenir. Okunabilir bir WAsP uzamsal harita dosyası daha sonra dışa aktarılır ve analiz için kullanılır. Türbinlerin yerleri Google Haritalar kullanılarak da belirlenebilir. WAsP, son zamanlarda uzay haritalarını Google dünyasına yansıtmak için programlarını güncelledi. WAsP'a aktarılan ve analiz edilen haritanın alanı, tüm rüzgar çiftliğini ve tüm türbinlerin kenarlarından yaklaşık 5 kilometre her yönden içerebilir.

1.6.3. Güç Üretimi

WAsP, alan için genel bir rüzgar iklimi oluşturduğunda, MET verisinden hesapladığı ortalama rüzgarın toplam enerji içeriğini kullanır. Sağlanan Vestas türbini güç eğrisi ile rüzgar çiftliği düzenindeki türbinlerin her birinde yıllık enerji üretimini tahmin edebilir. Türbinin ve rüzgar çiftliği düzeninin itme katsayısı eğrileri daha sonra her türbin için iz kayıplarını tahmin etmek için kullanılır. Net yıllık enerji daha sonra tahmin edilebilir. Bu daha basit bir şekilde ifade edilebilir:

Her türbin sitesinde:

genelleştirilmiş rüzgar iklimi + saha tanımı $\rightarrow$ tahmini rüzgar iklimi

tahmin edilen rüzgar iklimi + güç eğrisi $\rightarrow$ rüzgar türbini yıllık enerji üretimi

Tüm rüzgar çiftliği için:

tahmin edilen rüzgar iklimi + rüzgar türbini jeneratörü özellikleri $\rightarrow$ rüzgar çiftliğinin yıllık brüt enerji üretimi

tahmin edilen rüzgar iklimi + rüzgar türbini jeneratörü özellikleri + rüzgar çiftliği düzeni $\rightarrow$ rüzgar çiftliği uyanıklık kayıpları

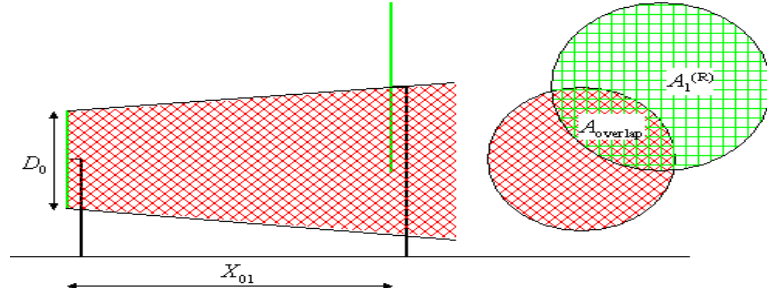
brüt yıllık enerji üretimi + iz kaybı $\rightarrow$ rüzgar çiftliğinin yıllık net enerji üretimi

Bu hesaplamalar, yıllık rüzgar çiftliği üretimi ile karşılaştırılabilir. Her türbin için net yıllık enerji üretimi, ölçülen verilerle karşılaştırmalar yapılabilir. Bunlara katkıda bulunan faktörleri belirlemek için önemli tutarsızlıklar bulunabilir ve analiz edilebilir. Program, seçilen bir alan üzerinde bir harita olarak görüntülenen bir rüzgar kaynağı ızgarası oluşturabilir. Bu kaynak ızgara haritası, kullanıcının yüksek verimli enerji konumlarını bulmasını sağlar. Bir türbin ortalamanın altında anlamlı bir şekilde üretiliyorsa, dakika uyanıklık kaybıyla, daha arzu edilen bir alan bulunabilir ve modifiye rüzgar çiftliği için üretim tahmin edilebilir.

1.6.4. Wake Effect Modelleme

WAsP, rüzgâr türbinlerindeki rüzgâr dalgalarının azalmasından dolayı rüzgâr santrallerindeki tahmini güç kaybını modelliyor. Düşük rüzgâr hızındaki bir yere yerleştirme çok az güç üretecek ve bir türbinin başka bir türbin yakınlığına yerleştirilmesi, uyandırma etkilerinden dolayı sahalardan birinde üretimi önemli ölçüde azaltabilir.

WAsP, uyandırma etkilerini ve güç üretimi üzerindeki etkilerini tahmin etmek için Park modelini uygular. Park modeli, hesaplamalarında bazı basitleştirmeler yapan, hesaplama hızlı bir modeldir. Program, türbin rotorunun arkasındaki hızda, türbinlerin itme katsayısı eğrisinden ve ampirik olarak belirlenen uyanma-bozunma sabitinden hesaplanan bir başlangıç kaybını varsayar. Bu, bir türbin rotorunun etrafındaki akıntı alanındaki belirli ayrıntıları ihmal ederek ve uyanışın mesafeyle doğrusal olarak genişlemesini varsaymak suretiyle hesaplamayı basitleştirir. Park modeli, akışın araziye takip ettiğini varsayar. Birden fazla uyandırma olduğunda, yukarı akım türbinlerinin uyandırma kesitlerini üst üste getirir.



Şekil 1.35. WAsP'in rüzgâr türbini çıkışı hesaplama örneği

Uyanma nedeniyle rüzgâr hızı açığı etkiler daha sonra azaltılarak hesaplanır:

$$\delta V_{01} = U_0(1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D_0}{D_0 + 2kX_{01}} \right)^2 \frac{A_{overlap}}{A_1^{(R)}} \quad (1.27)$$

U_0 , rüzgâr türbininin rotor çapı ile bozulmamış rüzgâr hızıdır ve k , uyandırma katsayısıdır. Tahmin edilen ve ölçülen veriler arasında önemli bir uyumun olduğu durumlarda, hakim rüzgâr yönündeki uyanıklık kaybı, karşılaştırma için WAsP'den kullanılacaktır.

1.6.5. Wasp Sınırlamaları

WASP içinde kullanılan sayısal modellerde yapılan basitleştirmelerden dolayı, program önerilen çalışma zarfı dışında kullanıldığında birtakım hatalı sonuçlar doğurabilir. Bir site karmaşık, engebeli arazi veya çok karmaşık atmosferik koşullara sahip olduğunda, WASP'nin doğruluğu güvenilirmez olabilir. WASP, tüm ızgara düzeninin orografisini ve site dayanıklılık endeksini analiz eder. İlişkili performans göstergesi, bir projedeki sorunlu siteleri belirleyebilir. Site dayanıklılık endeksi, çevreleyen arazinin, WASP akış modelinin operasyonel zarfı içinde yer alan kritik bir eğimden daha dik olan kısmı olarak tanımlanır.

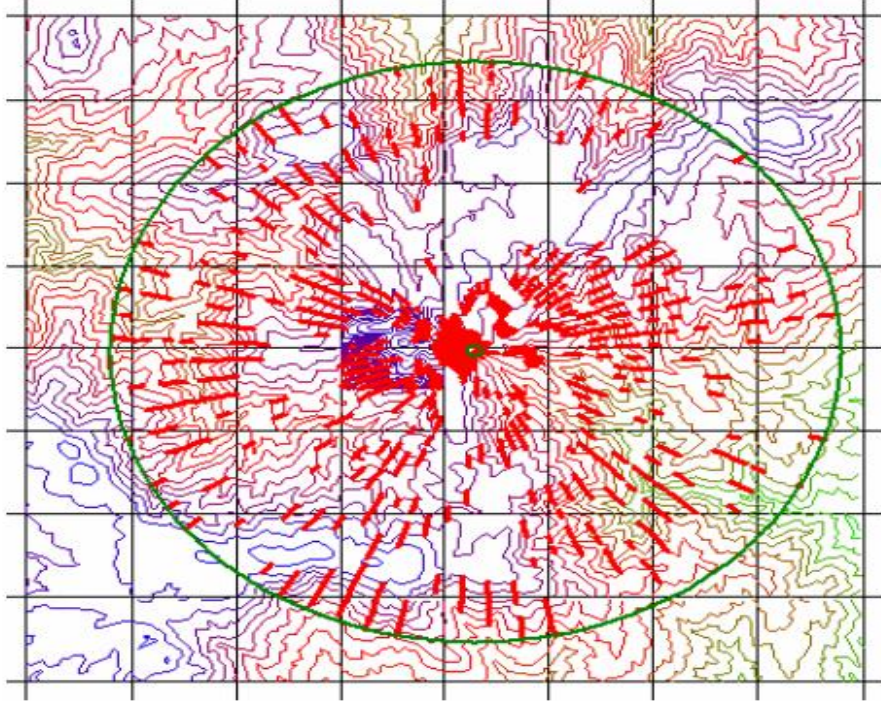
Bu sorun, rüzgar gözlemlerinin mevcut olduğu birkaç referans sitesi ve çapraz referanslama siteleri kullanılarak çözülebilir. Karmaşık arazide modelin doğruluğunu önemli ölçüde artıracak sorunlu sitelerde bazı kullanıcı düzeltmeleri için seçenek bulunmaktadır. Bu metot, bir düzeltme faktörünü hesaplamak için ΔRIX 'i (Site dayanıklılık endeksi) kullanır, bu da her bir türbin bölgesinde göbek yüksekliğinde rüzgar hızını azaltmak / arttırmak için WASP içine sokulabilir. Formül, ΔRIX ve rüzgar hızlarının tahmin hatası arasında bir ilişkiyi bulmak için birkaç kişinin kullandığı bir çalışmadan türetilmiştir. Elde edilen formül:

$$U_m = \frac{1}{\exp(\alpha \Delta RIX)} U_p \quad (1.28)$$

U_p Göbek yüksekliğinde öngörülen rüzgar hızıdır. Ölçülen ve tahmin edilen AEP'de anlamlı bir fark olduğunda, RIX ve ΔRIX , projeksiyon hataları ile korelasyonunu değerlendirmek için analiz edilecektir.

WASP'nin geniş ormanların yakınındaki projeksiyonlarda da sorun olduğu biliniyor, bu bölgelerdeki rüzgar hızını abartma eğilimi gösteriyor. Daha yakın zamanda rüzgar enerjisi endüstrisi, rüzgar enerjisi endüstrisinde kullanılmak üzere Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modellerinin kullanımını uygulamaya çalışmaktadır.

Bu modeller rüzgar ve türbülans alanı için kararlı durum, zamandan bağımsız bir çözüm geliştirir. Navier-Stokes denklemlerinin kütle ve momentum korunumunu çözerler. Bu, WASP'ye kıyasla akış alanının fiziksel olarak daha doğru bir modellenmesidir.



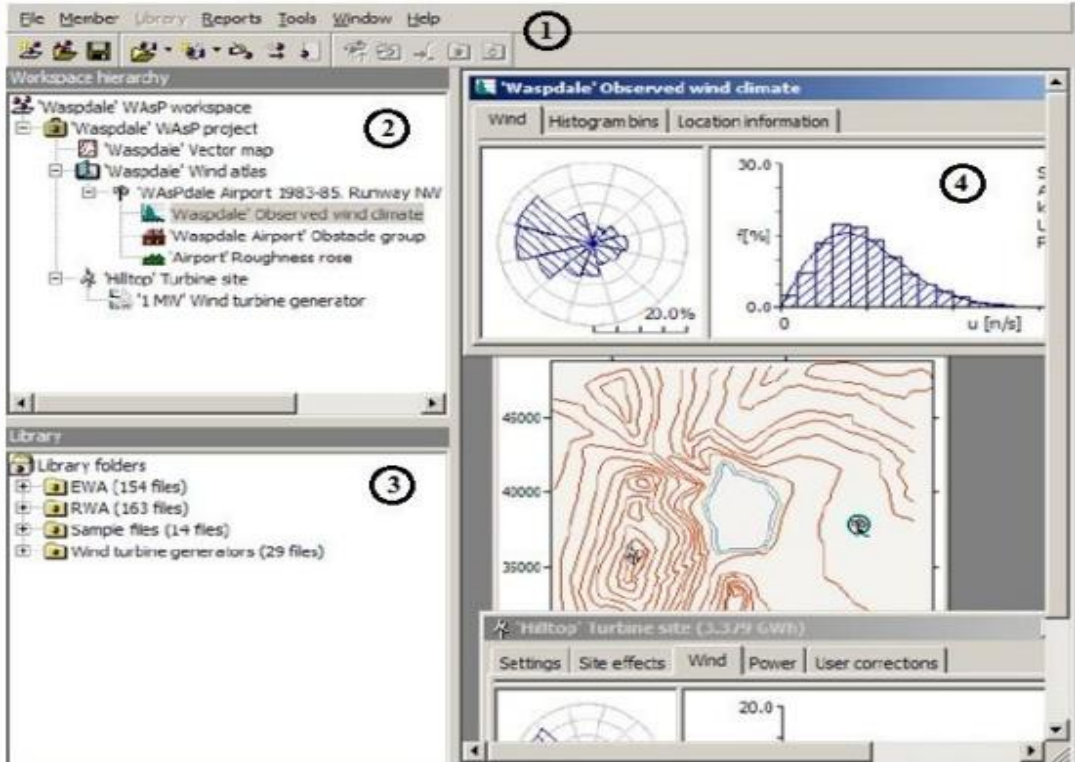
Şekil 1.36. WASP harita düzenleyicisi

Karmaşık arazilerde WASP'nin CFD-modelleriyle karşılaştırıldığı birkaç çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, CFD-modellerinin kullanılmasının bazı durumlarda bir iyileşme sağladığını, ancak hepsi için olmadığını göstermektedir. Bu CFD modelleri çok karmaşıktır ve önemli bir bilgisayar gücü gerektirir. Gerekli hesaplamaları tamamlamak için süper bilgisayarları birkaç saat alır. Genel olarak WASP modelleri, zarfın içinde ve hatta biraz dışarısında çalıştırıldığında performans gösterir.

CFD modelleri kaçınılmaz olarak endüstri standardı olacak, ancak mevcut bilgisayar güç ikliminde onlarca yıl gibi görünüyor. WASP, yeni modelleme tekniklerini geliştirmeye ve benimsemeye devam ederek, daha karmaşık arazilerde kullanıma uyum sağlamasına yardımcı olacaktır.

Rüzgar projeleri, arazisinden dolayı yüksek hız alanlarından yararlanmak için daha karmaşık bir alana taşındıkça hızlı CFD modellerinin önemi artacaktır. Bu proje için, bu rüzgar santrali için WASP tarafından tasarlanan birçok faktör analiz edilecek ve gerçek 10 dakikalık rüzgar hızı ve güç üretimi aralıkları ile karşılaştırılacaktır. Bu, söz konusu rüzgar çiftliği için WASP'nin doğruluğunun sonucunu çıkarmamızı sağlayacaktır.

1.6.6. WAsP Programı Ara Yüzü



Şekil 1.37. WAsP programı ara yüzü

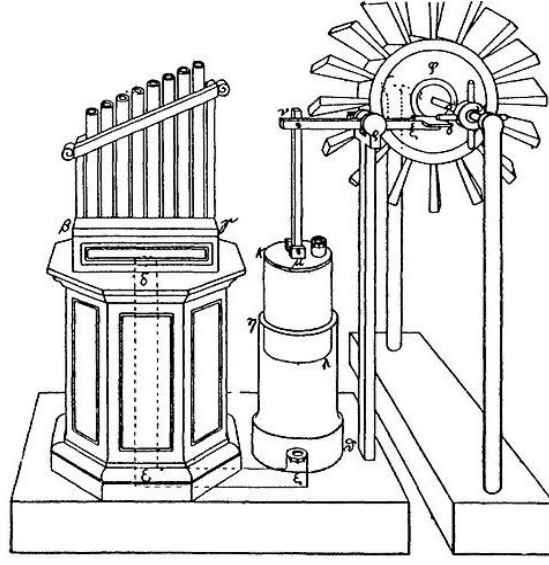
Şekil 1.37'de WAsP programının ara yüzü ve programdan alınan ekran görüntüsü gösterilmiştir. WAsP programı araç çubukları ve kısa yolların yer aldığı birinci bölüm, rüzgar verileri, türbin verileri, haritalar ve rüzgar atlasının sisteme eklendiği ikinci bölüm, rüzgar türbin modelleri ve generatörlere eriştiğimiz WAsP kütüphanesinin yer aldığı üçüncü bölüm ve son olarak çalışma alanının bulunduğu dördüncü bölümden oluşmaktadır.

1.7. Rüzgar Enerjisi

1.7.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

İlk kaydedilen tarihlerden beri insanlar rüzgâr enerjisinden yararlandılar. Rüzgar enerjisi M.Ö. 200'lü yıllarda Nil nehri boyunca kayıkların yüzdürülmekte, Çin'deki basit yel değirmenleri su pompalamada kullanılmıştır. Dokuma kamış yelkenli dikey eksenli yel değirmenleri ile ise İran ve Orta Doğu'da tahıl öğütmede kullanılmıştır [29].

Rüzgâr enerjisini kullanmanın yeni yolları, 11. yüzyılın sonunda Orta Doğudan dünyaya yayıldı. İnsanlar yiyecek üretimi için yoğun bir şekilde yel değirmenlerini kullandılar. Geri dönen tüccarlar bu fikri Avrupa'ya taşıdı. Yerleşimciler bu teknolojiyi 19. yüzyılın sonlarında yeni dünya'ya götördüklerinde öncelikle çiftliklerin ihtiyacı olan elektriğin üretiminde, depolama amacıyla kullanılan pillerini doldurulması işleminde, pillerin şarj edilmesi işleminde, su depolanması işleminde, taşımacılıkta, su pompalanması işleminde, tahılların öğütülmesi işleminde ve soğutma işlemleri için kullanılmıştır [30-32].



Şekil 1.38. Heron'un ilk rüzgarla çalışan su pompası

II. Dünya Savaşı sırasında, 1940'larda bilinen en büyük rüzgar türbini, Grandpa'nın Topuzu olarak bilinen bir Vermont tepesine oturtulmuş 1,25 megawattlık bir türbin, yerel elektrik şebekesine elektrik gücü vermiştir. Rüzgar elektrik türbinleri Danimarka'da 1950'lerde kalmaya devam etti, ancak ucuz petrol ve düşük enerji fiyatlarının mevcudiyeti nedeniyle nihayetinde düştü.

1970'lerin petrol sıkıntısı ABD ve dünya için enerji resmini değiştirdi. Alternatif enerji kaynaklarına bir ilgi oluşturdu ve rüzgar türbininin elektrik üretmek için yeniden girişini önledi. 1980'lerde ve 1990'ların başında düşük petrol fiyatları rüzgar enerjisinden elektrik üretmeyi tehdit etmedi. Altamont Pass gibi büyük rüzgar kaynak alanlarında kümelenen türbinler, modern rüzgar çiftliği geliştirme standartları ile küçük ve ekonomik olmayan olarak kabul edilecektir.

Modern rüzgâr enerjisi endüstrisi 1979'da, Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretmesiyle başladı. İlk olarak her biri 20-30 kW'lık olan rüzgar türbinleri günümüzde 7 MW'a kadar güç üretmekte ve dünyanın bir çok ülkesinde kullanılmaktadır [33].

Günümüzde, rüzgar enerjili jeneratörler, küçük konutlardan, bataryalı konutlarda akü şarjı için, ulusal elektrik iletim sistemlerine elektrik sağlayan büyük, yakın-gigawatt boyutlu açık deniz rüzgar santrallerine kadar her boyutta çalışmaktadır.

1.7.2. Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Türleri ile Karşılaştırılması

Enerji üretiminde proje geliştiriciler ve yatırımcılar karar verme noktasında bazı kriterleri göz önüne almak zorundadır bular; maliyet faktörü, çevre etkisi, kaynağa ulaşılabilirlik ve kaynağın potansiyelidir. Tablo1.1'de rüzgar enerjisinin diğer enerji türleri ile kıyaslanması çevresel faktörler göz önüne alınarak yapılmıştır.

Tablo analiz edildiğinde çevresel anlamda tek olumsuzluk gürültü parametresidir. Rüzgar türbinlerinin kurulumunun yerleşim yerleri dışında kurulduğu düşünülürse bu olumsuzluğun etkisi çok büyük bir önem arz etmemektedir. Tablo 1.2'de ise maliyet faktörü, kaynağa ulaşılabilirlik ve kaynak potansiyeli bakımından kıyaslanmıştır.

Tablo 1.1. Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri açısından değerlendirilmesi

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	Var	Var	Var	Var	Var	-
Kömür	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Doğal Gaz	Var	Var	Var	-	Var	-
Nükleer	-	-	Var	Var	-	Var
Hidrolik	Var	-	-	-	-	-
Rüzgar	-	-	-	-	Çok Az	-
Güneş	-	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	Var	Var	-	-

Tablo 1.2 analiz edildiğinde rüzgar enerjisi maliyet analizi bakımından kömür, jeotermal, hidrolik ve doğal gaz karşısında birim maliyet bakımından dezavantajlı gibi görünse de kaynağa ulaşılabilirlik ve kaynak potansiyeli olarak yerli bir kaynak olması ve güneş var olduğu müddetçe rüzgarında var olacağı göz önüne alındığında rüzgar enerjisinden elektrik üretimi her şart altında büyük kazanç sağlayacaktır [34].

Tablo 1.2. Enerji üretim metotlarının maliyet ömür ilişkisi

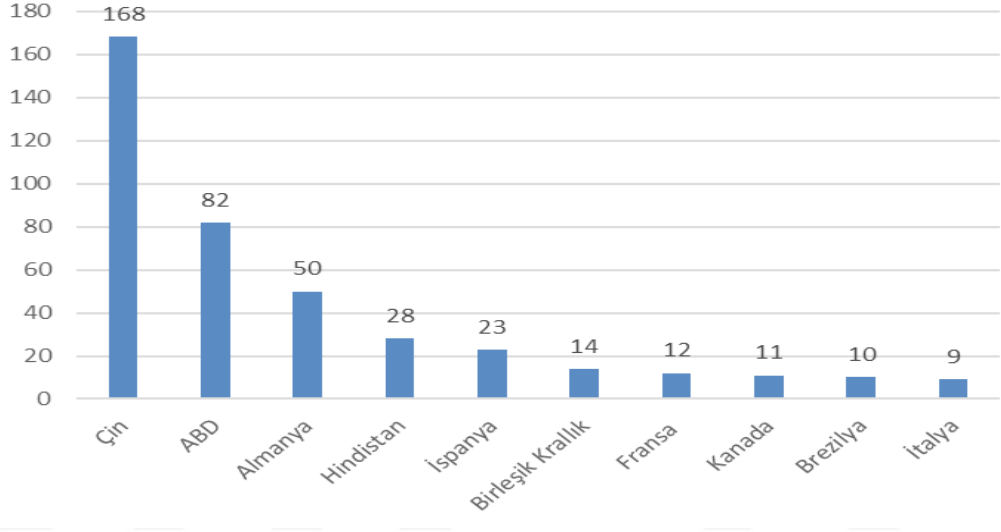
Enerji Türü	Dışa Bağımlı/ Yerel	Kalan Ömür (Yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/KWh)	Üretim Maliyeti (\$/KWh)
Petrol	Dışa bağımlı	40-45	1.500-2.000	6.0
Kömür	Yerel/Dışa bağımlı	200-250	1.400-1.600	2.5-3.0
Doğal Gaz	Dışa bağımlı	60-65	600-700	3.0
Nükleer	Dışa bağımlı	-	3.000-4.000	7,5
Hidrolik	Yerel	-	750-1.200	0.5-2.0
Rüzgar	Yerel	-	1.000-1.200	3.5-7.0
Güneş	Yerel	-	Yüksek	10.0-20.0
Jeotermal	Yerel	-	1.500-2.000	3.0-4.0

1.7.3. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu

WWEA'nın dünya çapında bugünün yayınladığı ön istatistiklere göre, 2017 yılı sonunda dünya çapında kurulu tüm rüzgar türbinlerinin toplam kapasitesi 539.291 MW'a ulaştı. 2017 yılında 52.552 MW, 51.402 MW'ın çevrimiçi hale geldiği 2016'dan biraz daha fazla eklenmiştir. Bu, 2015 ve 2014 rekor yıllarından sonra bir yıl içinde kurulan üçüncü büyük sayıdır. Bununla birlikte, rüzgâr türbinlerinin endüstriyel dağıtımının 20. yüzyılın sonundan itibaren başlamasından bu yana, sadece % 10,8'lik yıllık büyüme oranı en düşük büyüme olmuştur.

2017 yılı sonuna kadar kurulan tüm rüzgar türbinleri, küresel elektrik talebinin% 5'inden fazlasını karşılayabilir. Birçok ülke için, rüzgar enerjisi, fosil ve nükleer enerjiyi saf dışı bırakma stratejilerinde bir ayağı haline gelmiştir. Artan sayıda ülke, Almanya, İrlanda, Portekiz, İspanya, İsveç ve Uruguay dahil olmak üzere çift haneli bir rüzgar enerjisi payına ulaştı.

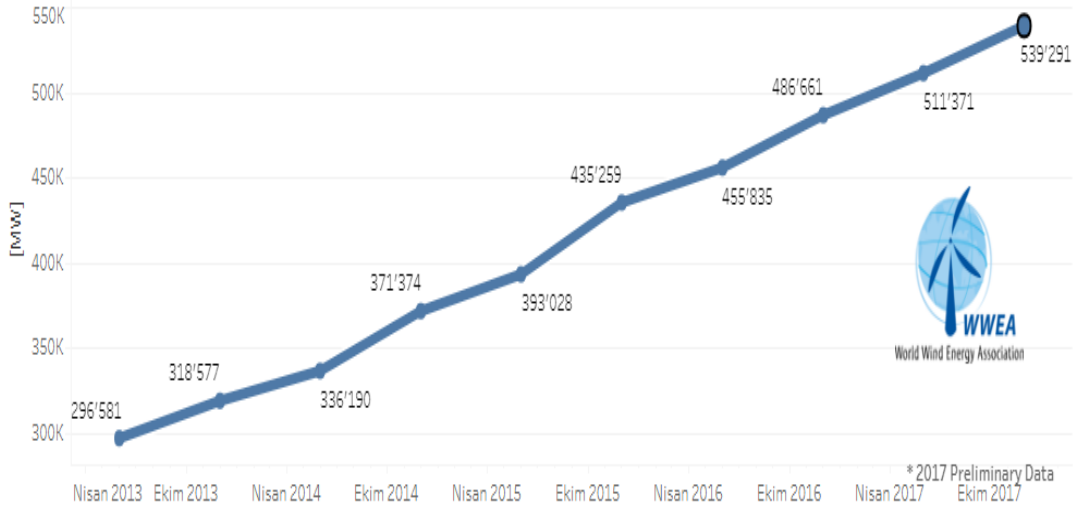
En büyük rüzgar enerjisi pazarı olan Çin, 2016'dan biraz daha az olan 19 GW'lık bir kapasite daha kurdu ve 188 GW'lık bir rüzgar kapasitesi ile dünyanın rüzgar enerjisi lideridir. Önde gelen pazarlarda ABD (6,8 GW, toplamda 89 GW'a ulaştı), Almanya (6,1 GW yeni, 56 GW yeni), Hindistan (4,6 GW ekledi, 32,9 GW toplam kapasite) Birleşik Krallık (3,3 GW yeni, 17,9 GW toplamı), Brezilya (2 GW yeni, 12,8 GW toplamı) ve Fransa (1,7 GW yeni, 13,8 GW toplamı) ile ciddi bir büyüme kaydetmiştir.



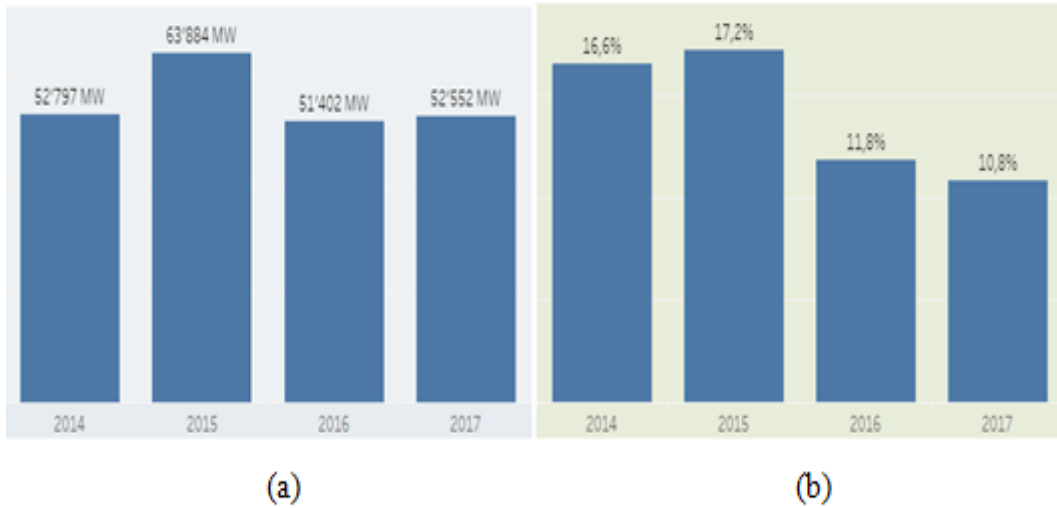
Şekil 1.39. Ülkelere göre rüzgâr enerjisi kurulu gücü (2016, GWEC) [35].

IEA'nın yaptığı araştırmalara göre rüzgar hızının 5,1 m/s ve üzerinde olduğu alanlar için yapılan hesaplamalara göre dünyanın rüzgar enerji potansiyeli 53000 TWh/yıl olarak tahmin edilmektedir [36]. Şekil 1.39 incelendiğinde en fazla kurulu güce sahip ülkenin Çin olduğu onu sırasıyla ABD, Almanya ve Hindistan'ın izlediğini görüyoruz.

Bununla birlikte, özellikle İspanya ve Portekiz'den gibi, Avrupa'daki belli başlı pazarların bir kısmı durgunlukla karşı karşıya kaldı. Aynı zamanda, Almanya'daki ve diğer bazı Avrupa pazarlarındaki yeni kurulum rekoru, Avrupa Komisyonu tarafından empoze edilen ve tarifeleri ile Avrupa Komisyonu tarafından dayatılan ihalelere geçiş nedeniyle beklenen bir piyasa çöküşünün sonucudur. Şekil 1.40'da 2013-2017 yılları arasındaki toplam kurulu rüzgar gücü kapasiteleri verilmiştir.



Şekil 1.40. Dünyadaki toplam kurulu kapasite (2013-2017)



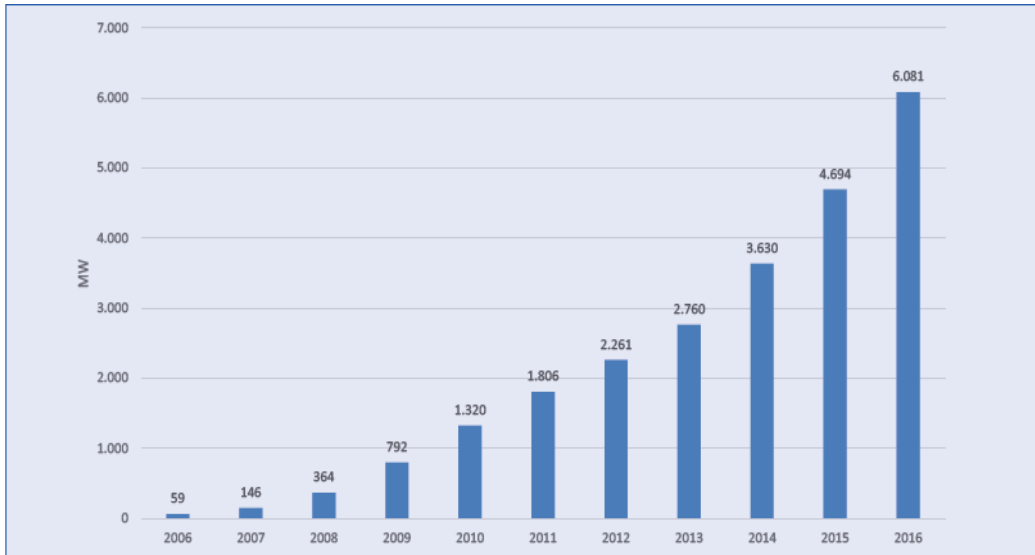
Şekil 1.41. (a) Dünyadaki yeni kurulu kapasite (b) Dünyadaki büyüme oranı

Şekil 1.41'da dünyada yeni eklenen rüzgar güç kapasitesi ile bunun oranı verilmiştir. Dünya çapında daha fazla coğrafi çeşitlenme ile el ele giden rüzgar gücünün genel, güçlü büyümesi çok cesaret verici. Latin Amerika ve son dönemde Afrika gibi yeni dünya bölgeleri bu dinamik gelişmede önemli bir rol oynamaktadır. Açıkçası, birçok hükümet, emisyonun olmadığı, ucuz, yerli ve erişilebilir olduğu ve Paris anlaşmasını başarmak için çok çekici bir yol sunduğu için rüzgar gücünün toplumlarına büyük faydalar getirdiğini anladı.

1.7.4. Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu

Rüzgâr enerjisi ile ilgili çalışmaların ülkemizde eski zamanlara dayandığı gibi, gelişme aşamalarının dengesizliği de dikkat çekicidir. 1980'li yılların ortalarından itibaren enerji üretimi üzerine araştırma yapan ilk kurum EİE oldu. Rüzgar enerjisi ile ilgili yasal bir düzenleme olmamasına rağmen, ilk EİE çalışmaları Türkiye'nin rüzgar potansiyelini tespit etmek için araştırma faaliyetlerinden oluşmaktadır.

Şekil 1.42'de görüldüğü gibi Türkiye'nin toplam kurulu kapasite 2016 yılı sonunda 6.081 MW'a ulaştı. Bu yıl 113 adet rüzgar santralinden 11.543.050 MWh elektrik üretildi. REPA'ya göre, Türkiye'nin en cazip bölgeleri batı bölgesi ve Marmara bölgesidir ve rüzgar hızının 50 metrede 7 m / s'den yüksek olduğu alanlarda üretilen 88.000 MW'lık potansiyelden 130 milyar kWh elektrik olabilir.



Şekil 1.42. Türkiye'nin kurulu rüzgar enerji gücü

Ülkemizde yürütülen çalışmalar, henüz başlangıç aşamasında olan rüzgar enerjisi sektörünün altyapısını Türkiye'de kurmayı ve kısa, orta ve uzun vadede yeteri kadar gelişmeyi sürdürmeyi hedeflemektedir. Belki de en önemlilerinden biri olan bu çalışmalardan biri “Türk Rüzgar Atlası”, diğeri ise bu alanda gerekli olan yasal düzenlemeler. Bu temel ihtiyaçlar kapandığında, Türkiye elektrik üretiminde rüzgar enerjisinden yıllar süren belirsizliği durdurabilir ve birçok yeni projenin hayata geçirilmesini mümkün kılabilir.

1.7.5. Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyeli

Türkiye Rüzgar Enerjisi'nin hazırlanmasından önce ülkemizin rüzgar potansiyelinden ne kadar elektrik alınabileceği konusunda farklı rakamlar kullanılmıştır. Rakamlardaki bu farklılığın ana nedeni, rüzgar enerjisinden enerji üretimine yönelik verilerin yetersizliği idi. EİE tarafından hazırlanan Türkiye Rüzgar Atlası ve yapılan çalışmalar Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini 48 000 MW olduğunu gösteriyor.

Hem Türkiye Rüzgar Atlası verileri hem de saha deneyimlerinin sonuçları, EİE ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü dışındaki bazı mühendislik şirketlerinin özellikle İzmir, Balıkesir, Çanakkale ve Hatay'da rüzgar hızı hesaplamaları yaptıklarını, Elektrik Piyasası Kanunu'nun yürürlüğe girmesinden sonra çok daha fazla yatırımcı rüzgar enerjisi sektörüyle ilgilenmeye başladı. Özel sektör girişimcilerini rüzgar enerjisine yatırım yapmaya teşvik edecek düzenlemeler, elektrik piyasasına ilişkin yönetmelikte 2005 yılına kadar gerçekleştirilemedi. Ancak, Yenilenebilir Enerji Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle 2005 yılında yenilenebilir kaynaklardan temin edilen elektrik, rüzgar enerjisi projelerinin önünü açan satın alma garantisi altında güvence altına alınmıştır. Bu çerçevede serbest piyasada yenilenebilir kaynaklardan üretilecek elektrik enerjisinin satışına ilişkin alternatifler sunulmuştur.

Ülkemizde EİE ve MGM ortak girişimi ile rüzgarın hızı, yönü ve enerji gücü ile ilgili çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmaların önemi, doğrudan enerji üretimine yönelik hesaplamaların yapılmasından kaynaklanmaktadır. Türkiye Rüzgar Haritası, rüzgar enerjisi sektörünün farklı bir gelişme aşamasına girmesini sağlamıştır.

Verimli bir rüzgar enerji santrali için ortalama rüzgar hızının en az 7 m / s rüzgar hızı gerektirir. Orta Karadeniz'den başlayan hemen hemen tüm Marmara, Ege ve Akdeniz kıyıları güçlü rüzgarlara sahiptir [37,38].

Kapıdağ Yarımadası ve çevresi Güney Marmara sahillerinde, tüm Gelibolu Yarımadası, güney-güneydoğu yönünde Çandarlı Körfezi'ne kadar uzanan Çanakkale Boğazı'ndan başlayan rota,. Doğu Akdeniz'de Amanos Dağlık Bölgesi'nin güney tarafı, kuzey-batı, güney-doğu yönünde Taşeli Yaylası'na, Orta Anadolu'da Erciyes Dağı'ndan başlayıp güneydoğu, , Doğu Anadolu bölgesinde Palandöken Dağları ve Erzurum ve çevresinin hemen yanında, Malatya ile Bingöl, Karacadağ ve çevresi, Ağrı Dağı ve çevresi arasında kalan çizgi ile Türk İran sınırı, rüzgar gücünün önde gelen bölgeleri arasındadır. Tablo 1.3'de Türkiye'nin bölgelere göre rüzgar enerji potansiyeli verilmiştir.

Tablo 1.3. Türkiye'nin farklı bölgelerinde rüzgar enerji potansiyeli [37,38].

Bölgeler	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Ortalama Rüzgar yoğunluğu (W/m ²)
Marmara Bölgesi	3,29	51,91
Ege Bölgesi	2,65	23,47
Akdeniz Bölgesi	2,45	21,36
İç Anadolu Bölgesi	2,46	20,14
Karadeniz Bölgesi	2,38	21,31
Doğu Anadolu Bölgesi	2,12	13,19
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	2,69	29,33
Ortalama	2,58	25,82

50 m'de ortalama rüzgar hızı dağılımından hazırlanan Tablo 1.4'e baktığımızda ülkemizdeki toplam potansiyel gücün % 63,7'sinin orta sınıf rüzgâr alanlarına, % 22,2 sini iyi rüzgârlı rüzgâr alanlarına ve % 14,1 mükemmel sınıf rüzgar alanlarına dağıtıldığını görmekteyiz. 6,8 m / s'den fazla hız ile tüm rüzgârlardan elektrik üretilmesi durumunda, kullanılacak ülke alanının yaklaşık 2/3'ünde 131 756 MW kurulu güce sahip rüzgar enerjisi kurulması mümkün olacaktır. Ancak, sadece iyi ve mükemmel sınıf rüzgarları olan alanlar kullanıldığında, 47 849, 44 MW gücünde rüzgar santralleri kurmak mümkün olacaktır [39].

Tablo 1.4. Türkiye'nin 50 m yükseklikte iyi - sıra dışı arası rüzgar kaynağı [39]

Rüzgar Kaynak Derecesi	Rüzgar Sınıfı	50 m'de Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	50 m'de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (Km ²)	Rüzgarlı Arazi Yüzdesi (%)	Toplam Kurulu Güç (MW)
Orta	3	300-400	6.5 - 7.0	16.781,39	2,27	83.906,00
İyi	4	400 - 500	7.0 - 7.5	5.851,87	0,79	29.259,36
Hanika	5	500 - 600	7.5 - 8.0	2.598,86	0,35	12.994,32
Mükemmel	6	600 - 800	8.0 - 9.0	1.079,98	0,15	5.399,92
Sıra dışı	7	>800	>9.0	39,17	0,01	195,84
Toplam				26.351,28	3,57	131.756,40

Ülkemizin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 40 000 - 80 000 MW arasında değişmektedir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli şu şekilde hesaplanabilir: Türkiye'nin 776 000 Km² (77 600.000 hektar) olduğunu varsayabiliriz. Rüzgar enerjisi üretimine toplam alanın sadece 1 katı (uluslararası standart, Avrupa için 0,5) kullanılacaksa, 776 000 hektar arazi kullanılacak.

Toplam 77 600 türbin 10 hektarlık bir arazi için kullanılacaksa (teknik standart), 1 MW kapasiteli bir türbin yılda yaklaşık 2 500 000 - 3 000 000 kWh enerji üretmektedir. Bu, toplam 200 milyar kWh enerji üretimi anlamına gelir. Çalışmalar, ülkelerin mevcut elektrik iletim sistemlerinde herhangi bir değişiklik yapma zorunluluğu olmaksızın, toplam elektrik üretiminin en az 15'ini rüzgar enerjisinden alabildiğini göstermiştir.

Ülkemizde kişi başına tüketilen enerji miktarı dünya ortalamasının altındadır. Gelişmekte olan bir ülke olarak, rüzgar enerjisi, bu gelişme sırasında giderek artan bir şekilde artan enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir potansiyel olarak kabul edilmektedir. Rüzgar enerjisi dışındaki enerji üretimindeki yatırımların tamamı, şimdiye kadar özel sektör tarafından gerçekleştirilmiştir. Gelecekte de aynı olması çok olasıdır. Rüzgar enerjisinden enerji üretiminde son zamanlarda elde edilen gelişme ivmesi çoğunlukla enerji politikaları ile ilgilidir. Enerji stratejileri ile yaklaşmak ve bunları sürdürülebilir bir seviyede uygulamak, ancak bu yaklaşımları devlet politikalarında yapmakla mümkün olacaktır.

1.7.6. Rüzgar Türbinleri

1.7.6.1. Rüzgar Türbinlerinin Tarihçesi

Bilinen en eski rüzgar enerjisi kullanımı kesinlikle yelkenli tekne. Avrupa'da, yel değirmenleri ilk olarak 12. yüzyılda ortaya çıktı. Amerika'da 1850 ve 1900 yılları arasında çok sayıda yel değirmeni çiftlikte sulama pompaları işletmektedir. 1900'lü yıllarda, Danimarka'da, yaklaşık 2500 adet değirmen, pompalar ve değirmenler gibi mekanik yükler için yaklaşık 30 MW'lık tahmini bir kombine tepe gücü üretiyordu. 20. yüzyıl rüzgar gücünün en belirgin etkisi, elektrik kullanımının artmasıydı. Aerodinamikteki gelişmeler bugün rüzgar türbinlerini güçlü rüzgar türbinlerine dönüştürdü. İşte rüzgar gücünün geçmişindeki dönüm noktalarına bir bakış;

Rüzgârın eski tarihi, Eski zamanlardan beri insanlar rüzgâr enerjisinden yararlandılar. 5000 yıldan uzun bir zaman önce, eski Mısırlılar Nil Nehri üzerindeki gemilere yelken açmak için rüzgar kullandılar. Daha sonra, insanlar buğday ve diğer tahılları öğütmek için yel değirmenleri inşa ettiler. Bilinen en eski yel değirmenleri İran'da idi. Bu erken yel değirmenleri büyük kürek çarklarına benziyordu. Yüzyıllar sonra, Hollanda halkı yel değirmeninin temel tasarımını geliştirdi. Pervane tipi bıçaklar verdiler.



Şekil 1.43. Panemone rüzgar türbini

1890 Deney, 1890'lardaki sanayileşmenin bir parçası olarak, gençler elektrik ve modern bir yaşam tarzı olan daha büyük kasabalara taşındı. Fizikçi, meteoroloji uzmanı, mucit ve halk öğretmeni olan Poul la Cour, küçük topluluklara elektrik anlatmak için zaman harcadı. İlk deneysel yel değirmeni 1891'i küçük Askov kasabasında inşa etti. Lunderskov'daki LM Wind Power'scradle'ye 20 km'den daha az bir mesafede yer almaktadır. İlk yel değirmeni, yüzyıllardır mısır öğütmek için bilinen tanınmış rüzgar değirmenlerine dayanıyordu. Ama bunlar hızla ayarlanabilir menteşeli ağaç kepenkleri veya kanatçıklarına dönüştü. Rüzgarın dengesiz doğası, istikrarlı bir güç kaynağının elde edilmesinde bazı zorluklara neden oldu. Bunu çözmek için Poul la Cour, “kratostat” , yel değirmeninin dengesiz tahliyesini sağlayan bir cihaz icat etti. Bu bir başarı olduğunu kanıtladı ve kratostat jeneratörü geri çekti.

1920 Kanatları ekleme, 1919'da iki Danimarkalı mühendis, Johannes Jensen ve Poul Vinding, yeni bir yel değirmeni olan The Agricco'yu tasarladılar ve patent aldılar. Kanatlar, bir uçağın kanatları olarak tasarlandı ve her bir bıçak, perde ayarlı bıçaklar gibi farklı konumlara dönüştürülebildi. Bu yel değirmeni rüzgara karşı otomatik olarak döndü. Rüzgar pazarı 1920'den sonra azaldı, ama fikir kaldı. İkinci Dünya Savaşı sırasında rüzgar gücüne olan ilgi yeniden canlandırıldı ve teknoloji daha da büyük ölçekte gösterildi.

1950 Modern rüzgar türbinlerinin tanıtımı, Poul La Cour'un Askov'dan gelen çıraklarından Johannes Jull, 1950'lerin ortalarında, Danimarka elektrik şirketi SEAS ile birlikte yeni ve daha modern bir rüzgar türbini inşa etti. Bu türbin 12 metre direk ve iki adet 8 metre bıçak ve 10 kW jeneratöre sahipti. Rüzgarın olası etkisinin% 60'ına yakın kullanılır. Sadece birkaç yıl sonra bir ağaç kanadı türbini dikildi ve bu, ilk türbinden daha küçük bir rotor çapına rağmen, 65 kW'a kadar üretildi [40].

1970 Bir endüstri doğdu, 1970'lerde yaşanan petrol krizi, rüzgar santralini bir kez daha güçlendirdi. 15 yıllık bir süreçte, tüm öncüler, tüm icadı ve teorileri herkes için hazırlayarak, rüzgar gücünün başarılı bir şekilde gelişmesini sağladı. Bu dönemde Vestas ve LM Rüzgar Gücü gibi kuruluşun kurulduğu büyük firmaların bazıları oldu [41]. Ayrıca Nordtank, Micon ve Bonus gibi şirketler de kurulmuş ve daha sonra başkaları tarafından satın alınarak birleşmişlerdir.

1980'lerde, 1-50 kilowatt'lık güç özelliklerine sahip rüzgar türbinlerinin, kolayca inşa edilebilen, daha uygun fiyatlı ve bakımı daha kolay olanları görmek yaygındı. Bu verimli yatay eksenli rüzgar türbinleri, şu anda rüzgar çiftliklerinde ya da belki de tek bir ev için yurt içinde gördüğümüz türbinlerdir.

1.7.6.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Aslında şu anda üretimde olan iki farklı türdeki rüzgar türbini vardır, diğer bazı çeşitleri de teorileştirilmiştir. Rüzgar türbinlerinin iki ana kategorisi dikey eksenli rüzgar türbinleri ve yatay eksenli rüzgar türbinleridir [42]. Bu iki farklı türdeki rüzgar türbinleri nispeten benzer metotlarla çalışsalar da, bunların nasıl işledikleri konusunda da önemli farklılıklar vardır. Bu iki ana sınıflandırma ile birlikte, eşsiz koşullarda çalışmak için var olan birçok farklı türdeki rüzgar türbini de vardır.

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri, günümüzde kullanımda olan ve günümüzde daha yaygın olan rüzgar türbini tipidir. Örneğin, yel değirmenleri, modern rüzgar-çiftlik türbinlerinin çoğunda olduğu gibi, kendilerini güçlendirmek için yatay eksenli rüzgar türbini kullanır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri yatay bir rotor şaftında pervane kanatlarına rüzgara karşı çalışarak çalışır. Rüzgarın hareketi bıçakların dönmesine neden olur, tıpkı bir fırıldak gibi. Şekil 1.44'deki gibi bıçaklar sabittir ve rüzgarda onlarla birlikte dönen rotor miline bağlanır [43].



Şekil 1.44. Yatay eksenli rüzgar türbini

Yatay eksenli türbinler, bir kule üstündeki ana rotor şaftına ve elektrik jeneratörüne sahiptir ve rüzgara işaret edilmelidir. Küçük türbinler basit bir rüzgar kanadına işaret ederken, büyük türbinler bir servo motor ile birleştirilmiş bir rüzgar sensörü kullanır. Çoğunda, bir elektrik jeneratörü sürmek için daha uygun olan, kanatların yavaş dönüşünü akıcı rotasyona çeviren bir şanzıman vardır.

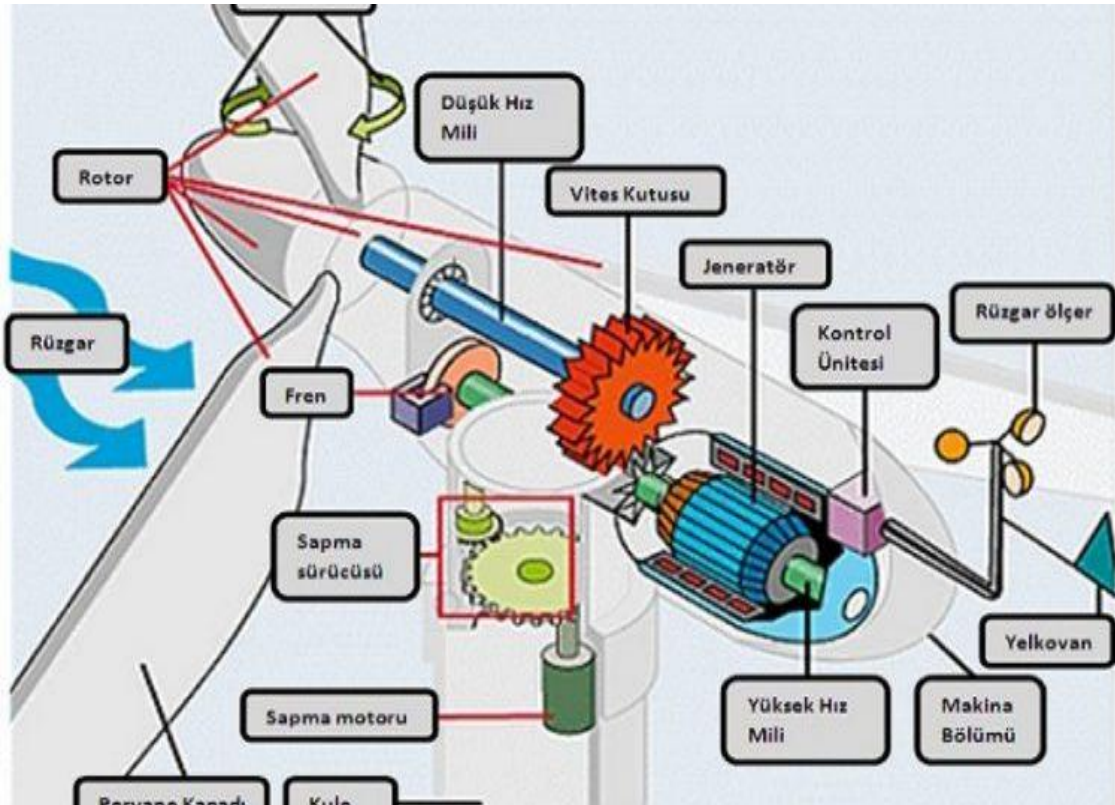
Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri , yatay eksenli rüzgar türbinlerine çok benzer prensiplerde çalışır, ancak birkaç anahtar ile ayrımlar. Başlamak için, dikey bir rüzgar türbininin rotor mili, rotor şaftının etrafında düzenlenmiş rüzgar yakalama bıçakları ile dikey olarak düzenlenir. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin çalışabilmesi için rüzgarın rüzgar yönünde olmasına gerek yoktur çünkü bıçaklar düzenlenmiştir. Rotor şaftı etrafında homojen olarak ve herhangi bir yönden rüzgarı yakalayabilir. Bıçaklar rüzgarı yakalar ve tüm aparatı dairesel bir hareketle döndürür. Bu kinetik etkinin yarattığı enerji daha sonra iş yapmak veya elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilir.



Şekil 1.45. Dikey eksenli rüzgar türbini

Şekil 1.45'deki gibi dikey eksenli türbinler ana rotor miline dikey olarak yerleştirilmiştir. Bu düzenlemenin temel avantajları, türbinin etkili olması için rüzgara işaret edilmesine gerek olmamasıdır. Bu, rüzgar yönünün oldukça değişken olduğu, örneğin binalara entegre edildiğinde avantaj sağlar.

1.7.6.3. Rüzgar Türbinlerinin Parçaları



Şekil 1.46. Modern bir rüzgar türbininin başlıca parçaları

Rüzgar türbinleri rüzgarın gücünü kullanarak elektrik üretir. Bir rüzgar türbini bir fanın tersi çalışır (bir fan çalışmak için elektrik kullanır). Rüzgardaki enerji, bıçakları bir rotor etrafında döndürür. Rotor, ana şaft, düşük hız şaftına bağlanır. Tahrik treni hızları içerir. Yüksek hızlı mil elektrik üreten bir jeneratöre bağlanır. Kara tabanlı rüzgar türbininin şematik düzeni Şekil 1.46'da gösterilmiştir.

Anemometre, rüzgar hızını ölçer ve rüzgar hızı verilerini denetleyiciye iletir.

Bıçaklar, çoğu türbinlerin iki veya üç bıçağı vardır. Bıçakların üzerinde esen rüzgar bıçakların "kalkmasını" ve dönmesini sağlar.

Fren, mekanik olarak, elektrikle veya rotoru acil durumlarda durdurmak için hidrolik olarak.

Denetleyici, kontrolör, makineyi saatte yaklaşık 8 ila 16 mil (mil / sa) rüzgar hızlarında çalıştırır ve makineyi yaklaşık 55 mil hızla kapatır. Türbinler, yüksek rüzgarlarla hasar görebileceğinden, yaklaşık 55 milin üzerinde rüzgar hızlarında çalışmazlar.

Dişli kutusu, dişliler düşük hız milini yüksek hızlı şaft ve dönme hızı dakikada yaklaşık 30 ila 60 devir / dakika (rpm) arasındadır. 1000 ila 1800 dev / dak, dönme hızı çoğu jeneratörün elektrik üretmesi için gerekli. Dişli kutusu, rüzgar türbininin pahalı (ve ağır) bir parçasıdır ve mühendisler, daha düşük dönme hızlarında çalışan ve dişli kutularına ihtiyaç duymayan "doğrudan tahrik" jeneratörlerini araştırmaktadır.

Jeneratör, genellikle 60-döngü AC elektrik üreten bir hazır indüksiyon jeneratörü.

Yüksek hızlı mil, jeneratörü tahrik eder [44].

Düşük hız mili, rotor düşük hız milini dakikada yaklaşık 30 ila 60 rotasyonda döndürür.

Makine dairesi, nacelle kulenin tepesinde oturur ve vites kutusu, lowand yüksek hız milleri, jeneratör, ve fren kontrolör içerir. Bazı nacelles büyük bir helikopterin iniş yapması için yeterli büyüklüktedir.

Pitch, bıçaklar rotoru kontrol etmek için rüzgârdan döndürülür veya fırlatılır. Elektrik üretmek için çok yüksek veya çok düşük olan rüzgarları çevirerek rotoru hızlandırır.

Rotor, bıçaklar ve göbek, rotor olarak adlandırılır [45].

Kule, kuleler, boru şeklindeki çelikten, beton veya çelik kafeslerden yapılmıştır. Rüzgar hızı, yükseklik ile arttığından, uzun kuleler, türbinlerin daha fazla enerji yakalamasına ve daha fazla elektrik üretmesine olanak tanır.

Rüzgar yönü, bu rüzgara karşı karşıya çalıştığı için sözde bir "rüzgara" türbinidir. Diğer türbinler rüzgardan uzağa bakan "aşağı rüzgar" koşacak şekilde tasarlanmıştır.

Rüzgar gülü, rüzgar yönünü ölçer ve yaw sürücü ile iletişim kurar türbini rüzgara göre uygun şekilde yönlendirir.

Yaw sürücü, rüzgâr türbinleri rüzgara karşı karşıya gelir; Sapma tahriki, rüzgar yönü değiştikçe rotorun rüzgara karşı durmasını sağlamak için kullanılır. Rüzgâr türbinleri bir yaw sürücü gerektirmez, rüzgar rotoru aşağıya doğru üfler.

Yaw motoru, sapan sürücüye güç verir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

Rüzgar santrali kurulumu, proje geliştiriciler için önemli bir konu olup, karar verme aşamasında meteorolojik ve finansal bir çok parametrenin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu kadar kapsamlı ve dinamik bir sürecin basit matematiksel ve aritmetik işlemlerle çözümü sağlıklı sonuçlar ortaya koymayabilir. Günümüze kadar rüzgar santrali kurulumu için genel kabul görmüş bir skalanın olmaması, değerlendirme sonuçlarının değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere veya kurumlara göre farklılık göstermesine ve rüzgar santrali kurulumu için bulanık tabanlı karar sistemlerine ait sınırlı sayıda bilgiye ulaşılması nedenleriyle bu çalışma planlanmış ve tasarlanacak model için de bulanık mantık yöntemi seçilmiştir.

Tasarlanan sistem verilerin hazırlanması, bulanık mantık uygulaması ve karar sonuçlarını değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır. İlk olarak verilerin hazırlanması aşamasında meteorolojik ve finansal verilerin hazırlanması ve analiz edilmesi yapılmıştır. İkinci aşamada bulanık kümeler, bulanık kurallar, bulanık çıkarım işlemlerinin gerçekleştirildiği bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise sistemin Matlab/Simulink modeli tasarlanarak gerçek sistem üzerinde uygulanmış ve bir kurulum faktörü üretilmiştir. Uygulama sonucu elde edilen bulgular tasarlanan modelin rüzgar santrali kurulumunda kullanılmasının etkili ve yararlı bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Yapılan çalışma ile rüzgar santrallerinin kurulumunda proje geliştiriciler ve firma yetkilileri için karar verme aşamasında temel teşkil edecek bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanması hedeflenmiştir. Çalışmada “MATrix LABoratory” kelimesinin kısaltması olan, teknik hesaplamalar ve matematiksel problemlerin çözümü ve analizi için tasarlanmış bir yazılım geliştirme aracı olan MATLAB ile rüzgar hız verilerinin 2 parametrelili Weibull dağılımına uyduğu varsayımıyla analiz yapan WAsP yazılımları kullanılmıştır. Uygulama sonuçlarının analizi, dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizi için etkileşimli, grafiksel bir ortam sunan bir MATLAB eklentisi olan Simulink ile gerçekleştirilmiştir.

Meteorolojik ve finansal verilerin analizi, çalışma bölgesine ait topoğrafik özellikler, arazi pürüzlülük bilgileri ve bölge engel bilgilerini kullanan WAsP yazılımı ile yapılmıştır [46,47]. WAsP, Danimarka Meteoroloji Teşkilatı’nın Riso Meteoroloji

Laboratuvarında tasarlanmış Avrupa ve Türkiye Rüzgar Atlasının hazırlanmasında kullanılmıştır [48].

Çalışmada WaSP yazılımı ile rüzgar verilerinin analizi, mikro-konuşlandırma çalışması, rüzgar atlasının oluşturulması, enerji potansiyelinin tespiti ve kapasite faktörünün hesaplanması sağlanmıştır. Ayrıca verilerin ekonomik analizi gerçekleştirilerek kWh birim enerji maliyeti ile amortisman süresi hesaplanmıştır.

Verilerin hazırlanması aşamasında ilk olarak meteorolojik parametrelerin analizi için sırası ile aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:

Meteorolojik Verilerin Elde Edilmesi

- Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (OMGİ) den
- 2014-2015 yıllarına ait
- 10 m yükseklikten
- 10 dakika aralıklarla
- Rüzgar Hız ve yön verilerinin temini

Wasp Yazılımı Analizi

- Ortalama Rüzgar Hızı hesaplanması
- Ortalama Güç Yoğunluğunun hesaplanması
- 12 sektörden oluşan Rüzgar Gülü ve Rüzgar Yönü Analizi

Weibull olasılık yoğunluğu ve Hellmann katsayısı hesaplanması

- c ölçek parametresi hesaplanması (Bağlı Kümülatif rüzgar hızı frekansı)
- k şekil parametresi hesaplanması (Rüzgar Sıklığı)
- Weibull dağılım fonksiyonunun hesaplanması
- Hellmann katsayısının hesaplanması
- Pürüzlülük sınıflarının tespiti ve yüksekliklere göre weibull parametrelerinin hesaplanması

Rüzgar Atlasının Hazırlanması

- Yakın çevresel engel bilgilerinin belirlenmesi
- Arazi pürüzlülüğünün belirlenmesi
- Arazi topografik yapısının belirlenmesi
- Bölgenin 1/25.000 sayısal haritasının hazırlanması
- Ortalama Rüzgar Şiddeti haritasının oluşturulması
- Bölgenin Güç Yoğunluğu haritasının oluşturulması

Mikro-konuşlandırma ve Türbin Seçimi

- Türbin Seçimi (2.0 MW Vestas V80)
- Türbinlerin Mikro-konuşlandırma işleminin yapılması
- Her bir türbine ait üretim ve kayıp değerlerinin hesaplanması
- Yıllık üretim ve kayıp değerinin hesaplanması

Kapasite Faktörünün Hesaplanması

- $C_f = E_{out} / E_r$ eşitliğinden faydalanarak bölgenin kapasite faktörünün hesaplanması

Verilerin hazırlanması aşamasında ikinci olarak finansal parametrelerin analizi için sırası ile aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:

İlk Kurulum Maliyet Analizi

- Türbin ve montaj
- Proje hazırlık masrafları (İzin ve Lisanslar)
- Yer arazi bedeli
- Şebeke bağlantıları (Kablo, Transformatör, Haberleşme)
- Temel ve kurulum (Temel, Yol, Şantiye)
- Finans (Müşavirlik, Sigorta, Banka) finans hesaplamalarının yapılması

Yıllık Gelir/Gider Analizi

- Elektrik Satış Gelirleri
- Emisyon Satış Geliri
- Yıllık İşletme Gelirleri (€/Yıl) 'nin hesaplanması
- Kira Bedeli
- Bakım-Onarım-Sigorta
- İşçilik
- Yıllık Lisans Bedeli
- Genel Yönetim Giderleri
- Yıllık İşletme Giderleri (€/Yıl) 'nin hesaplanması

Amortisman Süresi Analizi

- Amortisman süresinin hesaplanması

kWh Enerji Maliyet Analizi

- PVC, sistemin ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki değerinin hesaplanması
- i , enflasyon oranı ve r , faiz oranının belirlenmesi
- S , hurda bedelinin hesaplanması

- $B=I/(t*4)$ yıllık bakım onarım giderinin hesaplanması
- kWh Maliyeti= $PVC / Pr*CF*t$ eşitliğinden faydalanarak hesaplanması

Bulanık tasarımda, üyelik fonksiyonları ve bulanık kuralların doğru şekilde belirlenmesi tasarlanan sistemin başarısı için birinci derecede önemlidir. Üyelik fonksiyonlarının seçilmesine ve bulanık kuralların belirlenmesine ilişkin literatürde birçok yaklaşımla karşılaşmak mümkündür. Sadece üyelik fonksiyonlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar [49-56]. Sadece bulanık kuralların belirlenmesine yönelik çalışmalar [57-71]. Hem bulanık kural hem de üyelik fonksiyonu belirlemeye yönelik çalışmalar [72-76].

Bulanık modellemede sisteme etki eden parametreler ve giriş/çıkış değişkenleri belirlenerek meteoroloji, finans ve karar olmak üzere üç ayrı bulanık kural tabanından oluşan bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır. Bulanık mantık uygulaması aşamasında sırası ile aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir:

Bulanık Kümeler

- Dilsel Değişkenler/Bulanık Değerler tanımlanması
- Üyelik fonksiyonlarının hazırlanması
- Farklı üyelik fonksiyonlarının etkilerinin analizi
- Alfa-Kesme tekniği ile üyelik fonksiyonlarının değer aralıklarının belirlenmesi

Bulanık Kurallar

- Meteorolojik bulanık kural tabanının hazırlanması
- Finansal bulanık kural tabanının hazırlanması
- Karar bulanık kural tabanının hazırlanması
- Bulanık kural tabanlarının Genetik Algoritma ile optimizasyonu

Bulanık Çıkarım Sistemi

- Bulanık tabanlı karar sisteminin tasarımı
- Mamdani ve Sugeno çıkarım modellerinin uygulanması

Son olarak geliştirilen sistemin Matlab/simulink modeli hazırlanarak gerçek sistem üzerinde uygulanmış ve bir kurulum faktörü üretilmiştir.

Karar Sonuçlarının Değerlendirilmesi

- Sistemin Matlab/Simulink modelinin tasarlanması
- Uygulama Sonuçlarının Analizi

Tasarlanan model, meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip meteorolojik_fuzzy, finansal tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip finansal_fuzzy ve bu iki fuzzy sisteminin çıkışı ile ek parametrelerin değerlendirileceği ve çıkış parametresinin karar verme aşamasında kurulum faktörü olarak kullanılacak kural tabanına sahip karar_fuzzy bulanık sistemlerinden oluşmaktadır

Çalışmada, rüzgar santrali kurulumu için bulanık mantık tabanlı karar modeli gerçek bir santralin kurulumu için tasarlanmış ve uygulanmıştır. Uygulama sonuçları tasarlanan sistemin yatırımcılar ve karar vericiler için karar aşamasında etkili ve faydalı bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

2.1. WAsP Yazılımı ile Verilerin Analizi

Çalışmada rüzgar türbini kurulacak bölge için rüzgar hızı, yön ve güç üretimini tahmin edebilmek için ölçüm istasyonundan alınan 10 dakikalık rüzgar ölçümleri analiz edildi ve gözlemlenen sahaya özgü rüzgar ikliminin istatistiksel bir özeti hesaplandı. Çıktı, bir rüzgar gülü ve farklı sektörlerdeki rüzgar hızı dağılımları olarak sunuldu. Daha sonra her sektör için ölçek ve şekil parametreleri hesaplamak için ölçülen histograma bir Weibull dağılım fonksiyonu yerleştirilmiştir. Gözlenen rüzgar verileri, genelleştirilmiş rüzgar iklimine veya rüzgar atlası veri setine dönüştürülmüştür.

Rüzgar gözlemleri, engeller, yüzey pürüzlülüğü ve orografi gibi saha koşullarına göre düzenlenmiştir. Farklı kaynaklardan elde edilen bu bilgiler daha sonra WAsP tarafından okunabilen bir harita formatına dönüştürüldü. Dönüşüm için kullanılan program Global Mapper'dır. Veriler dört standart pürüzlülük sınıfı için ve dört yükseklik için Weibull c ve k parametrelerine dönüştürülmüş, 12 azimut sektöre göre bir rüzgar atlası oluşturulmuştur. Rüzgar atlası verileri oluşturulduğunda, WAsP ters hesaplama yaparak herhangi bir noktada rüzgar iklimini tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. İşlem şu şekilde basitleştirilebilir:

- Ayırık Rüzgar Ölçümleri → Rüzgar İstatistikleri
- Rüzgar İstatistikleri + Saha Özellikleri → Rüzgar Atlası Verileri, Genelleştirilmiş Rüzgar İklimi

WAsP, rüzgar hızı varyansını yükseklik ile hesaplamak için logaritmik rüzgar profilini kullanır. Model, topoğrafik özelliklerin rüzgar üzerindeki etkisini hesaplayan ve arazideki pürüzlülük uzunlukları ve yükseklikler arasındaki değişimin etkisini hesaplayan

bir pürüzlülük değişimi modelini içermektedir. Yüzey pürüzlülük uzunlukları arazi örtüsü bilgileri ile belirlenir.

WAsP, bölge için birleşik rüzgar iklimi oluşturduğunda, ölçüm verilerinden hesapladığı ortalama rüzgarın toplam enerji içeriğini kullanır. Seçtiğimiz VESTAS V80 2.0 MW türbin gücü eğrisi vasıtasıyla rüzgar çiftliği düzenindeki türbinlerin her birinin yıllık enerji üretimi, iz kayıpları ve net yıllık enerji üretiminin hesaplanması sağlanmıştır. İşlemler şu şekilde basitleştirilebilir:

Her bir türbin için:

- Genelleştirilmiş Rüzgar İklimi + Bölge Özellikleri → Tahmini Rüzgar İklimi
- Tahmin Edilen Rüzgar İklimi + Güç Eğrisi → Rüzgar Türbini Yıllık Enerji Üretimi

Tüm rüzgar çiftliği için:

- Tahmin Edilen Rüzgar İklimi + Rüzgar Türbini Jeneratörü Özellikleri → Rüzgar Çiftliğinin Yıllık Brüt Enerji Üretimi
- Tahmin Edilen Rüzgar İklimi + Rüzgar Türbini Jeneratörü Özellikleri + Rüzgar Çiftliği Düzeni → Rüzgar Çiftliği İz Kayıpları
- Brüt Yıllık Enerji Üretimi + İz Kaybı → Rüzgar Çiftliğinin Yıllık Net Enerji Üretimi

Bu hesaplamalar ile her bir türbin için net yıllık enerji üretimi, ölçülen verilerle karşılaştırmalar yapılabilir. Bunlara katkıda bulunan faktörleri belirlemek için tutarsızlıklar bulunabilir ve analiz edilebilir. Program, seçilen bir alan üzerinde bir harita olarak görüntülenen bir rüzgar kaynağı haritası oluşturuldu ve yüksek verimli enerji konumlarını bulması sağlandı. Böylelikle ortalamanın altında enerji üreten türbinler için daha uygun bir alan bulunabilir ve yeni yerleşim için enerji üretimi tahmin edilebilir.

Rüzgar türbinleri, rüzgârdan enerji çekip onu elektriğe çevirdiği için arkasındaki rüzgarı yavaşlatır. WAsP, uyandırma etkilerini ve güç üretimi üzerindeki etkilerini tahmin etmek için Park modelini (Türbin yerleşim etkisi) uygular. Park modeli, hesaplamalarında bazı basitleştirmeler yapan hızlı bir modeldir.

Tez çalışmasının bu bölümünde bir rüzgar türbininin kurulumun da gerekli olan meteorolojik ve finansal parametrelerin belirlenmesi ve WAsP yazılımı ile analiz edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen parametreler tasarlamayı planladığımız bulanık tabanlı karar sisteminin kural tabanında ölçeklendirilerek bir kurulum faktörünün üretilmesinde kullanılacaktır.

2.1.1. Çalışmada Seçilen Arapgir İlçesinin Coğrafi Durumu

Çalışmanın yapıldığı Arapgir ilçesinin konumu $39^0/5$ dk kuzey enlemi ile $38^0/30$ dk doğu boylamı arasında konumlanmaktadır. Rakımı 1200 m ve yüz ölçüm 956km^2 'dir [77,78].

İlçe coğrafi özellikleri bakımından incelendiğinde batı ve kuzey kesimi dağlık, güney bölümü az engebeli ve orta yüksekliktedir. İlçe coğrafi bitki örtüsü steplerle kaplıdır ki bu daha çok meşe ağaç toplulukları şeklinde görülmektedir. Bölge alanı incelendiğinde çok az ormanlık alanının bulunduğu ancak bu alanında kaliteli bir orman alanı olmadığını söyleyebiliriz.

Arapgir ilçesi Malatya iline bağlı bir ilçe olmakla birlikte ile olan mesafesi 114 km'dir. Doğu ve Güney bölgelerinde Elazığ'ın Ağın ve Keban ilçeleri, kuzeyinde Erzincan' Kemaliye ilçesi, batısında Sivas'ın Divriği ilçesi ve Malatya'nın Arguvan ilçesi ile komşudur. Doğu Anadolu bölgesinin batı kısmında, fırat havzasının yukarı bölgesinde ve havzanın batı kısmında yer almaktadır.

Şekil 2.1'de Arapgir ilçesine ait uydu görüntüsü verilmiştir. Mevcut haritalara ek olarak ölçüm alınan meteoroloji istasyonu ve türbinlerin kurulması planlanan bölge yerinde incelenmiş , topografik özellikler, sonradan yapılan inşaat, ağaç vb. engel teşkil edecek yapılar ayrıca tespit edilmiştir.



Şekil 2.1. Arapgir ilçesinin uydudan görünümü

2.1.2. Rüzgar Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

Tez çalışmasında, Arapgir ilçesinin Ocak 2014 ile Aralık 2015 arasındaki aylara ait OMGİ(Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu) dan alınan 10 m yüksekliğe ait ve 10 dakikalık aralıklarla elde edilen rüzgar hızı ve rüzgar yönü ölçüm verileri kullanılmıştır. Çalışmaya konu olan bölgedeki ölçüm merkezi ve kurulumun yapılması planlanan bölgede rüzgarın yapısını bozacak bir engel bulunmamaktadır. Ölçüm cihazının her hangi bir hata değeri olmayıp sorunsuz çalışmaktadır. Şekil 2.2'de rüzgar ölçüm merkezinin çalışma alanı üzerindeki yeri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Rüzgar ölçüm istasyonunun yeri

Tezde yapılan örnek uygulamada WAsP 8,3 versiyonu kullanılmıştır. Rüzgar verilerinin analizinde bir çok program kullanılmakla birlikte en yaygın kullanılanı WAsP yazılımıdır. Programın kendi kütüphanesindeki türbin modellerini kullanabilmemiz ve harita üzerinde yerleşim yapabilmemiz rüzgar verilerinin detaylı analizine yardımcı olmaktadır.

Tablo 2.1'de bölgede 10 m yükseklikte ve 10 dk aralıklar ile ölçülen rüzgar verilerinin aylık ortalama değerleri verilmiştir. WAsP ile yapılan analizler sonucunda bölgenin ortalama rüzgar hızı 2,75 m/s olarak hesaplanmıştır. Ayrıca en yüksek ortalama hızının 4,1 m/s ile Temmuz ayında, en düşük ortalama hızının 1,6 m/s ile ocak ayında olduğu tespit edilmiştir. WAsP programında rüzgar verileri analiz edilirken eksik veriler ayrıca belirtilmiştir.

Tablo 2.1. Rüzgar verilerinin aylık ortalama değerleri

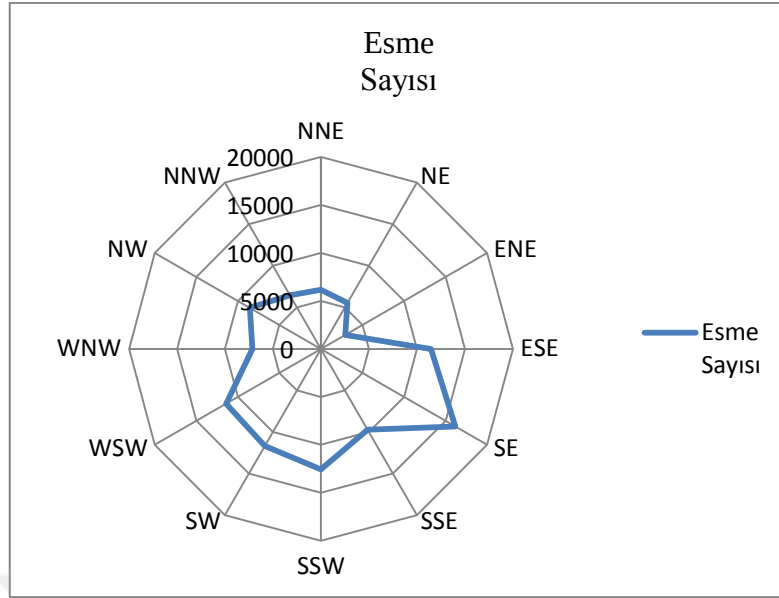
Aylar	Ort.Rüzgar Hızı
	10m (m/s)
Ocak	1,6
Şubat	2
Mart	2,6
Nisan	2,8
Mayıs	3,1
Haziran	3,8
Temmuz	4,1
Ağustos	3,6
Eylül	2,9
Ekim	1,9
Kasım	2,5
Aralık	2,2

WASP ile rüzgar verileri analizi sonucu ortalama güç yoğunluğu 53 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.2'de çalışma bölgesine ait hesaplanan ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan bulanık mantık sisteminin meteorolojik_fuzzy kural tabanında giriş birimi olarak kullanılacak olan ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri bulunmuştur.

Tablo 2.2. Bölgede hesaplanan ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu

	Hesaplan Değerler
Ortalama Rüzgar Hızı(m/s)	2,75
Ortalama Güç Yoğunluğu(W/m^2)	53

Sektör sayılarını belirlemek bize bağlı olmakla birlikte genelde uygulamalarda 12 sektör kullanılır. Çalışmamızda bizde 12 sektör kullanarak rüzgar gülü oluşturduk. Yapılan analiz sonucu Şekil 2.3'dek rüzgar gülü elde edilmiş ve yapılan hesaplamalarda hakim rüzgar yönü 120^0 sektöründe SE olarak bulunmuştur.



Şekil 2.3. Bölgeye ait rüzgar gülü

Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında kullanılan en yaygın dağıtım Weibull dağılımıdır. Bu dağılım İsveçli fizikçi Waloddi Weibull tarafından bulunmuştur. Bu dağıtım oldukça esnek ve basittir ve aynı zamanda gerçek verilere de uygundur. Diğer bir deyişle, Weibull dağılımı rüzgar parametrelerinin değerlendirmeye uygun olduğundan, genellikle rüzgar enerjisi analizinde kabul edilir [89]. Denklem 2.1'de Weibull dağılımı fonksiyonu görülmektedir [80].

$$hw(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2.1)$$

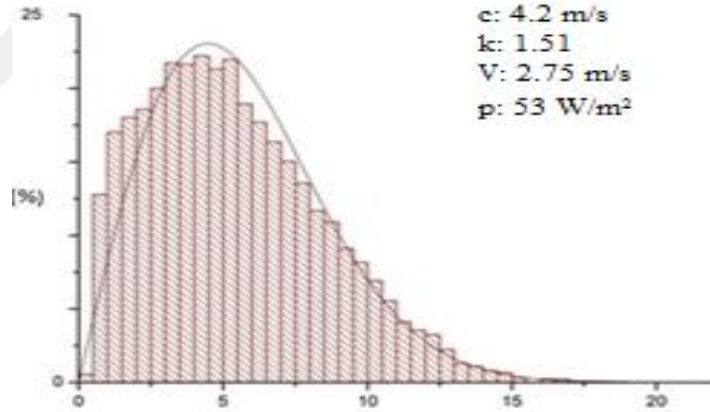
c , m / s cinsinden Weibull ölçeği parametresidir; dağılımın karakteristik rüzgar hızı için bir ölçü. c , ortalama rüzgar hızıyla orantılıdır. k , Weibull form parametresidir. Bir Weibull dağılımının şeklini belirler ve 1 ile 3 arasında bir değer alır.

Weibull k şekil faktörü, rüzgar hızlarının dağılımının genişliğini yansıtan bir parametredir. Düşük k değerleri rüzgar hızının daha geniş dağılımlarına karşılık gelir, bu da rüzgarların geniş bir hız aralığında değişme eğiliminde olduğu anlamına gelir. Daha yüksek k değerleri, daha dar rüzgar hızı dağılımlarına karşılık gelir, bu da rüzgar hızlarının dar bir aralıkta kalma eğiliminde olduğu anlamına gelir. Weibull k ve c parametreleri bulmak için kullanılan denklemler aşağıda gösterilmektedir [81].

$$k = \left(\frac{a_u}{U}\right)^{-1,086} \quad (2.2)$$

$$c = UX \left(0,568 + \frac{0,433}{k}\right)^{-\frac{1}{k}} \quad (2.3)$$

Denklemden kullanılan a_u , Standart sapma, U , Ortalama hızı temsil eder. Denklem 2.1 kullanılarak weibull dağılım fonksiyonu yardımıyla enerji potansiyeli hesaplanması, Denklem 2.2 ile k şekil parametresinin hesaplanması, denklem 2.3 ile de c ölçek parametresi hesaplanması sağlanmıştır. WAsP yazılımı ile yapılan hesaplamalar sonucu Şekil 2.4'de weibull dağılımına göre 10m'de yükseklikte hesaplanan k şekil parametresi 1.51, c ölçek parametresi 4.2 m/s, ortalama rüzgar hızı 2,75m/s ve güç yoğunluğu ise 53 W/m² dir.



Şekil 2.4. Bölgeye ait weibull dağılımı

Rüzgar hız değerleri genellikle 10 m ve 30 m yüksekliklerde yapılır. Bu değerlerin hub yüksekliğindeki tahmini için 1/7 rüzgar gücü kanunu olarak bilinen formül kullanılarak sağlanmaktadır [81]. Hellmann katsayısı kullanarak, ölçümün yapıldığı yerden elde edilen rüzgar hızlarını istenilen yükseklikte tahmin edebiliriz.

Denklem 2.4 yardımıyla yüzey pürüzlülük katsayısı dikkate alınarak ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızı istenilen yükseklik için hesaplanabilir.

$$U = U_{\text{rref}} \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^{\mu} \quad (2.4)$$

Denklemden yer alan ifadeler, U, rüzgar hızının hesaplanmak istendiği yükseklik, U_{rref}, ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızı, h, rüzgar hızını hesaplamak istediğimiz yükseklik, h_{ref}, rüzgar hızını ölçtüğümüz yükseklik, μ , Hellmann katsayısını temsil etmektedir.

Hellmann katsayısı rüzgar gücü kanunu olarak da bilinen 1/7 alınabilir. Ancak Hellmann katsayısını daha doğru hesaplayabilmek için üç farklı yöntem daha önerebiliriz bunlardan ilki pürüzlülük uzunluğu ve hız ilişkisiyle, ikincisi pürüzlülük uzunluğu ilişkisiyle, üçüncüsü ise hız ve yükseklik ilişkisiyle [82].

Pürüzlülük uzunluğu ve hız ilişkisi ile Hellmann katsayısının hesaplanması;

$$\mu = k_0 [1 - 0.55 \log(V_{\text{ref}})] \quad (2.5)$$

Pürüzlülük uzunluğu ilişkisi ile Hellmann katsayısının hesaplanması;

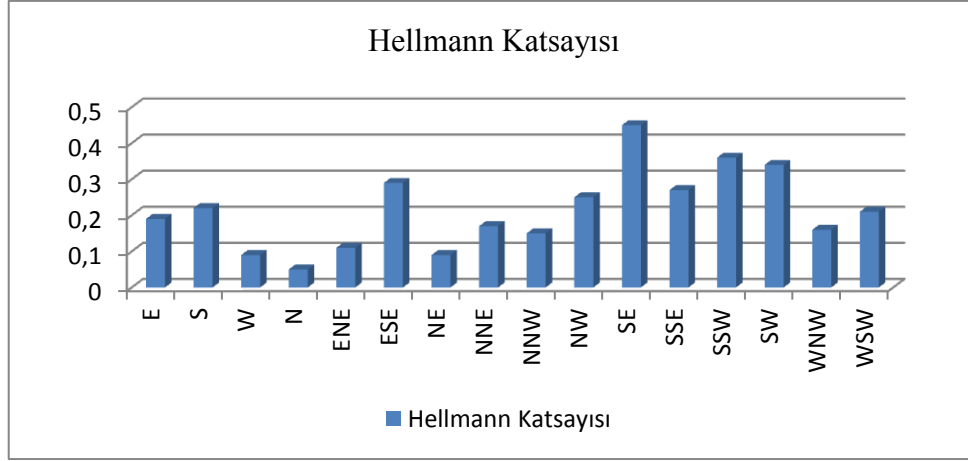
$$\mu = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (2.6)$$

Hız ve yükseklik ilişkisi ile Hellmann katsayısının hesaplanması;

$$\mu = \frac{0.37 - 0.088 \ln(U_{\text{rref}})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{U_{\text{rref}}}{10}\right)} \quad (2.7)$$

NASA tarafından Hellmann'ın katsayısı hesaplamak için önerilen pürüzlülük yöntemi Denklem 2.7'deki gibidir.

Yapılan çalışmada Arapgir'de 10 m yükseklikte 10 dakikalık aralıklarla elde edilen rüzgar hızı değerleri hesaplanan Hellmann katsayısı ile türbin göbeği yüksekliği olan 80 metreye taşınmıştır.



Şekil 2.5. Rüzgar esme yönlerine göre Hellmann katsayısı değişimi

Yapılan çalışmada rüzgar gülünde belirlediğimiz 12 sektör için toplam 61.923 adet verinin analiz edilmesi sonucu Hellmann katsayısı 0.21 olarak bulunmuştur. Şekil 2.5'de rüzgar esme yönlerine göre Hellmann katsayısı değişimi gösterilmiş ve en yüksek Hellmann katsayısı daha önce bulduğumuz hakim rüzgar yönü olan SE için hesaplanmıştır.

Rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde iki parametrelili weibull dağılım fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 2.3'de tüm sektörler için hesaplanan ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu, frekans yoğunluğu, k şekil parametresi, c ölçek parametresi detaylı bir biçimde verilmiştir. Tablo 2.3'de esme sıklığı ve ortalama güç yoğunluğu sektörler göre incelendiğinde 180⁰ ve 210⁰ sektörlerinin en dikkat çekici sektörler olduğu gözlenmektedir.

Tablo 2.3. Sektörlere göre rüzgar frekans bilgileri ile weibull değerleri değişimi

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Tüm
c	4,1	4,4	3,3	2,8	3,4	3,2	3,5	4,3	4,6	3,1	2,7	2,4	4,2
k	1,79	2,01	1,51	0,96	1,05	1,37	1,63	2,11	1,55	1,48	1,23	1,18	1,51
V	1,89	2,13	1,76	1,33	1,46	1,41	2,91	2,81	2,41	1,36	1,22	1,18	2,75
P	62	67	23	19	31	24	32	76	85	21	17	13	65
f	7,3	9,1	5,9	3,1	2,2	3,5	17,6	29,7	13,1	3,4	2,6	2,5	100

Rüzgar değerleri ile Weibull parametreleri çalışma alanındaki yüzey pürüzlülüğünün özelliklerinden etkilenmekte ve hız profilinin değişmesine sebep olmaktadır. Çalışma alanının pürüzlülüğü ise alanda pürüzlülüğe neden olan sebeplerin boyutu ve alandaki dağılımıyla ilişkilidir.

Pürüzlülük, Z_0 (m) pürüzlülük uzunluk parametresi ile temsil edilir ve 0.0002 ile 1.0 arasında değer alır. Z_0 pürüzlülük uzunluğu değişmekte olup yoğun yerleşim birimleri için 0,40 ile 1.0 ve su yüzeyleri için 0.0002 olarak alınır. Diğer pürüzlülük sınıfları için alınması gereken Z_0 pürüzlülük uzunluğu değerleri WAsP yazılımı içinde bulunan tablo aracılığı ile tanımlanır. Tablo 2.4'de farklı pürüzlülük sınıflarına göre 10 m, 25 m, 50 m ve 100 m için hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 2.4. Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklere göre weibull parametreleri

Yükseklik	Parametre	0.00m	0.03m	0.10m	0.40m
10 m	Weibull c[m/s]	5,6	4,4	3,9	3,2
	Weibull k	1,61	1,49	1,47	1,47
	Ort.Hız [m/s]	4,37	2,97	2,56	2,02
	Güç Yoğ.[W/m ²]	158	72	54	35
25 m	Weibull c[m/s]	6,1	5,3	4,7	3,7
	Weibull k	1,65	1,58	1,51	1,5
	Ort.Hız [m/s]	4,89	3,68	3,18	2,61
	Güç Yoğ.[W/m ²]	218	97	71	52
50 m	Weibull c[m/s]	6,7	6,2	5,6	4,8
	Weibull k	1,71	1,69	1,61	1,6
	Ort.Hız [m/s]	6,46	5,07	4,87	4,37
	Güç Yoğ.[W/m ²]	279	235	125	73
100 m	Weibull c[m/s]	7,4	7,3	6,7	5,9
	Weibull k	1,66	1,81	1,75	1,76
	Ort.Hız [m/s]	7,51	7,01	6,68	6,12
	Güç Yoğ.[W/m ²]	356	294	184	137

Mevcut yapıda en çok tercih edilen göbek yüksekliği 100m civarındır.Çeşitli pürüzlülük yükseklikleri ve sınıflarına göre Wasp'tan elde edilen Weibull parametreleri incelendiğinde 100 m. yükseklikteki ve 0.00 m pürüzlülük sınıfında her yükseklikte diğer sınıflara göre ortalama rüzgar şiddeti ve güç yoğunluğunun daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

2.1.3. Bölgesel Rüzgar Atlasının Oluşturulması

Bölgesel rüzgar atlasının oluşturulmasında kullandığımız rüzgar verilerini k ve c parametrelili weibull dağılım fonksiyonuna uygun dağılım gösteren WAsP programı aracılığı ile hazırlanmıştır. WAsP programı bölge topografyası, yakın çevre engel bilgileri, bölge pürüzlülük bilgileri ve saatlik rüzgar giriş bilgilerini kullanarak rüzgar atlası bilgilerini hesaplamaktadır.

Yapılan çalışmada meteoroloji istasyonundan 10 m yükseklik ve 10 dakika aralıklarla elde edilen rüzgar hızı verileri bölgede bulunan engeller, arazi yüzeyinin pürüzlülüğü ve bölge topografyası bilgileri ile birlikte değerlendirilerek rüzgar atlası elde edilmiştir. Elde edilen rüzgar atlası kullanarak sektörel bazda enerji yoğunluğu, istediğimiz yükseklikteki rüzgar hızı, rüzgar yönü ve rüzgar esme sıklığı gibi veriler hesaplanmıştır.

Saatlik Rüzgar verisi, meteoroloji istasyonundan 10 m yükseklikten ve 10 dakika aralıklar ölçülmüş iki yıllık süre ile alınan rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri ve ölçüm istasyonuna ait 1/25 000 ölçekli harita yardımı ile derece - dakika olarak belirlenmiş koordinatlar WAsP yazılımı ile değerlendirildi. Birinci aşamada frekans dağılım tablosu hazırlandı. Bu tablo ile ortalama rüzgar hızı ve enerji yoğunluğu, hakim rüzgar yönü, sektörlere göre rüzgar esme sıklığı ve weibull parametreleri hesaplandı. Frekans tablosu yardımı ile rüzgar hız ve rüzgar yön histogramları bulunur. Rüzgar hız/esme sıklığı histogramı ile hangi rüzgar türbinini kullanacağımız rüzgar yön/esme sıklığı histogramı ile de rüzgar türbini nasıl konumlandıracağımızı tayin ederiz.

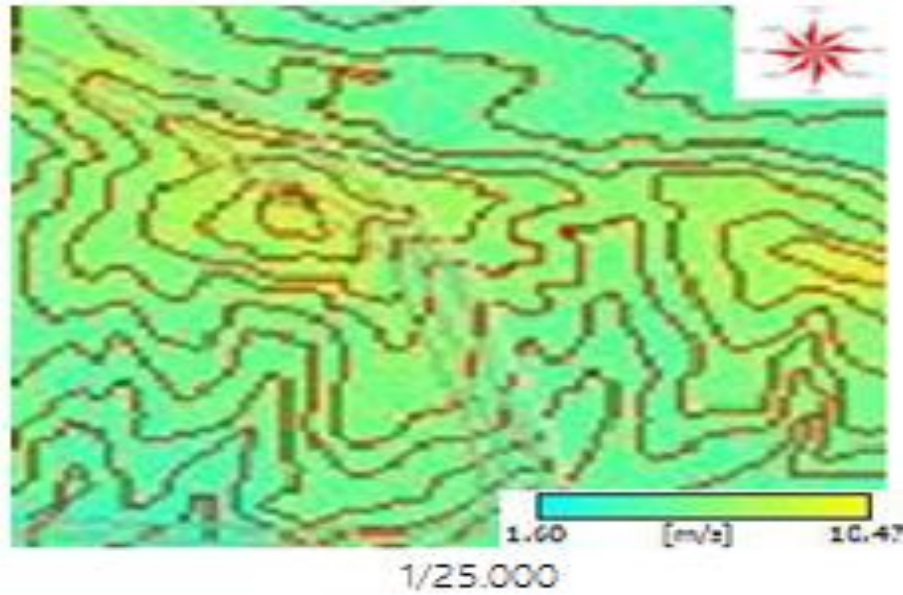
Yakın Çevre Engel Bilgileri, rüzgar ölçüm istasyonu etrafındaki engel boyutu ve adeti rüzgar hız ve yön değerlerini ciddi manada etkilemektedir. Rüzgar santrali kurulacak bölgede engel etkisi türbin göbek yüksekliğinde yüzde 40'ın üzerinde olmamalıdır. Engel boyutu ve adeti rüzgarı etkilemeyecek düzeyde ise bu pürüzlülük olarak kabul edilir. Yakın çevre engel bilgileri WAsP yazılımındaki engel tanımlama bölümü ile yapılmaktadır. Tez çalışmasında gerek ölçüm istasyonu gerekse türbin kurulması düşünülen alan çevresinde ölçülen rüzgar hız ve yön değerlerini ciddi anlamda etkileyecek herhangi bir engel bulunmamaktadır.

Bölge Pürüzlülük Bilgileri, arazi pürüzlülüklerindeki değişim Z_0 (m) pürüzlülük uzunluk parametresini etkilediğinden rüzgar hız profilini de etkilemektedir. Bölge pürüzlülük bilgisi WAsP yazılı içindeki kütüphaneden seçilmiş aynı zamanda 1/25 000 ölçekli harita üzerine bölge pürüzlülük bilgileri işlenmiştir.

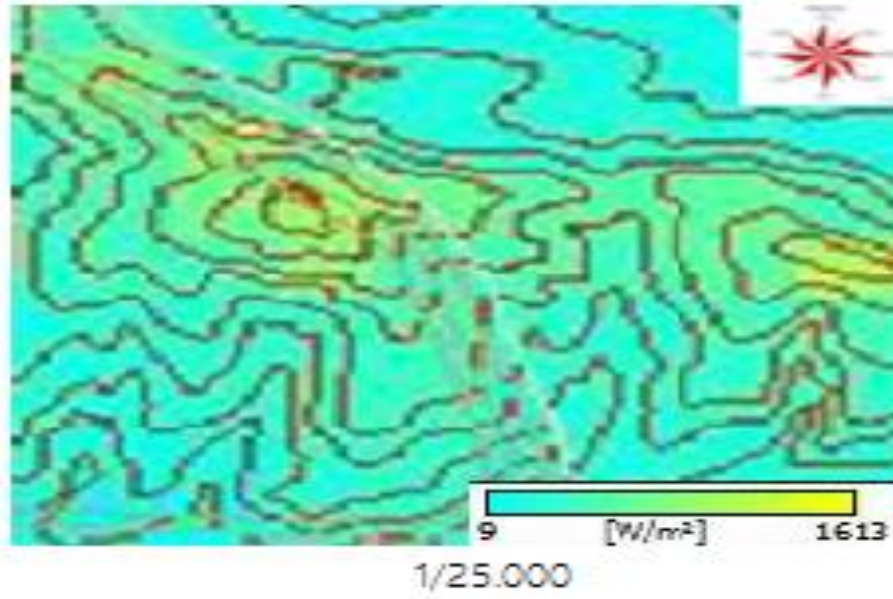
Bölgenin Topografyası, yüzey pürüzlülüğü gibi rüzgarın hızı ve yönü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bölge topografyasını gösteren haritanın doğruluğu enerji potansiyelinin doğru hesaplanması açısından çok önemlidir. Çalışma yapılacak alanın topografyasını gösteren 1/25 000 ölçekli harita WAsP yazılımı ile modellenmiştir.

Rüzgar Atlası, 10 m ve 30 m yükseklikten elde edilen rüzgar verilerinin WAsP programı giriş birimi olan bölge topografyası, yakın çevre engel bilgileri, bölge pürüzlülük bilgileri ile değerlendirilerek istediğimiz yükseklikteki istatistiksel sonuçları elde ederiz. 10 m yükseklikten elde ettiğimiz rüzgar hız ve yön verilerinin analizi sonucu hazırladığımız frekans dağılım tablosu ve çalışma alanını gösteren 1/25 000 ölçekli sayısallaştırılmış harita yardımı ile WAsP programında yapılan analiz ile rüzgar atlası istatistikleri elde edilmiştir.

Öncelikle WAsP programına aktarılan veriler programda analiz edilerek Şekil 2.6 'da bölgenin ortalama rüzgar şiddeti haritası ve Şekil 2.7'de bölgenin güç yoğunluğu haritası görsel olarak elde edilmiştir. Hazırladığımız rüzgar hızı haritası ile rüzgar hızının yüksek olduğu alanlarda türbin yerleştirme işlemi yapılacaktır.



Şekil 2.6. Bölgede hesaplanan ortalama rüzgar şiddeti haritası



Şekil 2.7. Bölgenin güç yoğunluğu haritası

Rüzgar atlası, rüzgar santrali kurulacak bölgede rüzgar türbinlerinin haritada yer alan renklere göre nereye yerleştirilmesi konusunda yol göstericidir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi kırmızı alanlar enerji potansiyelinin yüksek olduğu yerleri gösterirken sarı alanlar enerji potansiyelinin dikkate değer olduğunu gösterir, mavi alanlar ise enerji potansiyelinin düşük olduğu yerleri göstermektedir. Rüzgar türbinlerini gerçek yerine konumlandırırken haritaya ek olarak arazi yapısı, ulaşım imkanı ve hakim rüzgar yönü parametrelerini de mutlaka dikkate almamız gerekir.

2.1.4. Mikro-konuşlandırma ve Türbin Seçimi

Tez çalışmasında bölgede 12 MW'lık bir rüzgar santralini kurulması düşünülmüş, bu kurulum için WASP programı içerisinde bulunan VESTAS V80 tipi 2 MW'lık rüzgar türbini kullanımı planlanmıştır. Tablo 2.5'de tez çalışmasında kullanılan VESTAS V80 2.0 rüzgar türbinine ait teknik özellikler verilmiştir.

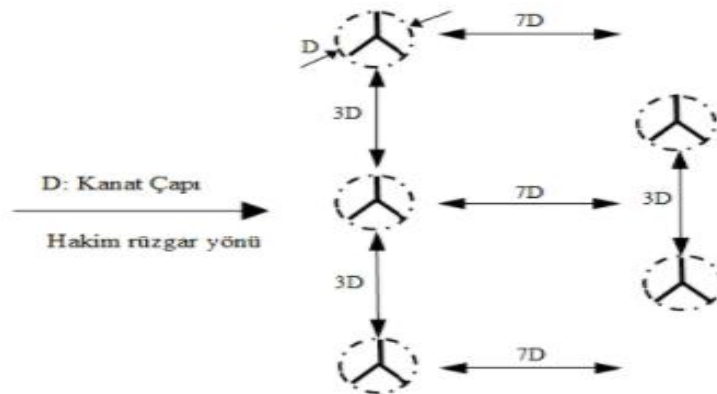
VESTAS V80 2.0 rüzgar türbinini seçtikten sonra, Wasp programı kullanılarak türbinlerin bölge üzerindeki nominal konumlandırması rüzgar atlasındaki enerji potansiyeli renk dağılımları, türbin özellikleri ve daha önceden hesaplanan frekans dağılım değerleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Tablo 2.5. Vestas V80'in teknik özellikleri

İşletme Verileri	
Nominal Güç	2000kW
Devreye Girme Hızı	4 m/s
Nominal Rüzgar Hızı	16 m/s
Devreden Çıkma Hızı	25 m/s
Rotor	
Rotor Çapı	80 m
Süpürme Alanı	5027
Tower	
Hub Yüksekliği	80 m

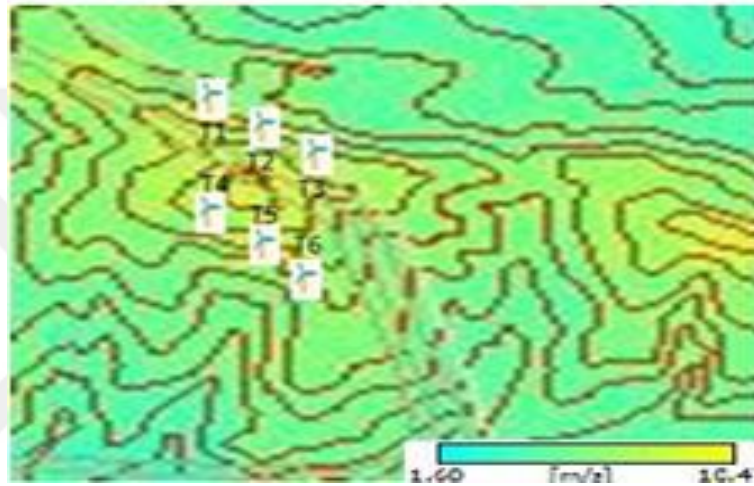
Rüzgar türbinleri türbine gelen rüzgardaki enerjiyi elektrik enerjisine çevirdikten sonra rüzgar hızının yavaşlamasına sebep olur. Bu sebeple, rüzgar türbinlerinin belli aralıklarla yerleştirilmesi gerekmektedir. Rüzgar enerji santrali kurulacak saha içinde rüzgar türbinlerinin en fazla üretim yapabilecek şekilde optimum olarak yerleştirilmesi işlemine mikro-konuşlandırma denir. Mikro-konuşlandırma için rüzgâr türbinleri, tek bir hat boyunca yerleştirilebileceği gibi çift sıralı olarak da yerleştirilebilmektedir.

Rüzgâr enerji santrallerinde, türbinler birbirlerinden en az 3 kanat çapı (3D) uzaklıkta kurulurlar. Böylelikle türbinlerin rüzgar akıntısının da meydana gelecek türbülansın sakınmış oluruz. Genel olarak bir rüzgar enerji santralinde, aynı sıradaki türbinler arası en az 7 kanat çapı (7D) ve türbinler birbirlerine en az 3 kanat çapı (3D) mesafe olacak şekilde yerleştirilirler. Rüzgar türbinlerinin mikro-konuşlandırılması Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Rüzgar türbinlerinin mikro-konuşlandırılması

Tez çalışmasında WAsP programında bulunan VESTAS V80 2.0 MW'lık rüzgar türbinleri kullanılarak mikro-konuşlandırma çalışması yapılmıştır. Mikro-konuşlandırma çalışmasında türbinlerin bir biri üzerinde oluşturdukları iz kayıpları minimum düzeyde olacak şekilde yerleşim yapıldı. Ayrıca en yüksek verimi alacak şekilde optimum türbin yerleşimi tasarlanırken sadece üretim miktarı değil, türbinlerin teknik açıdan çalışabilme sınırları da dikkate alınarak rüzgar türbinleri hakim rüzgar yönünde yerleştirilmiştir. Şekil 2. 9'da 6 adet VESTAS V80 2 MW'lık rüzgar türbini mikro-konuşlandırma uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.9. Türbinlerin mikro-konuşlandırma işlemi

Çalışmada tasarlanan 6 adet VESTAS V80 rüzgar türbininden oluşan 12 MW mikro-konuşlandırma uygulaması sonucu Tablo 2.6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yıllık brüt 41.316 GWh elektrik üretimi olacağı, 7,173 GWh Wake (iz) kaybı olacağı ve net 38.352 GWh elektrik üretimi olacağı hesaplanmıştır.

Tablo 2.6. 6 adet V80 rüzgar türbinlerinin yıllık üretim değerleri

Parametre	Toplam	Minimum	Maksimum
Net Yıllık Üretim (GWh)	38,352	5,713	7,082
Brüt Yıllık Üretim (GWh)	41,316	6,034	7,897
Wake (İz) Kaybı (%)	7,173		

Tablo 2.7'de ise tasarlanması düşünülen rüzgar santrali içindeki her bir rüzgar türbinine ait hesaplanan net yıllık üretim ve Wake (iz) kaybı değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2.7. 6 adet V80 rüzgar türbinlerine ait üretim ve kayıp değerleri

Türbin Numarası	Göbek Yüksekliği (m)	Net Yıllık Üretim (GWh)	Wake (İz) Kaybı
Türbin 1	80	6,789	7,09
Türbin 2	80	6,145	6,18
Türbin 3	80	5,824	9,62
Türbin 4	80	7,082	5,34
Türbin 5	80	6,799	8,29
Türbin 6	80	5,713	9,79

Tablo 2.7'den de görüleceği gibi yıllık net enerji üretim değerleri göz önüne alındığında en fazla üretimin 7, 082 GWh ile 4 numaralı türbinde en az üretimin 5,713 GWh ile 6 numaralı türbinde olduğu görülmüştür. Mikro-konuşlandırma çalışmasında en fazla iz kaybı %9,79 ile 6 numaralı türbinde en az iz kaybı ise % 5,34 ile 4 numaralı türbinde olduğu hesaplanmıştır.

2.1.5. Bölgenin Kapasite Faktörünün Hesaplanması

Kapasite faktörü, belirli bir süre boyunca üretilen toplam fiili enerjinin ya da arzın, tesis (üretim birimi) maksimum değerinde sürekli olarak çalışmış olsaydı üretilecek enerjiye oranı olarak tanımlanır [83,84]. Rüzgar türbiniyle, türbine gelen rüzgarın tüm enerjisinden faydalanmak imkansızdır. Rüzgar enerjisinin yaklaşık olarak teoride %60'lık kısmından faydalanılmaktadır. Kullanılmakta olan rüzgar türbinleri için kapasite faktörünün değeri yaklaşık olarak % 40'dır. Bu değer düşük olması, hava direnci, türbülans ve elektrik hatlarındaki kayıplara bağlıdır.

$$C_f = \frac{E_{out}}{E_r} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de C_f ifadesi kapasite faktörünü, $E_r = 8760 \times P_t$ türbinin yıllık ürettiği brüt enerji, P_t Türbin çıkış gücü, E_{out} türbinin ürettiği net enerji miktarıdır. Tipik bir rüzgar türbinin kapasite faktörü; rüzgar türbininin kurulduğu yerin rüzgar kapasitesine bağlı olarak %20 ile %35 arasında değişir. Ülkemizde yatırımın yapılabilmesi için istenilen kapasite faktörü değeri % 25 ve üzeridir [85].

Tablo 2.8'de yapılan mikro-konuşlandırma çalışması ile hesaplanan nominal güçte üretilebilecek enerji miktarı, yıllık hesaplanan üretim miktarı ile kapasite faktörü gösterilmiştir.

Tablo 2.8. Bölgenin kapasite faktörü

Türbin Modeli	Türbin Sayısı	Kurulu Güç	Yıllık Hesaplanan Üretim Miktarı (GWh)	Nominal Güçte Üretilebilecek Enerji (GWh)	Kapasite Faktörü (%)
VESTAS V80	6	12	38,352	105,12	36.48

Tasarlanan 12 MW lık kurulu güce sahip rüzgar santralinin $24 \times 365 = 8760$ saat çalışması durumunda 8760×12 MW nominal güçte üretilebilecek enerji miktarı 105,120 GWh olarak hesaplanmıştır, 12 MW'lık kurulu güç için WAsP yazılımı ile yıllık hesaplanan üretim miktarını 38,352 GWh olarak bulmuştuk. Bu sonuçlar kullanılarak kapasite faktörünü $38,352 / 105,120 = 0,3648$ yani %36.48 olarak hesaplarız.

Tez çalışmasında bulanık tabanlı karar sisteminin meteorolojik fuzzy kural tabanında giriş birimi olarak kullanılacak kapasite faktörü 36.48 olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerin rüzgar türbin kurulumu için aranılan değer aralığında olduğunu söyleyebiliriz. Kapasite faktörü bölgedeki rüzgar potansiyeli ile doğrudan ilişkilidir, bu ilişki özellikle yatırımların amortisman sürelerini belirlemede büyük öneme sahiptir [86].

2.1.6. Verilerin Ekonomik Analizi

Rüzgâr enerji projelerinin maliyeti birçok parametreye bağlıdır. Bir projede ekonomik analiz kısmında kWh maliyeti, ilk kurulum maliyeti, hurda bedeli, yıllık sabit maliyetler, öngörülemez gider, enflasyon, faiz oranı, geri ödeme süresi, proje ömrü ve öz sermaye gibi kalemlerin hesaplanması ile projenin uygunluğunu öngörmemiz mümkün olur. Ayrıca kapasite faktörü ve ilk kurulum maliyeti projelerde büyük önem taşımaktadır.

Ekonomik süreçler, çok sayıda zaman-varyant faktörleri içerdiğinden ve değerlerinin dalgalanmalarının güvenilir bir şekilde tahmin edilememesinden dolayı daha karmaşıktır. Maliyet-etkililik analizleri her zaman bir projenin ve bir çok yatırımcının kararının temeli olacaktır.

Tez çalışmasında, ele alınan analizlerde rüzgar enerjisi yatırım ve üretim maliyetlerinin belirlenmesinde başta ulusal ve uluslar arası rüzgar enerji otoritelerinin yayınladığı raporlar, konuyla ilgili makale ve tez çalışmaları incelenmiştir. Hesaplamalar bazı kabuller ve genellemeler yapılarak ve bazı değerler dünya maliyet ortalamaları dikkate alınarak yapılmıştır. Rüzgar türbini kurulum maliyetlerinin temel bileşenleri;

- ✓ 2.0 MW'lık bir türbinde, rotor çapı ve göbek yüksekliğini de etkileyen jeneratör gücünü de dikkate aldığımızda ilk kurulum maliyetinin yaklaşık % 75-80'lik kısmını oluşturmaktadır.
- ✓ Proje hazırlık masrafları, gerekli izin ve lisanslar, arazi keşfi gibi kalemler kurulum maliyetinin yaklaşık %5'lik kısmını oluşturur.
- ✓ Şebeke bağlantı masrafları, rüzgar santralinden elde edilen elektriğin trafo merkezine iletilebilmesi amacı ile yapılan harcamalardır. Bu kalem içinde transformatör, şalt merkezi ve enerji nakil hatları bulunmaktadır.
- ✓ Rüzgar santrali kurulacak arazi kiralama bedeli.
- ✓ İnşaat işleri masrafı, temel ve kurulum masrafları, her ne kadar projenin yapıldığı arazi koşullarına göre değişse de ilk kurulum maliyetinin yaklaşık %6,5-7'lik kısmını oluşturmaktadır.

Çalışmada ilk kurulum maliyeti dahilinde, Avrupa Rüzgar enerjisi Birliği'nin raporunda geçtiği şekilde türbin maliyeti, şebeke bağlantısı, temel ve kurulum maliyetleri, elektrik tesisatı, yol yapımı ve kontrol sistemleri sayılmış, arazi kirası, müşavirlik, bakım ve onarım maliyetleri ve yıllık lisans bedeli yıllar içerisinde sürekli ödenen maliyetler olarak analize dahil edilmiştir.

Tez çalışmasında kurulması planlanan 6 adet VESTAS V80 2.0 MW'lık rüzgar türbini için hesaplanan ve tahmin edilen harcamalar Tablo 2.9'da gösterilmiştir. Türbin firmaları yatırım fiyatlarının gizli tutulması ilkeleri gereğince, Türbin ve montaj fiyatları hariç verileri net olarak değil yüzdesel olarak ifade etmektedirler. Bu nedenle daha öncede belirtildiği gibi hesaplamalarda bazı kabuller ve genellemeler yapılarak ve bazı değerler dünya maliyet ortalamaları dikkate alınarak yapılmıştır [87- 93].

Tablo 2.9. Türbin kurulum maliyeti

Kurulum Parametreleri	Maliyet (€)
Türbin ve Montaj	9.000.000
Proje Hazırlık masrafları (izin ve Lisanslar)	650.000
Yer Arazi Bedeli	100.000
Şebeke bağlantıları (Kablo, Transformatör,Haberleşme)	1.800.000
Temel ve Kurulum (Temel, Yol, Şantiye)	1.200.000
Finans (Müşavirlik, sigorta, banka)	450.000
Toplam	13.200.000

Tablo 2.9'da EWEA ve VESTAS firmasından alınan değerler ve kabuller ile 2 MW VESTAS V80 türbininin her biri için montaj ile birlikte 1.500.000 € , finans kaleminin türbin montaj fiyatının % 5 oranında değiştiği varsayılarak 450.000 €, bağlantı giderleri genel olarak türbin fiyatının % 20 oranı kabul edilmiş ve her bir türbin için 300.000 €, betonarme temel ve yol yapımı % 10-15 lik oran için her bir türbin için 200.000 €, Kira bedeli kurulu sistemlerin genel ortalamalarına bakılarak santral için 100.000 €, proje için sigorta, banka, müşavirlik, finansman, giderleri için harcanan para proje toplam yatırım tutarının %5 olarak düşünülmüş ve yaklaşık olarak 650.000 € hesaplanmıştır [87- 93].

Tez çalışmasında, 12 MW'lık kurulu güç için yıllık 38.352 GWh enerji üretimi hesaplanmıştır. Elektrik satış fiyatı 5.5 cent/kWh üzerinden yapılan hesaplamada yıllık gelir 2.109.360  olarak hesaplanmıştır. Rüzgar enerji projesinde sera gazının azaltılmasına dair verilen taahhüt proje geliştiricisi için emisyon satış geliri ile ilave gelir akışı sağlar.

VER hesabı kısaca ürettiğimiz elektrik miktarının 0,77 gibibir değerle çarpılarak yapılır, bu değer yıllara ve yatırım yapılan ülkenin enerji üretim profiline göre değişir. Bu metodolojilere göre 38.352 GWh'lık enerji üretimi için projede hesapladığımız emisyon satış geliri yıllık 82.608  olarak hesaplanmıştır [87- 93].

Tablo 2.10'a bakıldığında projeden elde edilecek yıllık işletme geliri 2.191.168 , projenin yıllık işletme gideri 266.000 ve yıllık işletme karı 1.925.168 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.10. Yıllık Gelir / Gider Tablosu

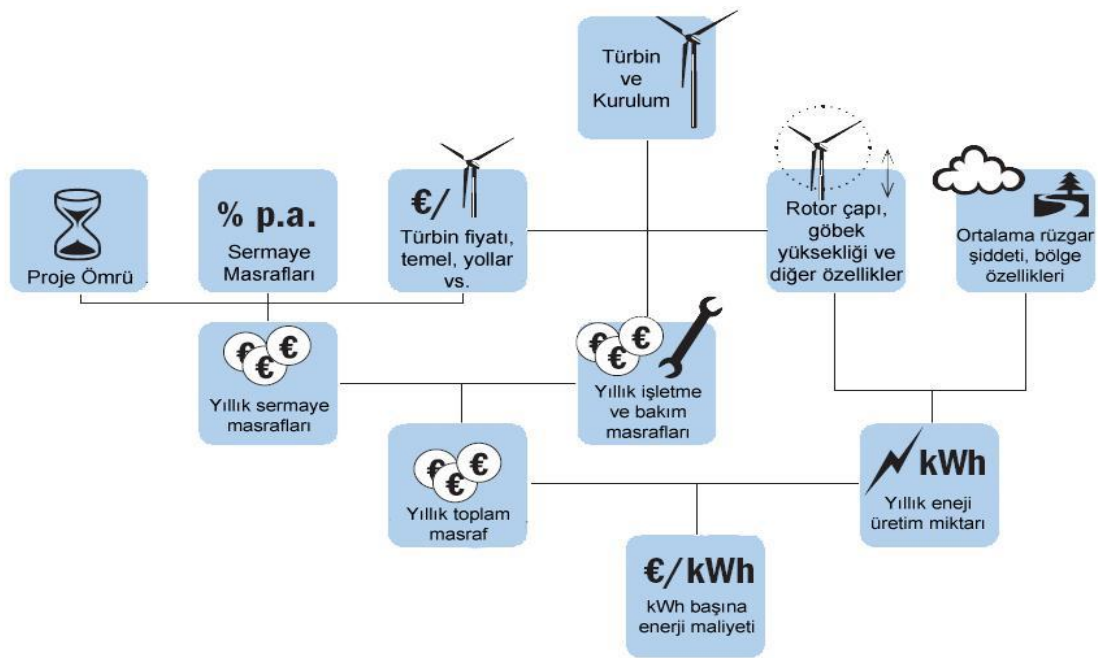
	 / Yıl
Elektrik Satış Gelirleri	2.109.360
Emisyon Satış Geliri	82.608
Yıllık İşletme Gelirleri (/Yıl)	2.191.168
Kira Bedeli	100.000
Bakım-Onarım-Sigorta	130.000
İşçilik	30.000
Yıllık Lisans Bedeli	1.000
Genel Yönetim Giderleri	5.000
Yıllık İşletme Giderleri(/Yıl)	266.000
Yıllık İşletme Karı(/Yıl)	1.925.168

Çalışmada işletme giderleri,bakım onarım, sigorta, kira, lisans bedeli ve faiz gibi yıllara göre değişkenlik gösteren bazı değerler proje ömrü göz önüne alınarak gelir-gider tablosunda ortalama değer olarak yansıtılmıştır.

Çalışmada planlanan 12 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santralinden elde edilen elektriğin 5.5 cent/kWh üzerinden satılması durumunda, projenin kendini 7. senede amorti ettiği görülmektedir. Böylece bulanık tabanlı karar sisteminde karar fuzzy kural

tabanında giriş birimi olarak kullanmayı planladığımız amortisman süresini de hesaplamış olduk.

Rüzgar santrali kurulum aşamasındaki en önemli parametrelerden bir tanesi yıllık toplam masrafın yıllık enerji miktarına bölümüyle bulunan birim enerji maliyetidir. Yıllık enerji üretimi rüzgar hızı, hub yüksekliği ve rotor çapına bağlı iken yıllık masraflar kira bedeli, bakım-onarım-sigorta, işçilik, yıllık lisans bedeli, genel yönetim giderleri gibi parametrelere bağlıdır. Şekil 2.10'da rüzgar enerjisi projeleri için kWh başına maliyet hesabına etki eden etmenler görülmektedir [94].



Şekil 2.10. Rüzgar santrali kurulumunda kWh maliyet oluşumu

Bu çalışmada, seçilen türbinlerden elde edilen kapasite faktörü için kWh başına maliyeti hesaplanmıştır. Kurulan sistemde kullanılan VESTAS V80 türbini için hesaplanan kapasite faktörü %36,48 kullanılarak santralin kWh senelik üretim değerleri bulunmuştur.

Rüzgar santrali birim enerji maliyeti hesaplamasında ilk olarak denklem 2.9'da i faiz oranı, n amortisman süresi parametreleri ile verilen anaparayı geri kazanma olarak bilinen C faktörünü hesaplamamız gerekmektedir.

$$C = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.9)$$

Denklem 2.10'da I bakım, onarım ve işletme giderleri, CT rüzgar santrali ilk kurulum maliyeti, E üretilen yıllık enerji miktarını parametreleri ile hesaplanan üretim maliyeti ise;

$$\dot{U} = \frac{C_T(C+I)}{E} \quad (2.10)$$

Yapılan hesaplamalar sonucu kurulması planlanan rüzgar santralinden elde edilecek elektriğin birim maliyeti 0,0426 €/KWh = 4,26 €/KWh olarak bulunmuştur.

Yapılan hesaplamalarda bulanık mantık sisteminde giriş birimi olarak kullanılacak kWh birim maliyet ve amortisman süresi değerleri bulunmuştur. Rüzgar enerjisi meteorolojik parametrelere ne kadar bağımlı ise finansal parametrelere de o kadar bağımlıdır. Şu bir gerçektir ki kısa süreli geri ödeme planları ve yüksek faiz uygulamaları birim enerji maliyetini yükseltmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde, Arapgir Meteoroloji Müdürlüğü OMGİ'den alınan 10m yükseklik ve 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgar hız ve yön verileri WASP yazılımı ile analiz edilmiştir. Yapılan analizde ortalama rüzgar hızını 2,75 m/s, ortalama güç yoğunluğu 53 W/m², k şekil parametresi 1.51 ve c ölçek parametresi 4,2 m/s olarak bulunmuştur.

Pürüzlülük sınıfına göre, 10 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı kullanılarak VESTAS V80 rüzgar türbini göbek yüksekliği 80 m yükseklikteki hız değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 80 m yükseklikte ortalama rüzgar hızını 7,1 m/s, ortalama güç yoğunluğu 309 W/m², şekil parametresi 1.67 ve ölçek parametresi 6,87 m/s olarak bulunmuştur.

WASP programında yapılan hesaplamalar sonucunda 12 sektöre sahip rüzgar gülü kullanılarak yapılan hesaplamalarda hakim rüzgar yönü 120⁰ sektöründe SE olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmada rüzgar gülünde belirlediğimiz 12 sektör için toplam 61.923 adet verinin analiz edilmesi sonucu Hellmann katsayısı 0.21 olarak bulunmuştur.

Çalışmada tasarlanan 12 MW kurulu güce sahip rüzgar santrali mikro-konuşlandırma uygulaması sonucunda yıllık brüt 41.316 GWh elektrik üretimi olacağı, 7,173 GWh Wake (iz) kaybı olacağı ve net 38.352 GWh elektrik üretimi olacağı hesaplanmıştır.

Tasarlanan 12 MW lık kurulu güce sahip rüzgar santralının $24 \times 365 = 8760$ saat çalışması durumunda 8760×12 MW nominal güçte üretilebilecek enerji miktarı 105,120 GWh olarak hesaplanmıştır, 12 MW'lık kurulu güç için WAsP yazılımı ile yıllık hesaplanan üretim miktarını 38,352 GWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak kapasite faktörünü $38,352 / 105,120 = 0,3648$ yani %36.48 olarak hesaplarız.

12 MW kurulu güçteki tesisin hesaplanan % 36,48 kapasite faktörü kullanılarak üretilen enerjinin KWh başına maliyeti 4,26 € c / KWh olarak bulunmuştur. Çalışmada planlanan 12 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santralinden elde edilen elektriğin 5.5 ¢cent/kWh üzerinden satılması durumunda, projenin kendini 7. senede amorti ettiği görülmektedir.

2.2. Bulanık Mantık Uygulaması

Tez çalışmasının bu bölümünde rüzgar santrallerinin kurulumu için karar verme aşamasında baz alınacak bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanmıştır. Tez çalışmasının birinci bölümünde belirlenen ve hesaplanan meteorolojik ve finansal giriş parametrelerinin değerlendirildiği bulanık kümeler, bulanık kurallar ve bulanık çıkarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bulanık mantık, kullanıcı tarafından sağlanan bir dizi insan dili kurallarına dayanarak başlar. Bulanık sistemler bu kuralları matematiksel eşdeğerlerine dönüştürür. Bu, sistem tasarımcısının ve bilgisayarın işini basitleştirir ve sistemlerin gerçek dünyada nasıl davrandığının çok daha doğru gösterimleriyle sonuçlanır. Bulanık mantığın ek faydaları arasında sadeliği ve esnekliği vardır. Bulanık mantık, kesin olmayan ve eksik verilerle problemleri çözebilir ve rastgele karmaşıklığın doğrusal olmayan fonksiyonlarını modelleyebilir.

Bulanık mantık, sıradan bir mantığın uzantısı olarak görülebilir. temel fark, değişkenlerin üyeliği için bulanık kümeler kullanmamızdır. Böylelikle bulanık öneri mantığına ve bulanık yüklem mantığına sahip olabiliriz ve fuzzy mantık, basit bir doğru / yanlış ifadenin yetersiz olduğu yapay zeka gibi alanlarda sıradan mantığa göre birçok avantaja sahip olabilir.

Bulanık mantık sistemleri çok çeşitli alanlarda ve uygulamalarda başarıyla kullanılmakta olup bunların en başında karar uygulamaları gelmektedir [95-100].

Tez çalışmasında tasarlanan bulanık mantık sistemi karar verme uygulaması olarak kullanılacaktır. Bulanık mantığı temel alan sistemlere bulanık sistemler diyoruz. Bir bulanık sistem üyelik fonksiyonu, bulanıklaştırma, kural tabanı ve durulaştırma olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Bulanık tabanlı sistemler giriş değerlerini üyelik fonksiyonlarını hazırlayarak kural tabanında yer alan kurallar süzgecinden geçirmek suretiyle en uygun çıkış değerini bulmayı sağlamaktadır.

Çalışmada ilk olarak dilsel değişkenler tanımlanarak giriş değerlerine verilen derecelerle üyelik fonksiyonları hazırlanmıştır sonra kesin olarak tanımlanan değerler üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değerlere dönüştürülmüştür, bulanıklaştırma işleminden sonrasında elde edilen bulanık değerler hazırladığımız kural tablosunda işleme tabi tutulmuştur, kural tabanının sonucu ile elde edilen bulanık değerler tekrardan kesin değerlere dönüştürülmüştür.

2.2.1. Dilsel Değişkenler/Bulanık Değerler Tanımlanması

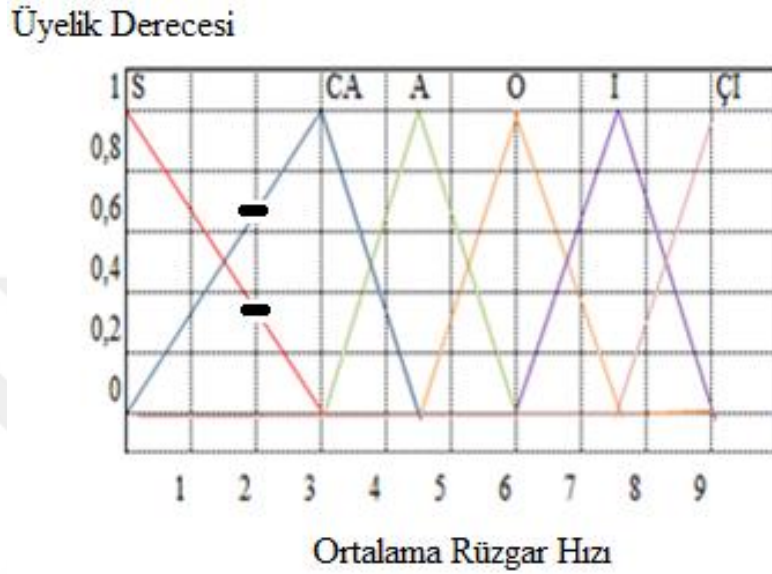
Dilsel kuralları kullanarak, insan ruhu ve bilgisi bulanık mantık sistemine dahil edilebilir. Bulanık küme teorisi ve matematiğinin desteğiyle, bulanık mantık sistemi belirlenen dilbilim kurallarına göre akıl yürütme yapabilir.

Zadehin, gerçek hayattaki karmaşıklıklardan kaçınmak için sözel değişkenler kullanılır ifadesine mukabil sözel değişkenlerin karşılığını sayı olarak değil günlük hayatta kullandığımız kelimeler veya cümleler olarak ifade edebiliriz. Sözel karakter tanımlama işlemi sayılara oranla cümlelere ve kelimelerde daha kolaydır.

Sözel değişken olarak bir U değeri tanımlayalım (örneğin ortalama rüzgar hızı). Bu sözel değişkeni x sayısal değeri ile gösterelim, burada $x \in U$ 'dur. Bazı problemlerin çözümünde sözel değişken bir harf ise u ve x değişkenlerini yer değiştirebiliriz. Tanımladığımız U sözel değişkeninin evrensel küme değişkeni $T(u)$ aşağıdaki gibi farklı bölümlere ayrıştırılarak gösterilebilir.

- ✓ Ortalama Rüzgar hızı (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.
- ✓ $T(\text{Ortalama Rüzgar Hızı}) = \{\text{sıfır, çok az, az, orta, iyi, çok iyi}\}$
- ✓ $T(\text{Ortalama Rüzgar Hızı})$ 'nın içindeki her bir terim $U = [0 \text{ m/s, } 10 \text{ m/s}]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Şekil 2.11'de bu terimler için tanımlanan bulanık küme üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Ortalama rüzgar hızının yatay ekseninde ölçülen değeri x olsun. Örnek olarak $x=2$ m/s değerinde, sıfır ve çok az ortalama rüzgar hızı kümelerinde farklı üyelik derecelerinde yer almaktadır.



Şekil 2.11. Rüzgar hızına ait üyelik fonksiyonu

Yapılan çalışmada kullandığımız tanımlar bizim söylemlerimiz doğrultusunda geliştirilmiştir. Geliştirilen tanımlara dilsel terimler denir ve herhangi bir dilsel değişkenin olası değerlerini temsil eder. Dilsel değişkenler, günlük hayattaki gerçek değerleri uygulamalarda kullanılacak dilsel değerlere dönüştürürler.

Dilsel değişkenler, sayılar değil, doğal veya yapay bir dildeki kelimeler veya cümlelerdir. Bir cebirsel değişkenin de sayıları değer olarak alması gibi, bir dil değişkeni de kelimeler veya cümleleri değer olarak alır. Alabileceği değerler dizisine terim kümesi denir.

Belirlenen terimdeki her bir değer, bir temel değişken üzerinde tanımlanan bulanık bir değişkendir. Temel değişken, belirlenen terimdeki tüm bulanık değişkenler için söylem evrenini tanımlar. Tez çalışması kapsamında belirlenen giriş ve çıkış birimleri için tanımlanan dilsel terimler ve dilsel değişkenler aşağıdaki gibidir.

Ortalama Rüzgar Hızı (X1):

Ortalama Rüzgar Hızı (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Ortalama Rüzgar Hızı}) = \{\text{sıfır, çok az, az, orta, iyi, çok iyi}\}$

$T(\text{Ortalama Rüzgar Hızı})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \text{ m/s}, 10 \text{ m/s}]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Ortalama Güç Yoğunluğu (X2):

Ortalama Güç Yoğunluğu (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Ortalama Güç Yoğunluğu}) = \{\text{çok çok düşük, çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek}\}$

$T(\text{Ortalama Güç Yoğunluğu})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \text{ W/m}^2, 8000 \text{ W/m}^2]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Kapasite Faktörü (X3):

Kapasite Faktörü (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Kapasite Faktörü}) = \{\text{küçük, orta, uygun, çok uygun, çok çok uygun}\}$

$T(\text{Kapasite Faktörü})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 70\%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Meteorolojik Fuzzy Çıkış Değişkeni (Y1):

Çıkış Değişkeni (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Çıkış Değişkeni}) = \{\text{sıfır, çok az, az, orta, iyi, çok iyi}\}$

$T(\text{Çıkış Değişkeni})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 100 \%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Öz Sermaye (X4):

Öz Sermaye (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Öz Sermaye}) = \{\text{sıfır, çok az, az, orta, iyi, çok iyi}\}$

$T(\text{Öz Sermaye})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 100 \%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Öngörülemeyen Gider (X5):

Öngörülemeyen Gider (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Öngörülemeyen Gider}) = \{\text{çok iyi, iyi, orta, kötü, çok kötü, çok çok kötü}\}$

$T(\text{Öngörülemeyen Gider})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 5 \%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

kWh Maliyeti (X6):

kWh Maliyeti (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{kWh Maliyeti}) = \{\text{çok iyi, iyi, orta, kötü, çok kötü, çok çok kötü}\}$

$T(\text{kWh Maliyeti})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \text{ €/KWh}, 7 \text{ €/KWh}]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Finans Fuzzy Çıkış Değişkeni (Y2):

Çıkış Değişkeni (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Çıkış Değişkeni}) = \{\text{sıfır, çok az, az, orta, iyi, çok iyi}\}$

$T(\text{Çıkış Değişkeni})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 100 \%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Amortisman Süresi (X7):

Amortisman Süresi (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Amortisman Süresi}) = \{\text{çok iyi, iyi, orta, kötü, çok kötü, çok çok kötü}\}$

$T(\text{Amortisman Süresi})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \text{ yıl}, 7 \text{ yıl}]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

Karar Fuzzy Çıkış Değişkeni (Y3):

Çıkış Değişkeni (u) tanımladığımız sözel değişken olsun.

$T(\text{Çıkış Değişkeni}) = \{\text{çok çok düşük, çok düşük, düşük, orta, iyi, çok iyi, çok çok iyi}\}$

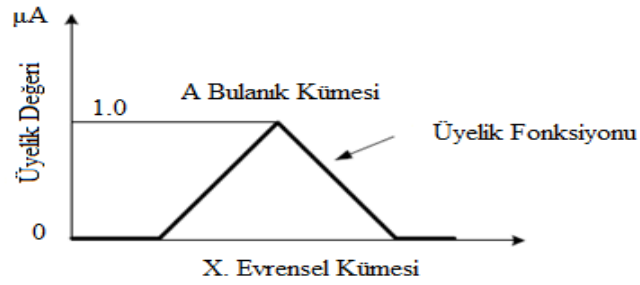
$T(\text{Çıkış Değişkeni})$ 'nin içindeki her bir terim $U = [0 \%, 100 \%]$ aralığında tanımlanan evrensel küme

2.2.2. Üyelik Fonksiyonlarının Hazırlanması

Bulanık kümenin üyelik işlevi, klasik kümelerdeki gösterge işlevinin genelleştirilmesidir. Bulanık mantıkta, gerçeğin derecesini değerlemenin bir uzantısı olarak temsil eder. Gerçeğin doğrulukları genellikle kavramsal olarak farklı olmalarına rağmen olasılıklarla karıştırılır, çünkü bulanık gerçek, belli bir olayın ya da durumun gerçekleşme ihtimalinin değil, belli belirsiz tanımlanmış kümelere üyeliği temsil eder. Üyelik fonksiyonlarına, Zadeh'in bulanık kümeler hakkındaki ilk makalesinde değinilmiştir.

Yapay sinir ağları, sezgi, genetik algoritma, açılı bulanık küme ve çıkarım bulanık mantık üyelik fonksiyonları belirlemede kullanılan yöntemler arasında sayılabilir [101]. Bulanık mantık uygulamalarında kullanılan üyelik fonksiyonları yamuk, üçgen, gaussian, S üyelik fonksiyonu, Π üyelik fonksiyonu ve çan eğrisi üyelik fonksiyonlarıdır [102].

Prensip olarak $A: X \rightarrow [0,1]$ formunun herhangi bir işlevi bir üyeliği tanımlar. Bu, yalnızca temsil edilecek konsepte değil, aynı zamanda kullanıldığı bağlama da bağlı olan bir bulanık kümeyle (A) ilişkili fonksiyon. Fonksiyonların grafikleri farklı şekillere sahip olabilir ve belirli özelliklere sahip olabilir. Belirli bir şeklin uygun olup olmadığı sadece uygulama bağlamında belirlenebilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, bulanık kümeler tarafından yakalanan anlam semantiği, şekildeki değişikliklere karşı çok hassas değildir ve basit işlevler uygundur.

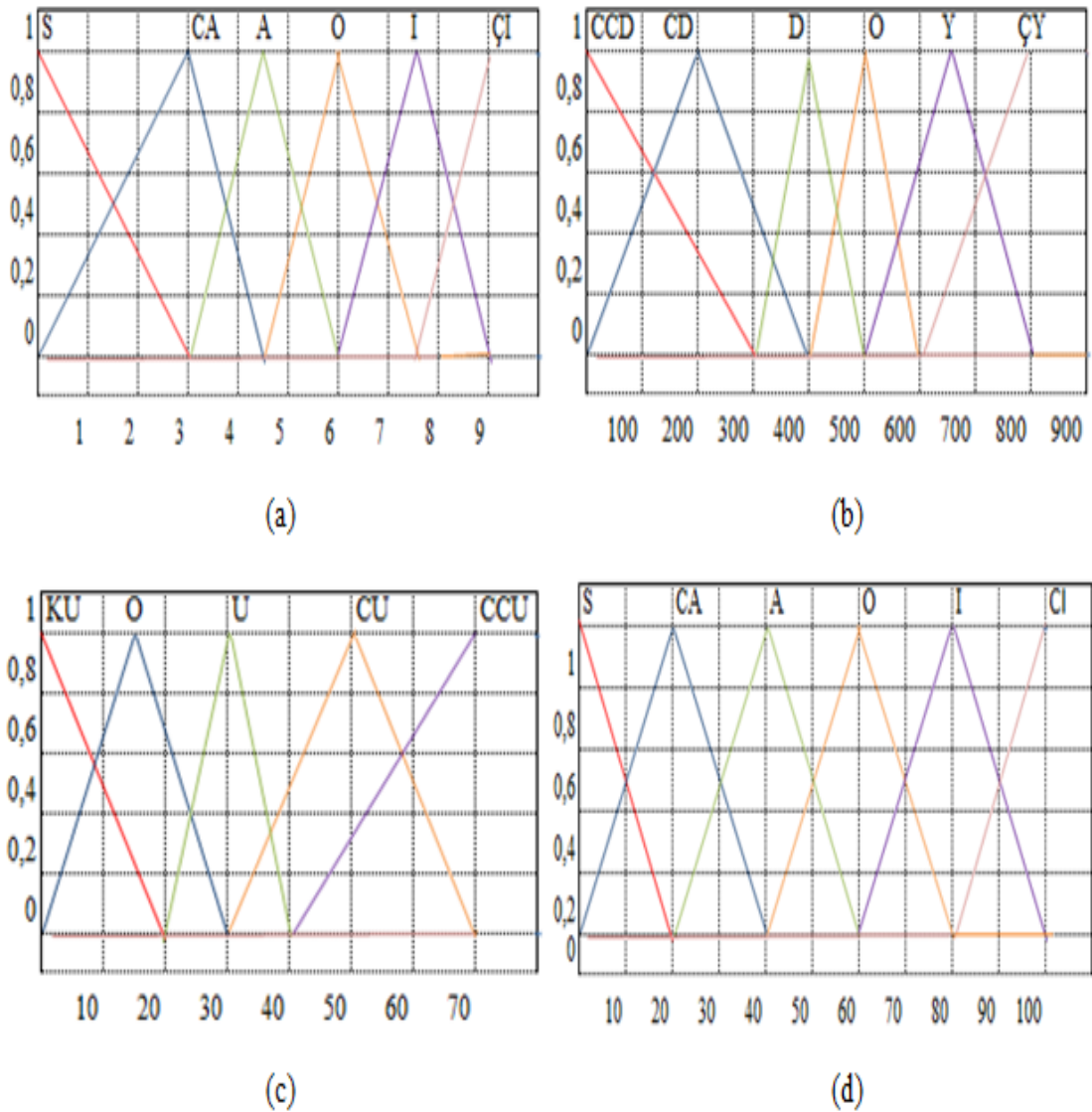


Şekil 2.12. Üyelik fonksiyonunun yapısı

Üyelik işlevi, 0 ile 1 arasında olan her bir girdi değişkeninin üyelik derecesinin büyüklüğünü temsil eden bir grafikdir. Bir değişken x üyeliğinin derecesi, $\mu(x)$ sembolü ile gösterilir. Kurallar, sonuç çıkarmak için çıkarımlar yaparken etkisini belirlemek için üyelik değerini bir ağırlık faktörü olarak kullanır.

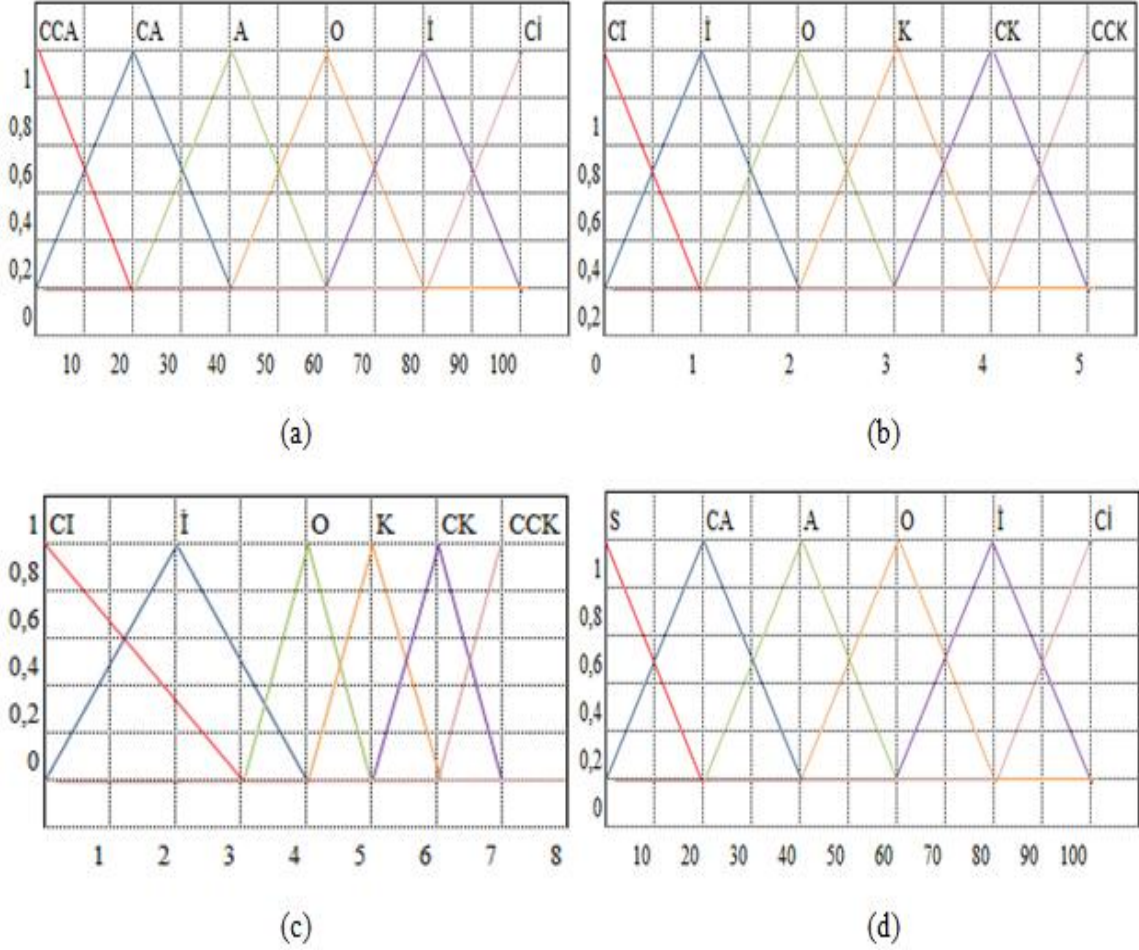
Tez çalışması kapsamında belirlenen giriş ve çıkış birimleri için hazırlanan üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

Meteorolojik_fuzzy sisteminde, ortalama rüzgar hızı X1 üyelik fonksiyonu, ortalama güç yoğunluğu X2 üyelik fonksiyonu, kapasite faktörü X3 üyelik fonksiyonu ve giriş değerlerine karşın Y1 çıkış değeri için hazırlanan üyelik fonksiyonu Şekil 2.13 'de gösterilmiştir.



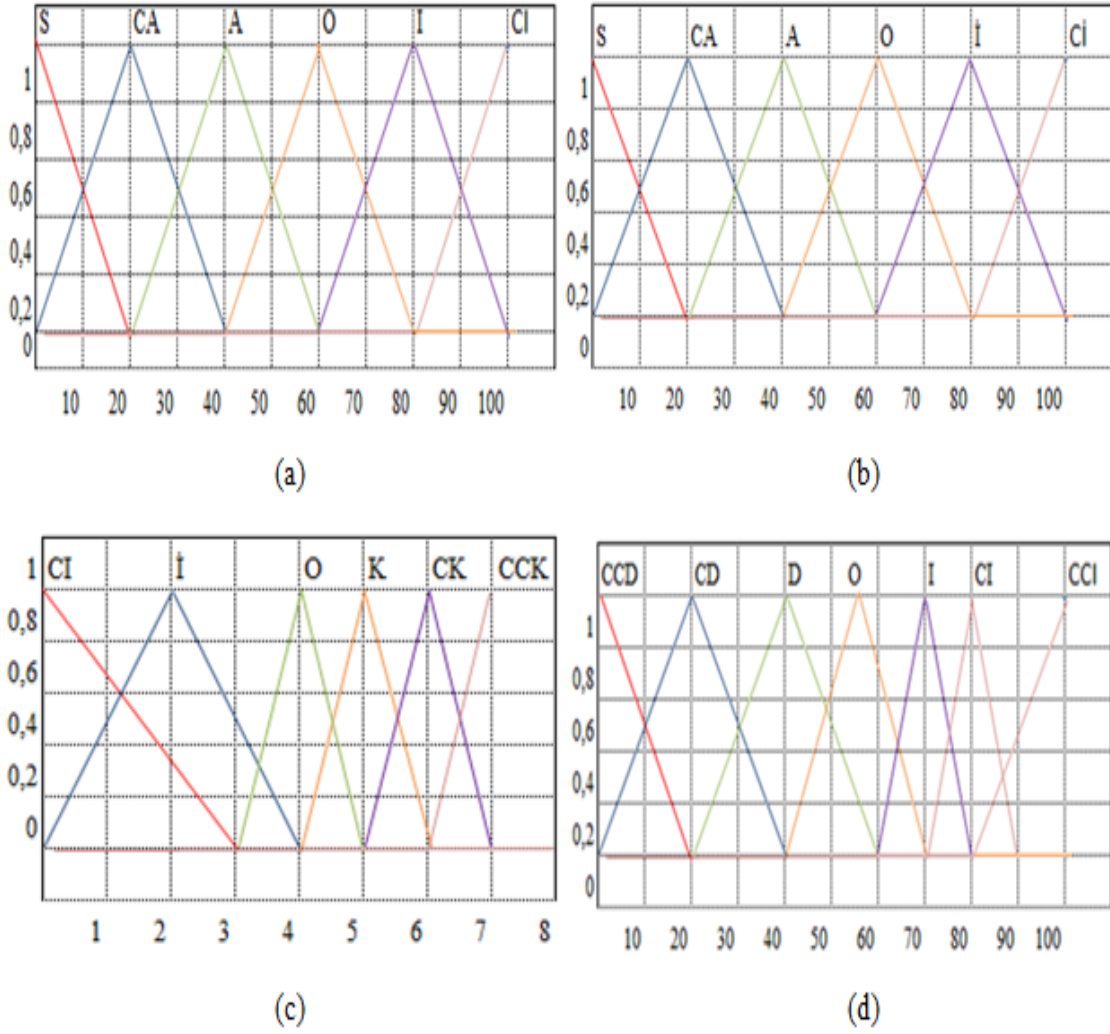
Şekil 2.13. (a) Ortalama rüzgar hızına ait üyelik fonksiyonu (b) Ortalama güç yoğunluğuna ait üyelik fonksiyonu (c) Kapasite faktörüne ait üyelik fonksiyonu (d) Meteorolojik fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu

Finans_fuzzy sisteminde, öz sermaye X4 üyelik fonksiyonu, öngörülemeyen gider X5 üyelik fonksiyonu, kWh maliyeti X6 üyelik fonksiyonu ve giriş değerlerine karşın Y2 çıkış değeri için hazırlanan üyelik fonksiyonu Şekil 2.14 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. (a) Öz sermaye giriş değerine ait üyelik fonksiyonu (b) Öngörülemeyen gider değerine ait üyelik fonksiyonu (c) kWh Maliyeti değerine ait üyelik fonksiyonu (d) Finans fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu

Karar_fuzzy sisteminde, meteorolojik_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y1 üyelik fonksiyonu, finans_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y2 üyelik fonksiyonu, amortisman süresi X7 üyelik fonksiyonu ve giriş değerlerine karşın Y3 çıkış değeri için hazırlanan üyelik fonksiyonu Şekil 2.15 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. (a) Meteorolojik fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu (b) Finans fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu (c) Amortisman süresi değerine ait üyelik fonksiyonu (d) Karar fuzzy çıkış değerine ait üyelik fonksiyonu

Tez çalışmasının bu bölümünde , tasarlanan karar sisteminde yer alan meteorolojik, finansal ve karar fuzzy sistemleri için belirlediğimiz giriş ve çıkış parametrelerine ait üyelik fonksiyonları hazırlanmıştır.

Çalışmada üç farklı üyelik fonksiyonu için bulanık mantık denetleyici tasarlanmış sisteme ayrı ayrı uygulanmıştır, her üyelik fonksiyonunun sisteme olan etkileri incelenerek en uygun üyelik fonksiyonu tipi olarak üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiş ve kullanılan her bir üyelik fonksiyonu için belirlenen aralıklar ve dilsel değişkenler gösterilmiştir.

2.2.3. Farklı Üyelik Fonksiyonlarının Etkilerinin Analizi

Bulanık mantık uygulamalarında üyelik fonksiyonu seçimi çoğunlukla uygulamacının tecrübesi, bilgisi ve edindiği alışkanlıklara göre farklı olabilmektedir. Günümüz mevcut uygulamalarında genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, yapay arı kolonisi, yapay sinir ağları, benzetim tavlama, yasak arama gibi optimizasyon yöntemleri ile de belirlenebilmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde rüzgar enerji türbinlerinin kurulumunda EPDK'nın belirlediği meteorolojik tabanlı parametreler olan ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu ve kapasite faktörü parametreleri için Matlab/Simulink'de bir denetim sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde hazırladığımız 180 kurallı kural tablosu kullanılarak üç farklı üyelik fonksiyonunun etkisi incelenmiştir.

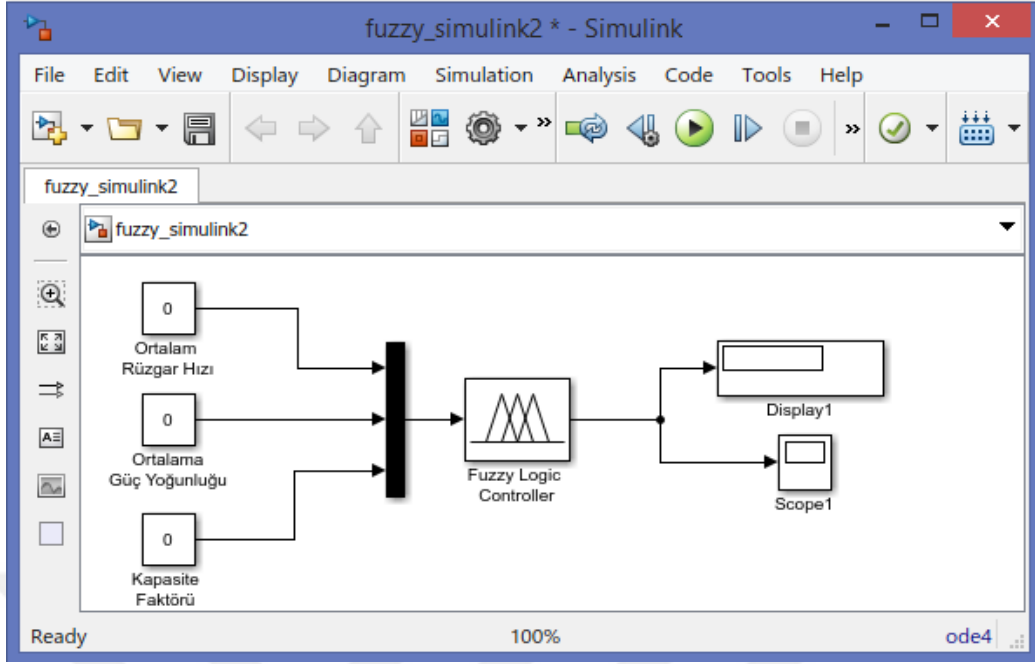
Literatürde farklı kontrol problemleri için yapılan çalışmaların bazıları; gözlemci tabanlı kontrol problemleri, çıktı-geri bildirim problemleri, pozitif kontrol problemleri, regülasyon kontrol problemleri, örneklenmiş veri kontrol problemleri, stabilizasyon kontrol problemleri, anahtarlama kontrolü problemleri, izleme kontrol problemleri [103-107].

Sistemin denetiminde üçgen, yamuk, gaussian üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık mantık denetleyicileri ayrı ayrı uygulanmış, her üyelik fonksiyonun sisteme olan etkileri incelenmiş ve en uygun üyelik fonksiyonunun hangisi olduğu belirlenmiştir.

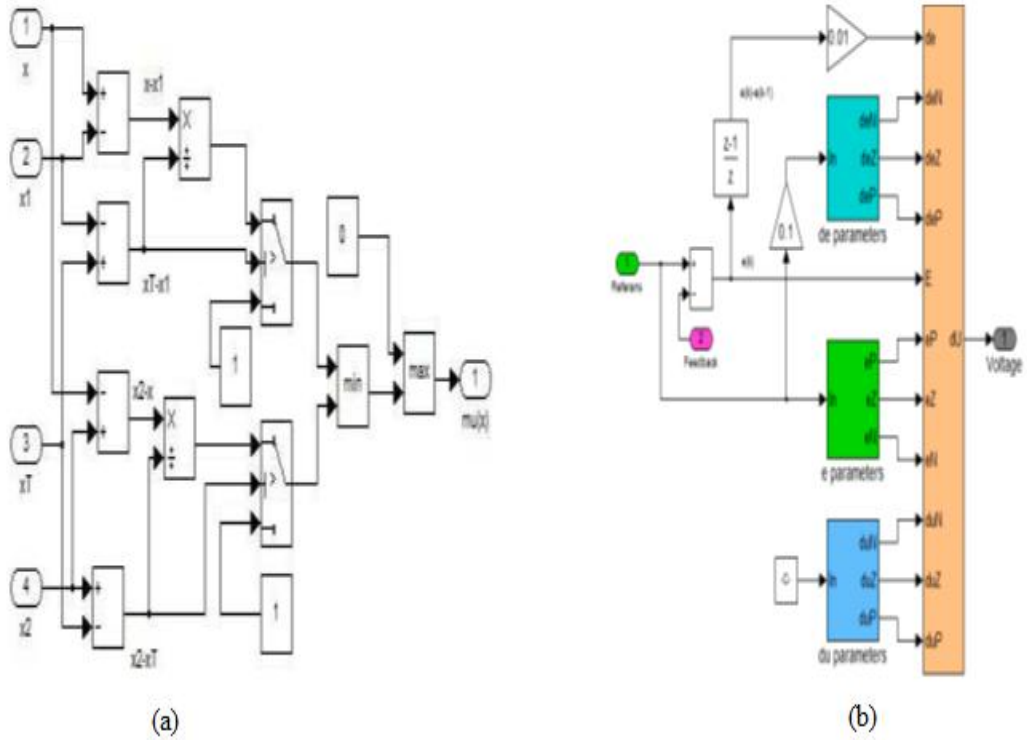
Farklı üyelik fonksiyonlarının etkileri analizinde, bölüm 2.2.1.1 ve bölüm 2.2.1.2 de belirlenen parametrelerin dilsel değişkenleri ve belirlenen üyelik fonksiyonu değer aralıkları kullanılmıştır. Tasarlanan sistemde denenecek tüm üyelik fonksiyonları Matlab/Simulink'de ayrı ayrı modellenmiştir.

Rüzgar enerji türbinlerinin kurulumu için tasarlanan karar sistemi Meteoroloji, Finans ve Karar olmak üzere üç ayrı fuzzy kural tabanının birleşiminden oluşmaktadır. Tasarlanan denetim sistemi bu üç fuzzy sisteminden meteorolojik_fuzzy sistemi için uygulanmıştır. Çalışmaya konu olan meteorolojik_fuzzy sisteminde, ortalama rüzgar hızı X_1 , ortalama güç yoğunluğu X_2 ve kapasite faktörü X_3 giriş değerlerine karşın Y_1 çıkış değeri üretmektedir.

Çalışmada tasarlanan sistemin Matlab/Simulink modeli Şekil 2.16'de, üçgen üyelik fonksiyonu simulink modeli ve bulanık mantık denetleyicinin simulink blok diyagramı Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

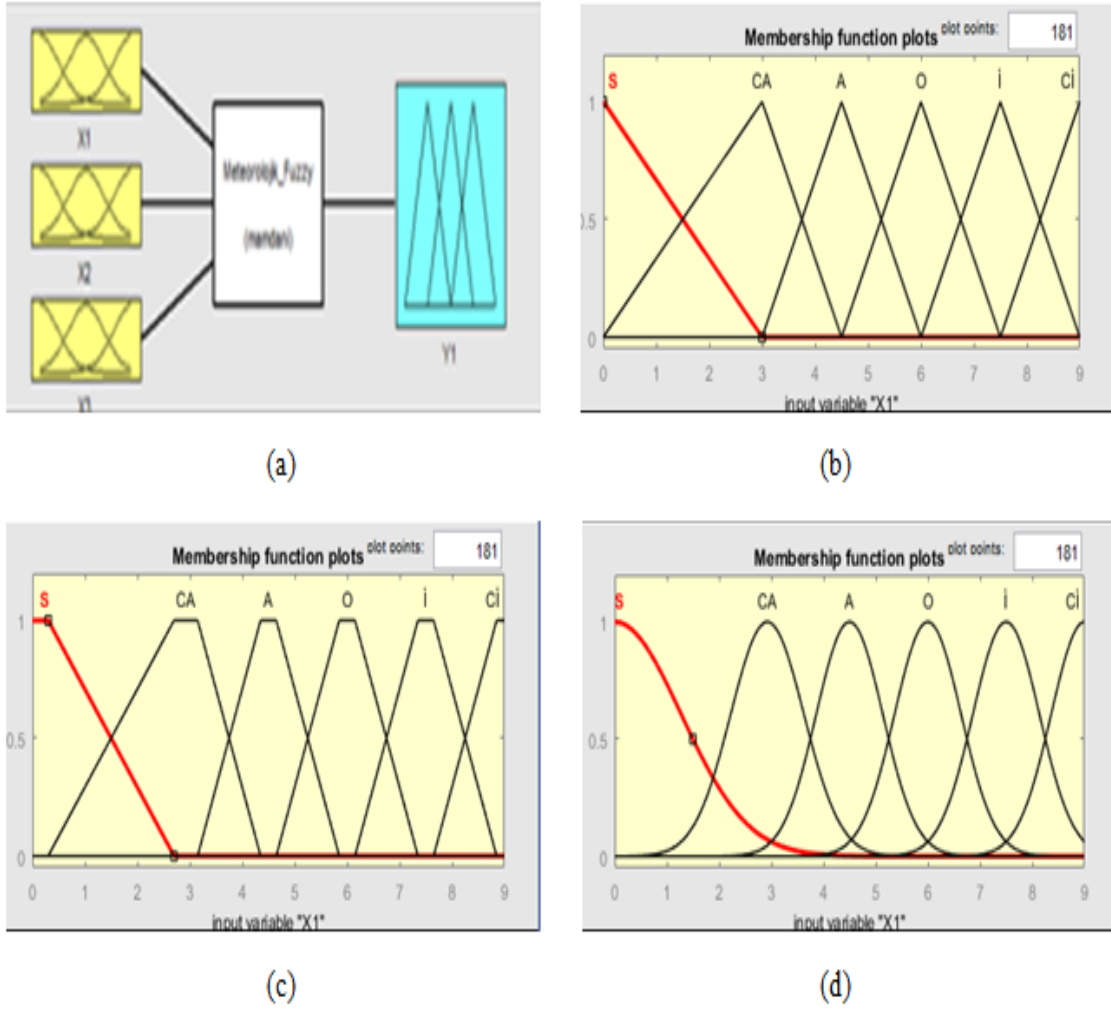


Şekil 2.16. Sistemin Matlab/Simulink modeli



Şekil 2.17. (a) Üçgen üyelik fonksiyonu Simulink modeli (b) BMD'nin simulink blok diyagramı

Çalışmada tasarlanan denetim sisteminde meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği 3 giriş 1 çıkışlı meteorolojik fuzzy bulanık mantık denetleme modeli, ortalama rüzgar hızı X1 giriş değerine ait üçgen, yamuk ve gaussian üyelik fonksiyonları Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



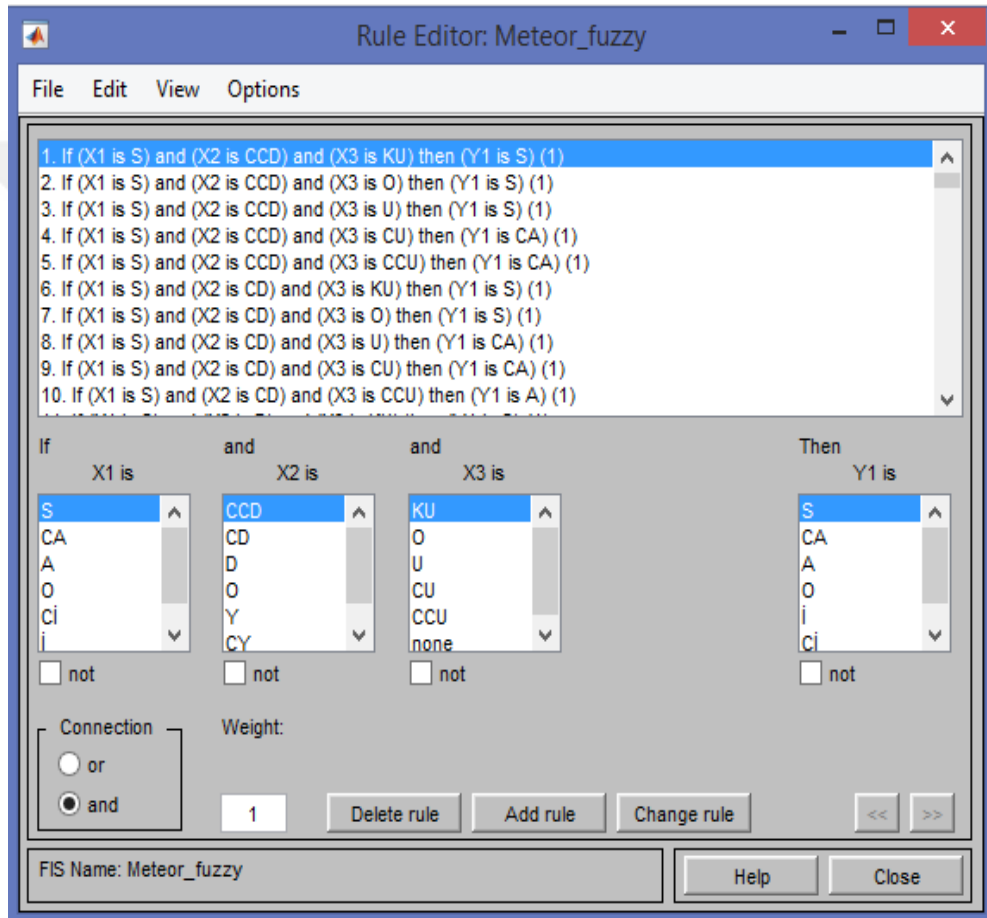
Şekil 2.18. (a) Meteorolojik_fuzzy (b) Ortalama rüzgar hızına ait üçgen üyelik fonksiyonu (c) Ortalama rüzgar hızına ait yamuk üyelik fonksiyonu (d) Ortalama rüzgar hızına ait gaussian üyelik fonksiyonu

Yukarıda üyelik fonksiyonlarının tipleri, üyelik fonksiyonu sayısı ve değer aralıklarının belirlenmesinden sonra sisteme etki eden girişlerin kesin ifadeleri bulanıklaştırma biriminde bulanık değerlere dönüştürülmüştür.

Bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik fonksiyonları Şekil 2.19'da Matlab/Simulinkte hazırladığımız kural tabanında işlendikten sonra bulanık sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık kural tabanındaki kurallar sistemin giriş/ çıkış değerlerini

if then else

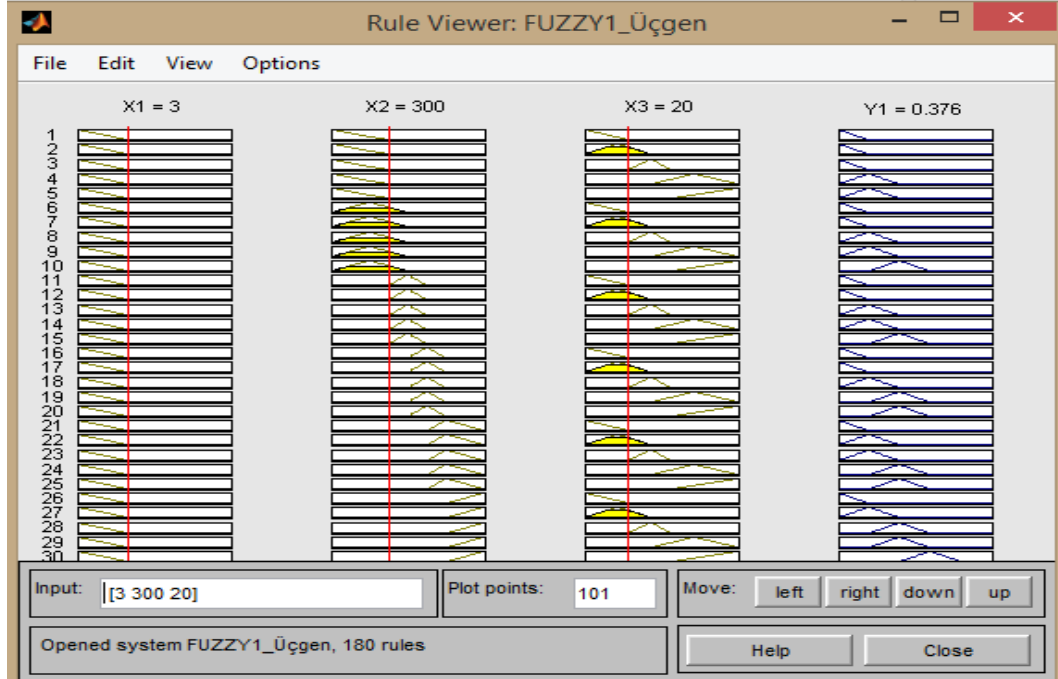
koşul cümlesiyle yorumlar ve işler. Bu işlemin sonucunda elde edilen bulanık sonuçlar durulaştırma birimine gönderilerek gerçek değerlerin elde edilmesi sağlanır.



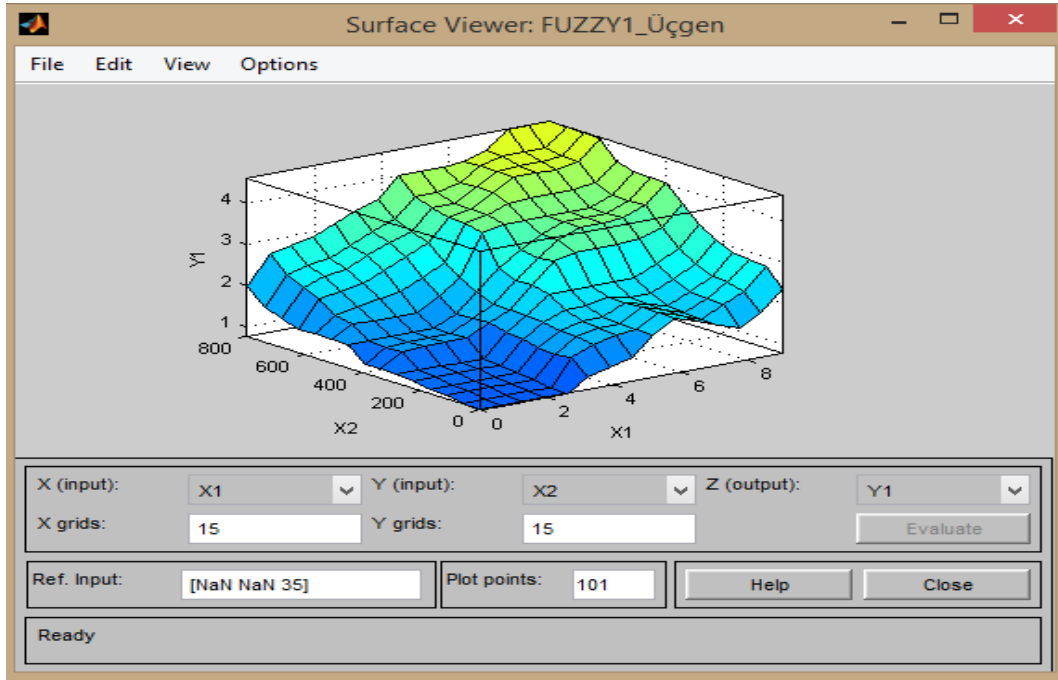
Şekil 2.19. Matlab/ Simulink meteorolojik_fuzzy kural tabanı

Çalışmada, tasarlanan sistemde Şekil 2.19'da 180 kurallı kural tablosu kullanılmış ve üç farklı üyelik fonksiyonunun sisteme etkisi incelenmiştir. Tablo 2.11'de Matlab/Simulink'de oluşturulan meteorolojik_fuzzy sisteminde 27 farklı giriş değeri için üçgen , yamuk , gaussian üyelik fonksiyonlarının sonuçları bulunmuş ve istenilen adım değeri ile karşılaştırılmıştır.

Matlab programında oluşturulan sistemde giriş değeri [3 300 20] için elde edilen üçgen üyelik fonksiyonu sonuçları Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

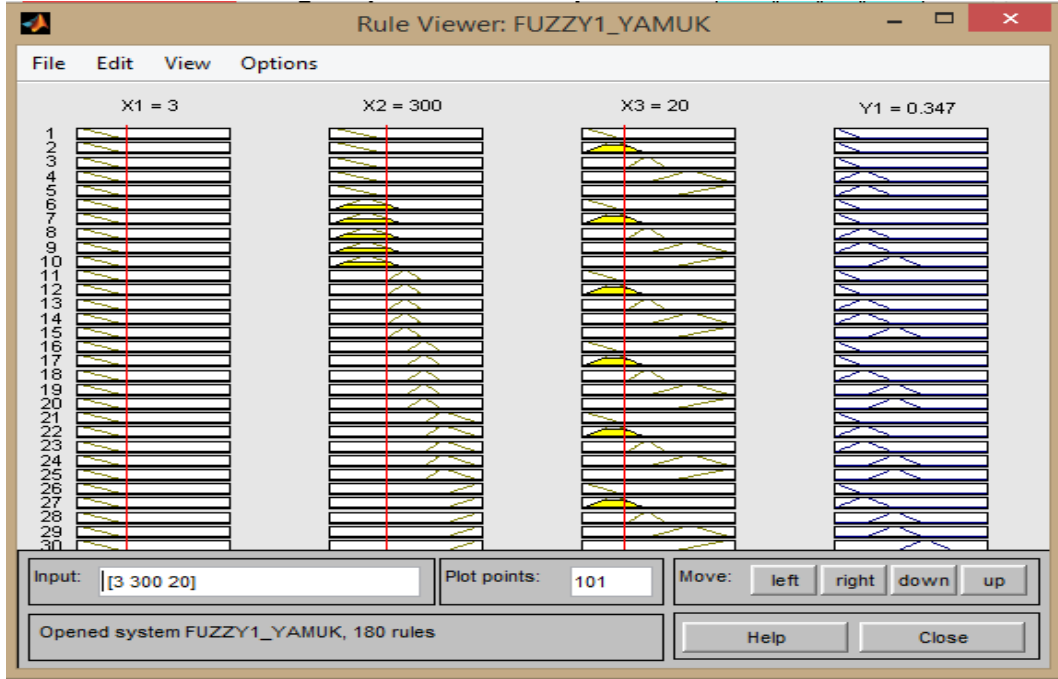


Şekil 2.20. Üçgen üyelik fonksiyonu sonuç değeri

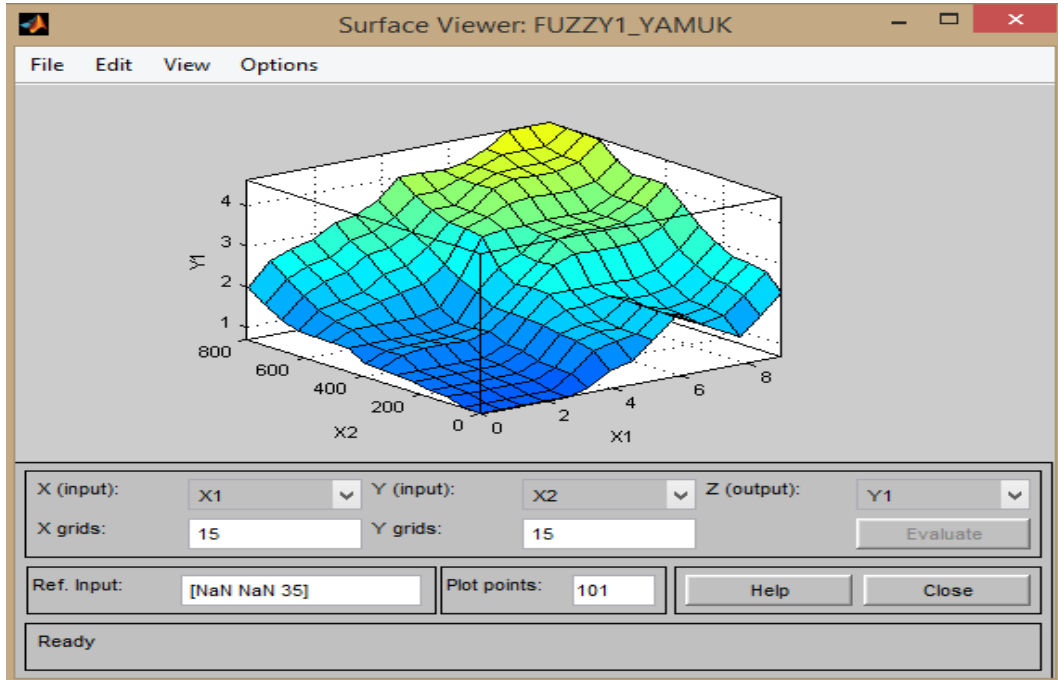


Şekil 2.21. Üçgen üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim

Matlab programında oluşturulan sistemde giriş değeri [3 300 20] için elde edilen yamuk üyelik fonksiyonu sonuçları Şekil 2.22 ve Şekil 2,23'de gösterilmiştir.

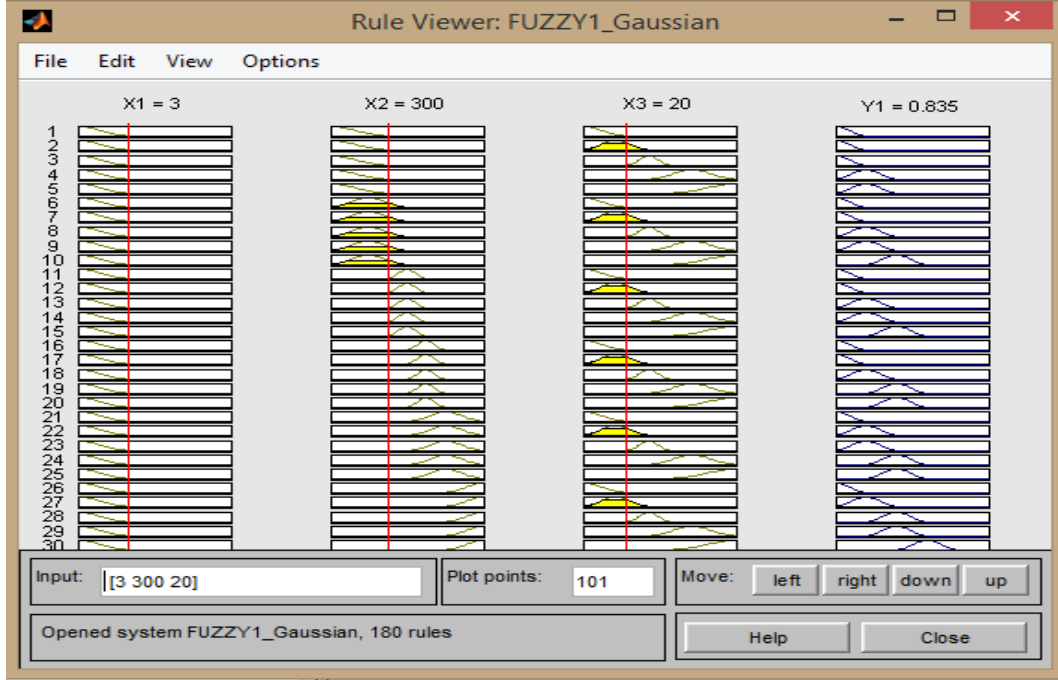


Şekil 2.22. Yamuk üyelik fonksiyonu sonuç değerleri

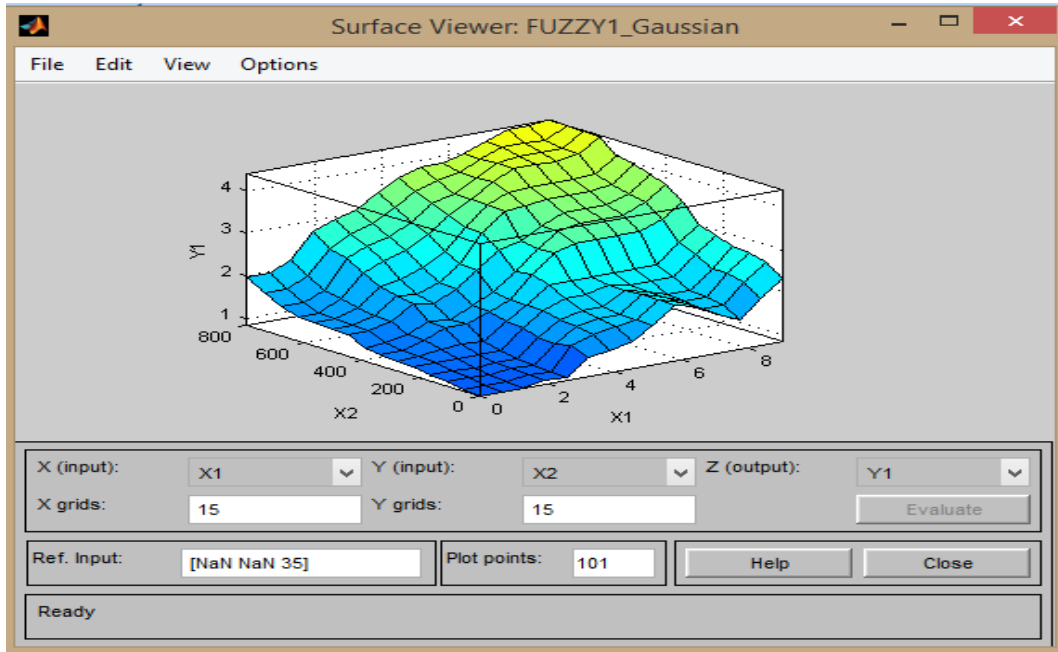


Şekil 2.23. Yamuk üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim

Matlab programında oluşturulan sistemde giriş değeri [3 300 20] için elde edilen Gaussian üyelik fonksiyonu sonuçları Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'de gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Gaussian üyelik fonksiyonu sonuç değerleri

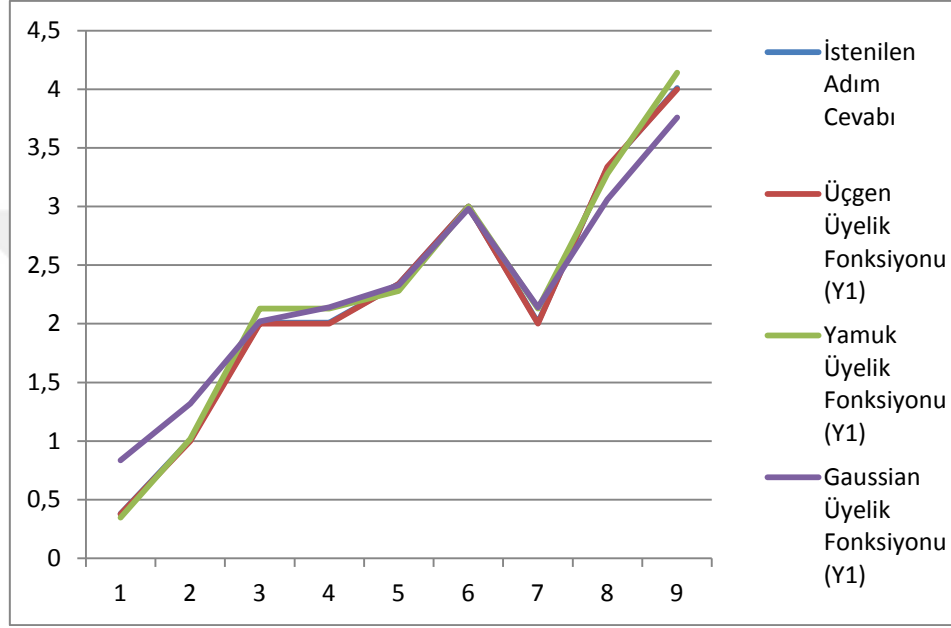


Şekil 2.25. Gaussian üyelik fonksiyonu grafiksel gösterim

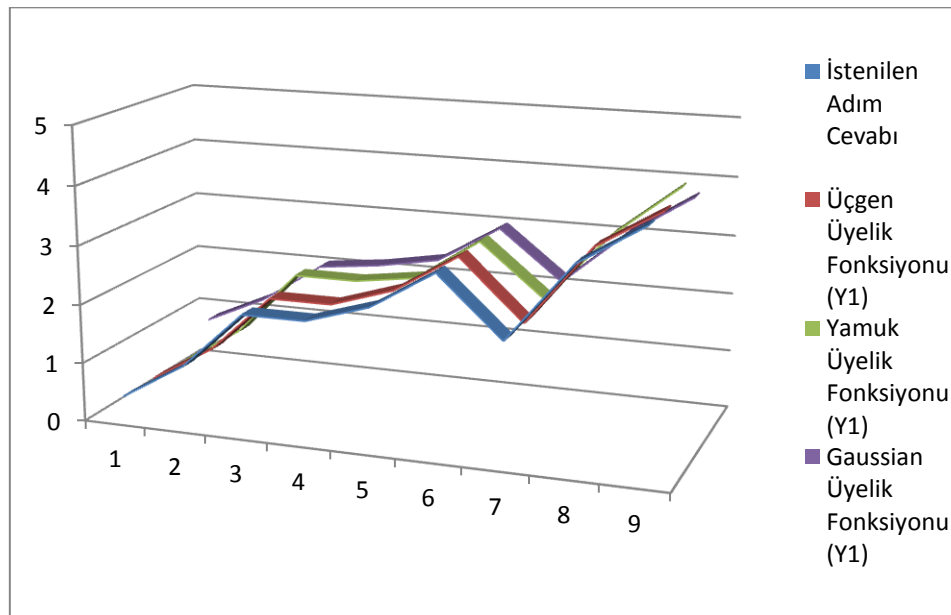
Tablo 2.11. Farklı giriş değerine göre üyelik fonksiyonlarının ürettiği sonuçlar

Meteorolojik Değerler			Üçgen Üyelik Fonksiyonu	Yamuk Üyelik Fonksiyonu	Gauss Üyelik Fonksiyonu
Ortalama Rüzgar Hızı m/Sn (X1)	Ortalama Güç Yoğunluğu w/m2 (X2)	Kapasite Faktörü % (X3)	Meteoroloji Fuzzy (Y1)	Meteoroloji Fuzzy (Y1)	Meteoroloji Fuzzy (Y1)
3	300	20	0,376	0,347	0,835
3	300	35	1	1,02	1,32
3	300	70	2	2,13	2,02
3	600	20	2	2,13	2,14
3	600	35	2,34	2,28	2,33
3	600	70	3	3	2,98
3	800	20	2	2,13	2,14
3	800	35	3,34	3,28	3,06
3	800	70	4	4,14	3,76
6	300	20	1	1,02	1,32
6	300	35	2,34	2,28	2,33
6	300	70	3	3	2,98
6	600	20	2	2,13	2,23
6	600	35	4	4,14	3,83
6	600	70	4,68	4,71	4,34
6	800	20	3	3	2,98
6	800	35	4	4,14	3,85
6	800	70	4,68	4,71	4,54
9	300	20	3	3	2,83
9	300	35	3,34	3,28	3,04
9	300	70	4	4,14	3,68
9	600	20	4	4,14	3,74
9	600	35	4,62	4,65	4,18
9	600	70	4,68	4,71	4,54
9	800	20	4,65	4,68	4,05
9	800	35	4,68	4,65	4,41
9	800	70	4,68	4,71	4,68

Tez çalışmasının bu bölümünde, rüzgar enerji türbinlerinin kurulum parametrelerinin belirlenmesi ve ölçeklendirmesi uygulamasının meteorolojik bölümünün benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyici içerisinde üçgen, yamuk, gaussian üyelik fonksiyonları kullanılarak sistemin çıkışı incelenmiş ve üyelik fonksiyonlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Sonuçlar istenilen adım cevabı ile kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 2.26 ve Şekil 2.27'de gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Simülasyon sonuçları (a)



Şekil 2.27. Simülasyon sonuçları (b)

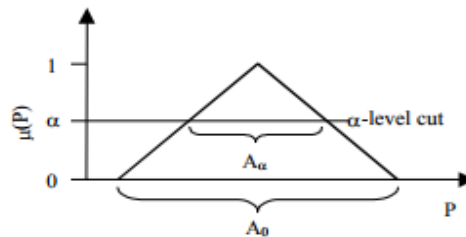
Benzetim sonuçları incelendiğinde , sonuçlar arasında çok büyük farklılıklar olmayıp, üçgen-trapezoid üyelik fonksiyon tipindeki üyelik fonksiyonunun aranılan adım cevabı kriterlerine daha yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Sonuç rüzgar enerji türbinlerinin kurulum modeli için simülasyonda üçgen biçimli üyelik fonksiyonu en iyi sonuçları vermektedir.

2.2.4. α -Kesme Tekniği ile Üyelik Fonksiyonu Değer Aralıklarını Tanımlama

Ölçüm istasyonlarından elde edilen rüzgar hız ve yön verileri ile bu veriler aracılığıyla hesaplanan güç yoğunluğu ve kapasite faktörü değerleri incelendiğinde, belirlenen üyelik fonksiyonu aralıklarının altında ve üstünde ciddi yığılmalar olduğu görülmüştür. Üyelik fonksiyonu değer aralıkları belirlenirken bu değer aralıklarına yakın değerlerin istatistiksel açıdan bir anlam farklılığı taşımadığı düşünülmektedir. Bu nedenle bu birikimleri de dikkate alarak tasarlanan sistem için en doğru değerleri belirlememizi sağlayacak esnek bir değer aralığı hesaplanmak istenmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde, rüzgar enerji türbinlerinin kurulumunda giriş birimi olarak kullanılması planlanan meteorolojik parametreler için bulanık α - kesme tekniği ile üyelik fonksiyonlarının evrensel küme üzerinde esnek değer aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, tasarlanan meteorolojik_fuzzy sistemi için ilk olarak ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu ve kapasite faktörü üyelik fonksiyonlarının değer aralıklarını belirlemede farklı α kesim katsayıları için normal değerlerinin komşulukları daha sonra belirlenen adım değerlerine göre düzeltilmiş komşuluk değerleri hesaplanmıştır.

Bulanık alfa kesme (FAC) tekniği, bulanık küme teorisinde parametredeki belirsizliği veya yanlışlığı tanımlamak için kullanılır. Pratikte modelleme uygulamaları, kısmi diferansiyel denklemleri ve ilkenin analitik uygulanmasını zorlaştıran diğer karmaşık yapıları içerir .Bu nedenle, aralıklarla aritmetik analiz yapmak için kullanılır [108].



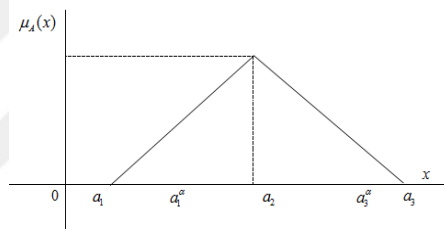
Şekil 2.28. Bulanık sayı desteği ve kesimi

Üyelik fonksiyonu Şekil 2.28'deki gibi 0 ile 1 arasındaki sınırlı sayıda α seviyesinden yatay olarak kesilir. Model, parametrenin her bir seviye için çıkışın minimum ve maksimum olası değerlerini belirlemek için çalıştırılır. Bu bilgiler, belirsizlik ölçüsü olarak kullanılan çıktılara karşılık gelen bulanıklığını oluşturmak için kullanılır.

Tanım 1: $\mu_A(x)$ üçgensel üyelik fonksiyonu için kullanılan bağıntı denklem 2.11'de verilmektedir.

$$A_{\Delta} = \max \left(\min \left(\frac{x-x_1}{x_T-x_1}, \frac{x_2-x}{x_2-x_T} \right), 0 \right) \quad (2.11)$$

Tanım 2: Denklem 2.11'e göre küme, $A = (a_1, a_2, a_3)$ olmalıdır. a_2 normal değerindeki belirsizlikler ve tanımsızlıklar α katsayısı ile tanımlanır ve tölere edilebilir. Şekil 2.29' da bahsedilen komşuluk gösterilmektedir.



Şekil 2.29. Sayıların Komşuluğu

Tanım 3: α parametresi bulanık mantık kesme katsayısıdır. a_1^{α} ve a_3^{α} parametreleri a_2 normal değerinin alt ve üst sınır komşuluğudur. Burada a_1^{α} ve a_3^{α} aralığındaki tüm değerler a_2 normal değeri ile aynı anlama sahiptir. a_1^{α} ve a_3^{α} değerleri denklem 2.12 ve denklem 2.13 yardımıyla bulunabilir.

$$\frac{a_1^{\alpha} - a_1}{a_2 - a_1} = \alpha \quad (2.12)$$

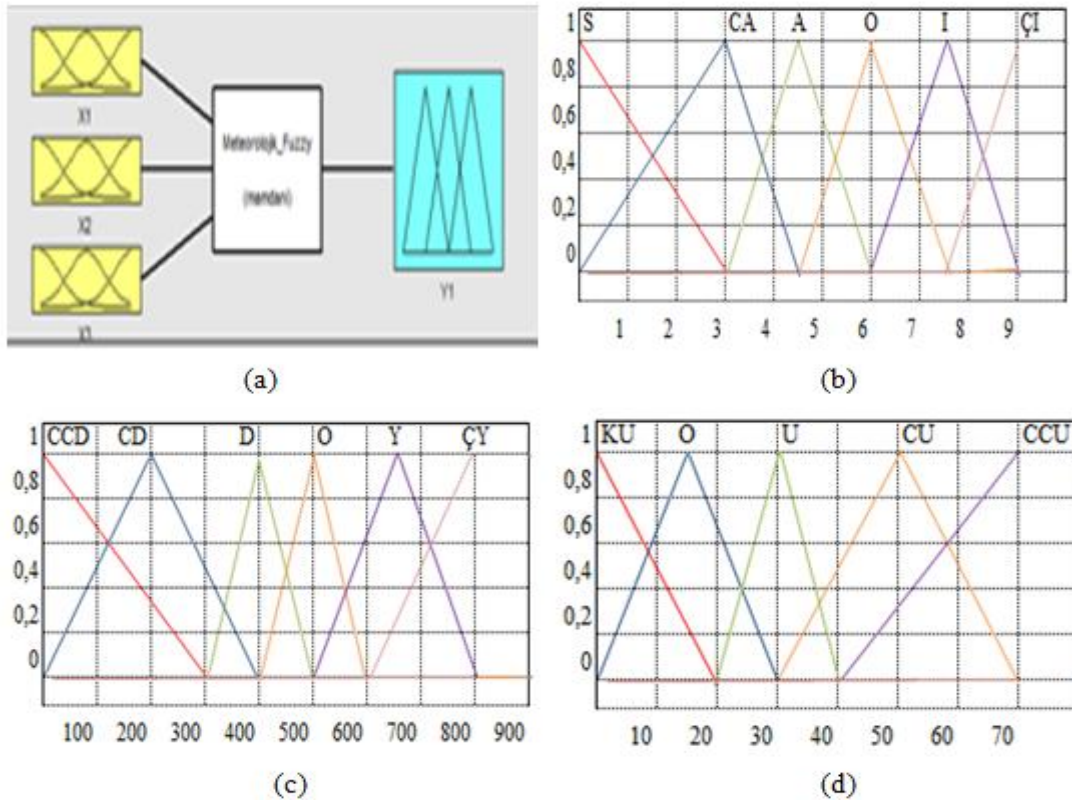
$$\frac{a_3 - a_3^{\alpha}}{a_3 - a_2} = \alpha \quad (2.13)$$

Tanım 4: Denklem 2.12 ve denklem 2.13'den $\forall \alpha \in [0,1]$ için $A_\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$ aralık değeri oluşturulabilir. a_1^α ve a_3^α değerleri denklem 2.14 ve denklem 2.15'de gösterilmiştir.

$$a_1^\alpha = \alpha(a_2 - a_1) + a_1 \quad (2.14)$$

$$a_3^\alpha = a_3 - (a_3 - a_2)\alpha \quad (2.15)$$

Çalışmada Matlab programında tasarlanan meteorolojik_fuzzy sisteminde, ortalama rüzgar hızı X1, ortalama güç yoğunluğu X2 ve kapasite faktörü X3 giriş değerlerine karşın Y1 çıkış değeri üretmektedir. Meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği meteorolojik_fuzzy bulanık mantık modeli ve α - kesme tekniği uygulanacak ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu ve kapasite faktörü ait üyelik fonksiyonları Şekil 2.30'da verilmiştir.



Şekil 2.30. (a) Meteorolojik fuzzy (b) α - kesme tekniği uygulanacak rüzgar hızı üyelik fonksiyonu (c) α - kesme tekniği uygulanacak güç yoğunluğu üyelik fonksiyonu (d) α - kesme tekniği uygulanacak kapasite faktörü üyelik fonksiyonu

Çalışmada ortalama rüzgar hızı seçim aralıklarından biri için yapılan örnek matematiksel hesaplamada 3 normal değer seçilmiş ve (0,3,4,5) bulanık kümesinde aşağıdaki üçgensel üyelik fonksiyonunu oluşturulmuştur.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x-0}{3-0}, & 0 \leq x \leq 3 \\ \frac{4,5-x}{4,5-3}, & 3 \leq x \leq 4,5 \\ 0, & x > 4,5 \end{cases} \quad (2.16)$$

Bu fonksiyonda $a_1 = 0$, $a_2 = 3$ ve $a_3 = 4,5$ olarak tanımlanmıştır ve tanımlanan bu üç değer için komşuluklar aşağıdaki denklemler aracılığı ile bulunmuştur.

$$a_1^\alpha = 3\alpha \quad (2.17)$$

$$a_3^\alpha = 4,5 - 1,5\alpha \quad (2.18)$$

Farklı α kesim katsayıları için ortalama rüzgar hızı üyelik fonksiyonunun aralıklarının normal değerlerinin komşulukları denklem 2.17 ve denklem 2.18 formülleri yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamada değişik α kesim katsayıları için elde edilen komşuluklar ve adım değeri 0,025 olması durumuna göre düzeltilmiş komşuluklar Tablo 2.12'de gösterilmiştir.

Tablo 2.12. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan ortalama rüzgar hızı üyelik fonksiyonu aralıkları

α Katsayısı	Normal Değerlerin Komşuluğu						Düzeltilmiş Aralık					
	0	3	4,5	6	7,5	9	0	3	4,5	6	7,5	9
0,98	0 - 0,06	2,99 - 3,03	4,47 - 4,53	5,97 - 6,03	7,47 - 7,53	8,97 - 9,03	0 - 0,05	2,975 - 3,025	4,50 - 4,575	6 - 6,075	7,425 - 7,575	9,025 - 9,075
0,97	0 - 0,09	2,99 - 3,04	4,45 - 4,54	5,95 - 6,04	7,45 - 7,54	8,95 - 9,04	0 - 0,075	2,975 - 3,05	4,50 - 4,575	5,975 - 6,075	7,425 - 7,575	9,025 - 9,075
0,95	0 - 0,15	2,97 - 3,07	4,42 - 4,57	5,92 - 6,07	7,42 - 7,57	8,92 - 9,07	0 - 0,15	2,95 - 3,075	4,475 - 4,60	5,95 - 6,10	7,375 - 7,60	9,00 - 9,10
0,93	0 - 0,21	2,97 - 3,10	4,39 - 4,60	5,89 - 6,10	7,39 - 7,60	8,89 - 9,10	0 - 0,225	2,95 - 3,075	4,475 - 4,65	5,95 - 6,125	7,35 - 7,625	8,975 - 9,125
0,91	0 - 0,27	2,97 - 3,13	4,36 - 4,63	5,86 - 6,13	7,36 - 7,63	8,86 - 9,13	0 - 0,25	2,95 - 3,10	4,475 - 4,65	5,925 - 6,15	7,325 - 7,65	8,95 - 9,15
0,89	0 - 0,33	2,96 - 3,16	4,33 - 4,66	5,83 - 6,16	7,33 - 7,66	8,83 - 9,16	0 - 0,325	2,925 - 3,125	4,45 - 4,675	5,925 - 6,20	7,325 - 7,65	8,925 - 9,175
0,87	0 - 0,39	2,96 - 3,19	4,30 - 4,69	5,80 - 6,19	7,30 - 7,69	8,80 - 9,19	0 - 0,40	2,925 - 3,125	4,425 - 4,70	5,90 - 6,225	7,275 - 7,675	8,925 - 9,20
0,85	0 - 0,45	2,95 - 3,22	4,27 - 4,72	5,77 - 6,22	7,27 - 7,72	8,77 - 9,22	0 - 0,475	2,90 - 3,15	4,40 - 4,70	5,825 - 6,325	7,25 - 7,75	8,875 - 9,275
0,82	0 - 0,54	2,94 - 3,27	4,23 - 4,77	5,73 - 6,27	7,23 - 7,77	8,73 - 9,27	0 - 0,575	2,90 - 3,175	4,35 - 4,80	5,80 - 6,375	7,25 - 7,80	8,90 - 9,30
0,79	0 - 0,63	2,93 - 3,31	4,18 - 4,81	5,68 - 6,31	7,18 - 7,81	8,68 - 9,31	0 - 0,625	2,875 - 3,20	4,275 - 4,85	5,725 - 6,45	7,225 - 7,875	8,925 - 9,325

Farklı α kesim katsayıları için ortalama güç yoğunluğu üyelik fonksiyonunun aralıklarının normal değerlerinin komşulukları denklem 2.17 ve denklem 2.18 formülleri yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamada değişik α kesim katsayıları için elde edilen komşuluklar ve adım değeri 1,25 olması durumuna göre düzeltilmiş komşuluklar Tablo 2.13'de gösterilmiştir.

Tablo 2.13. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan güç yoğunluğu üyelik fonksiyonu aralıkları

α Katsayısı	Normal Değerlerin Komşuluğu							Düzeltilmiş Aralık						
	0	200	400	500	600	700	800	0	200	400	500	600	700	800
0,98	0 - 0,6	199,6 - 200,4	399,8 - 400,2	499,8 - 500,2	599,8 - 600,2	699,8 - 700,2	799,8 - 800,2	0 - 1,25	198,75 - 201,25	398,75 - 401,25	497,5 - 502,5	597,5 - 602,5	697,5 - 702,5	797,5 - 802,5
0,97	0 - 0,9	199,4 - 200,6	399,7 - 400,3	499,7 - 500,3	599,7 - 600,3	699,7 - 700,3	799,7 - 800,3	0 - 1,25	198,75 - 201,25	398,75 - 401,25	497,5 - 502,5	597,5 - 602,5	697,5 - 702,5	797,5 - 802,5
0,95	0 - 1,5	199 - 201	399,5 - 400,5	499,5 - 500,5	599,5 - 600,5	699,5 - 700,5	799,5 - 800,5	0 - 2,5	197,5 - 202,5	397,5 - 402,5	496,25 - 503,75	596,25 - 603,75	696,25 - 703,75	796,25 - 803,75
0,93	0 - 2,1	198,6 - 201,4	399,3 - 400,7	499,3 - 500,7	599,3 - 600,7	699,3 - 700,7	799,3 - 800,7	0 - 2,5	197,5 - 202,5	396,25 - 403,75	495 - 505	595 - 605	695 - 705	795 - 805
0,91	0 - 2,7	198,2 - 201,8	399,1 - 400,9	499,1 - 500,9	599,1 - 600,9	699,1 - 700,9	799,1 - 800,9	0 - 3,75	196,5 - 203,75	396,25 - 403,75	495 - 506,25	593,75 - 606,25	693,75 - 706,25	793,75 - 806,25
0,89	0 - 3,3	197,8 - 202,2	398,9 - 401,1	498,9 - 501,1	598,9 - 601,1	698,9 - 701,1	798,9 - 801,1	0 - 3,75	196,5 - 203,75	395 - 405	493,75 - 506,25	592,5 - 606,25	692,5 - 706,25	792,5 - 806,25
0,87	0 - 3,9	197,4 - 202,6	398,7 - 401,3	498,7 - 501,3	598,7 - 601,3	698,7 - 701,3	798,7 - 801,3	0 - 5,0	195 - 203,75	393,75 - 406,25	493,75 - 507,5	590 - 607,5	691,25 - 707,5	791,25 - 807,5
0,85	0 - 4,5	197 - 203	398,5 - 401,5	498,5 - 501,5	598,5 - 601,5	698,5 - 701,5	798,5 - 801,5	0 - 5,0	193,75 - 205	393,75 - 406,25	492,5 - 507,5	588,75 - 608,75	690 - 708,75	790 - 808,75
0,82	0 - 5,4	196,4 - 203,6	398,2 - 401,8	498,2 - 501,8	598,2 - 601,8	698,2 - 701,8	798,2 - 801,8	0 - 6,25	192,5 - 206,25	392,5 - 408,75	488,75 - 508,75	586,25 - 610	687,5 - 710	787,5 - 810
0,79	0 - 6,3	195,8 - 204,2	397,9 - 402,1	497,9 - 502,1	597,9 - 602,1	697,9 - 702,1	797,9 - 802,1	0 - 7,5	191,25 - 207,5	391,25 - 410	487,5 - 511,25	583,75 - 611,25	686,25 - 711,25	786,25 - 811,25

Farklı α kesim katsayıları için kapasite faktörü üyelik fonksiyonunun aralıklarının normal değerlerinin komşulukları denklem 2.17 ve denklem 2.18 formülleri yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamada değişik α kesim katsayıları için elde edilen komşuluklar ve adım değeri 0,25 olması durumuna göre düzeltilmiş komşuluklar Tablo 2.14'de gösterilmiştir.

Tablo 2.14. Farklı α kesim katsayıları için hesaplanan kapasite faktörü üyelik fonksiyonu aralıkları

α Katsayısı	Normal Değerlerin Komşuluğu					Düzeltilmiş Aralık				
	0	15	30	45	60	0	15	30	45	60
0,98	0 - 0,04	14,99 - 15,03	29,98 - 30,02	44,97 - 45,03	59,96 - 60,04	0 - 0,25	14,5 - 15,5	29,5 - 30,5	44,5 - 45,5	59,5 - 60,5
0,97	0 - 0,06	14,98 - 15,04	29,97 - 30,03	44,95 - 45,04	59,94 - 60,06	0 - 0,25	14,5 - 15,5	29,5 - 30,5	44,5 - 45,5	59,5 - 60,5
0,95	0 - 0,1	14,97 - 15,07	29,95 - 30,05	44,92 - 45,07	59,90 - 60,1	0 - 0,50	14,25 - 15,75	29,25 - 30,75	44,25 - 45,75	59,25 - 60,75
0,93	0 - 0,14	14,96 - 15,10	29,93 - 30,07	44,89 - 45,10	59,86 - 60,14	0 - 0,50	14 - 15,75	29 - 30,75	44 - 45,75	59 - 60,75
0,91	0 - 0,18	14,95 - 15,13	29,91 - 30,09	44,86 - 45,13	59,82 - 60,18	0 - 0,50	13,75 - 16,25	28,75 - 31,25	43,75 - 46,25	58,75 - 61,25
0,89	0 - 0,22	14,94 - 15,16	29,89 - 30,11	44,83 - 45,16	59,78 - 60,22	0 - 0,50	13,5 - 16,5	28,5 - 31,5	43,5 - 46,5	58,5 - 61,5
0,87	0 - 0,26	14,93 - 15,19	29,87 - 30,13	44,80 - 45,19	59,74 - 60,26	0 - 0,75	13,25 - 16,75	28,25 - 31,75	43,25 - 46,75	58,25 - 61,75
0,85	0 - 0,3	14,92 - 15,22	29,85 - 30,15	44,77 - 45,22	59,70 - 60,30	0 - 1,0	13 - 17	28 - 32	43 - 47	58 - 62
0,82	0 - 0,36	14,91 - 15,27	29,82 - 30,18	44,73 - 45,27	59,64 - 60,36	0 - 1,5	12,75 - 17,25	27,75 - 32,25	42,75 - 47,25	57,75 - 62,25
0,79	0 - 0,42	14,89 - 15,31	29,79 - 30,21	44,68 - 45,31	59,58 - 60,42	0 - 2,0	12,25 - 17,75	27,25 - 32,75	42,25 - 46,75	57,25 - 62,75

Çalışmada, farklı α kesim katsayıları için normal değer komşulukları ve belirlenen adım değerleri için düzeltilmiş komşuluklar hesaplanmıştır. Hesaplanan bu tablolardan yararlanılarak tasarlanan meteorolojik_fuzzy sistemindeki giriş parametreleri için hazırlanan üyelik fonksiyonları değer aralıkları çevresindeki birikimlerin niteliğine göre α kesme katsayısını seçilebileceği ve böylelikle bu birikimleri de dikkate alarak tasarlanan sistem için en doğru değerleri belirlememizi sağlayacak değer aralıkları hesaplanmıştır.

2.2.5. Bulanık Kural Tabanlarının Hazırlanması

Bulanık kural, IF-THEN formu bir dizisiyle temsil edilir, hangi eylemin veya çıkışın alınacağını açıklayan algoritmalara yol açar. Fuzzy IF-THEN kuralı, dilbilim kullanılarak açıklanan durumu ilişkilendirir değişkenler ve bulanık sonuçlar çıktıya veya sonuca ayarlanır. IF bölümü esas olarak elastik koşulları kullanarak bilgiyi yakalamak için kullanılır, THEN kısmı, dilsel değişken formda sonuç veya çıktı vermek için kullanılabilir. Bu IF-THEN kuralı, giriş verilerinin bir kuralın koşullarıyla eşleşme derecesini hesaplamak için bulanık çıkarım sistemi tarafından yaygın olarak kullanılır.

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan literatür çalışması ve uzman görüşü ile hazırlanmış ve her biri 180 kuraldan oluşan 3 kural tabanı hazırlanmıştır. Bundan sonraki aşamada insan temelli hataları tölere etmek için hazırlanan kural tabanlarının optimizasyonu yapılacaktır.

Yapılan çalışmada, bölüm 2.2.1.2 kısmında hazırladığımız üyelik fonksiyonları sonucu elde ettiğimiz bulanık değerler literatür taraması ve uzman görüşü alınarak hazırladığımız kural tabanında

if then else

koşul cümlesiyle işlenmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen bulanık sonuçlar karar verme aşamasında kullanacağımız kesin sonuçlar elde etmek için durulaştırma birimine gönderilecektir. Meteorolojik_fuzzy kural tabanında kurallar *if ... then ... else* koşul cümlesiyle aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Kural 1 *if(X1 is S_{X1}) and (X2 is CCD_{X2}) and (X3 is KÜ_{X3}) then (Y1 is S_{Y1}) else*

Kural 2 *if(X1 is S_{X1}) and (X2 is CCD_{X2}) and (X3 is O_{X3}) then (Y1 is S_{Y1}) else*

Kural 3 *if(X1 is S_{X1}) and (X2 is CCD_{X2}) and (X3 is U_{X3}) then (Y1 is S_{Y1}) else*

Kural 4 *if(X1 is S_{X1}) and (X2 is CCD_{X2}) and (X3 is CU_{X3}) then (Y1 is CA_{Y1}) else*

Kural 5 *if(X1 is S_{X1}) and (X2 is CCD_{X2}) and (X3 is CCU_{X3}) then (Y1 is CA_{Y1}) else*

· · · · ·

Kural 176 *if(X1 is CI_{X1}) and (X2 is CY_{X2}) and (X3 is O_{X3}) then (Y1 is I_{Y1}) else*

Kural 177 *if(X1 is CI_{X1}) and (X2 is CY_{X2}) and (X3 is U_{X3}) then (Y1 is CI_{Y1}) else*

Kural 178 *if(X1 is CI_{X1}) and (X2 is CY_{X2}) and (X3 is CU_{X3}) then (Y1 is CI_{Y1}) else*

Kural 179 *if(X1 is CI_{X1}) and (X2 is CY_{X2}) and (X3 is CCU_{X3}) then (Y1 is CI_{Y1}) else*

Kural 180 *if(X1 is CI_{X1}) and (X2 is CY_{X2}) and (X3 is CCU_{X3}) then (Y1 is CI_{Y1}) else*

Kurallarda yer alan S, CCD,CD, KU, O, U, CU ve CCU ifadeleri bulanık dilsel değişkenleri, X1, X2, X3 ve Y1 ifadeleri ise bulanık dilsel değişkenlerin tanımlandığı uzay kümelerini göstermektedir. Kural tabanında hazırlanan kurallara bakıldığında , aslında if Ax **and** By **then** Cz formatında olduğu anlaşıyor. Bu koşul cümlesi formatından yararlanarak kurallarımızı aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

Kural 1 *if S_{X1} and CCD_{X2} and KÜ_{X3} then S_{Y1} else*

Kural 2 *if S_{X1} and CCD_{X2} and O_{X3} then S_{Y1} else*

Kural 3 *if S_{X1} and CCD_{X2} and U_{X3} then S_{Y1} else*

Kural 4 *if S_{X1} and CCD_{X2} and CU_{X3} then CA_{Y1} else*

Kural 5 *if S_{X1} and CCD_{X2} and CCU_{X3} then CA_{Y1} else*

· · · · ·

Kural 176 *if CI_{X1} and CY_{X2} and KU_{X3} then I_{Y1} else*

Kural 177 *if CI_{X1} and CY_{X2} and O_{X3} then CI_{Y1} else*

Kural 178 *if CI_{X1} and CY_{X2} and U_{X3} then CI_{Y1} else*

Kural 179 *if CI_{X1} and CY_{X2} and CU_{X3} then CI_{Y1} else*

Kural 180 *if CI_{X1} and CY_{X2} and CCU_{X3} then CI_{Y1} else*

Kural tabanında kullanılan and ifadesi and bağlacı anlamında kullanılmıştır, bulanık kümelerdeki karşılığı kesişim işlemidir. Hazırlanan bulanık küme üyelik fonksiyonları baz alındığında and bağlacı aslında minimum alma işlemidir. Hazırlanan kural tabanındaki her bir kuralın min alma işlemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\text{Kural 1 } \min[\mu_S(X1), \mu_{CCD}(X2), \mu_{K\ddot{U}}(X3)] = \mu_S(Y1)$$

$$\text{Kural 2 } \min[\mu_S(X1), \mu_{CCD}(X2), \mu_O(X3)] = \mu_S(Y1)$$

$$\text{Kural 3 } \min[\mu_S(X1), \mu_{CCD}(X2), \mu_U(X3)] = \mu_S(Y1)$$

$$\text{Kural 4 } \min[\mu_S(X1), \mu_{CCD}(X2), \mu_{CU}(X3)] = \mu_{CA}(Y1)$$

$$\text{Kural 5 } \min[\mu_S(X1), \mu_{CCD}(X2), \mu_{CCU}(X3)] = \mu_{CA}(Y1)$$

$$\begin{array}{cccccccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$\text{Kural 176 } \min[\mu_{CI}(X1), \mu_{CY}(X2), \mu_{KU}(X3)] = \mu_I(Y1)$$

$$\text{Kural 177 } \min[\mu_{CI}(X1), \mu_{CY}(X2), \mu_O(X3)] = \mu_{CI}(Y1)$$

$$\text{Kural 178 } \min[\mu_{CI}(X1), \mu_{CY}(X2), \mu_U(X3)] = \mu_{CI}(Y1)$$

$$\text{Kural 179 } \min[\mu_{CI}(X1), \mu_{CY}(X2), \mu_{CU}(X3)] = \mu_{CI}(Y1)$$

$$\text{Kural 180 } \min[\mu_{CI}(X1), \mu_{CY}(X2), \mu_{CCU}(X3)] = \mu_{CI}(Y1)$$

Yukarıdaki gibi ifade edilen kuralları denklem 2.19 'daki gibi formüle edilip yazılabilir.

$$\mu(Y1) = \min[\mu(X1), \mu(X2), \mu(X3)] \quad (2.19)$$

Bu ifade aslında X_1, X_2, X_3 ve Y_1 uzay kümelerindeki bağıntıyı gösterir ve kartezyen çarpımı denklem 2.20'deki gibi yazılır.

$$Y1 = X1 \times X2 \times X3 \quad (2.20)$$

Tablo 2.15'de meteorolojik_fuzzy kural tabanında ortalama rüzgar hız X1, ortalama güç yoğunluğu X2 ve kapasite faktörü X3 giriş değerlerine karşın üretilen Y1 çıkış değeri için hazırlanan kural tabanı verilmiştir.

Tablo 2.15. Meteorolojik_fuzzy kural tabanı

X3	X1																																				
	S						CA						A						O						i						ci						
	X2						X2						X2						X2						X2						X2						
	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	
KÜ	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	CA	CA	S	CA	CA	A	A	A	CA	CA	CA	A	A	O	CA	CA	A	A	A	O	A	A	O	i	i	i
O	S	S	S	S	CA	CA	S	S	CA	CA	A	A	CA	CA	CA	A	O	O	CA	CA	A	A	A	O	CA	CA	A	O	O	i	A	O	O	i	i	ci	
U	S	CA	CA	CA	CA	A	S	CA	CA	CA	A	O	CA	A	A	O	O	i	A	A	O	O	i	i	CA	A	O	O	i	ci	A	O	i	i	ci	ci	
CU	CA	CA	CA	A	A	A	CA	CA	A	A	O	i	A	O	O	O	i	i	O	O	i	i	i	i	A	O	i	i	ci	ci	O	i	ci	ci	ci	ci	
CCU	CA	A	A	A	A	O	A	A	O	O	O	i	A	O	O	i	i	ci	O	O	i	i	ci	ci	O	i	i	ci	ci	ci	i	i	ci	ci	ci	ci	

Tablo 2.16'da finansal_fuzzy kural tabanında öz sermaye X4, öngörülemez gider X5 ve kWh maliyeti X6 giriş değerlerine karşın Y2 çıkış değeri için hazırlanan kural tabanı verilmiştir.

Tablo 2.16. Finansal_fuzzy kural tabanı

X6	X4																																			
	S						CA						A						O						İ						Çİ					
	XS						XS						XS						XS						XS						XS					
	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK
çİ	İ	İ	İ	İ	O	O	çİ	İ	İ	İ	O	O	çİ	İ	İ	İ	O	O	çİ	İ	İ	İ	O	O	çİ	çİ	İ	İ	O	O	çİ	çİ	çİ	çİ	İ	O
İ	İ	İ	O	A	A	A	İ	İ	İ	O	O	A	İ	İ	İ	O	O	A	İ	İ	İ	O	O	A	çİ	İ	İ	O	O	O	çİ	çİ	İ	İ	İ	O
O	İ	O	O	A	A	CA	İ	İ	O	O	A	CA	İ	İ	O	O	O	A	İ	İ	O	O	O	A	İ	İ	O	O	O	A	çİ	İ	İ	İ	O	A
K	O	A	A	A	CA	S	O	O	A	A	CA	CA	İ	O	O	A	A	CA	İ	O	O	O	A	CA	İ	O	O	O	A	A	İ	İ	İ	O	O	A
ÇK	O	A	CA	CA	CA	S	O	A	A	A	CA	S	O	A	A	A	CA	S	O	O	A	A	A	CA	O	O	A	A	A	CA	İ	O	O	O	A	CA
ÇÇK	A	A	CA	CA	S	S	A	A	CA	CA	S	S	O	A	A	A	CA	S	O	A	A	A	CA	S	O	O	A	A	CA	S	O	O	O	A	A	CA

Tablo 2.17'de karar_fuzzy kural tabanında meteorolojik_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y1, finans_fuzzy sisteminin çıkış değeri Y2 ve amortisman süresi X7 giriş değerlerine karşın Y3 çıkış değerini için hazırlanan kural tabanı verilmiştir.

Tablo 2.17. Karar_fuzzy kural tabanı

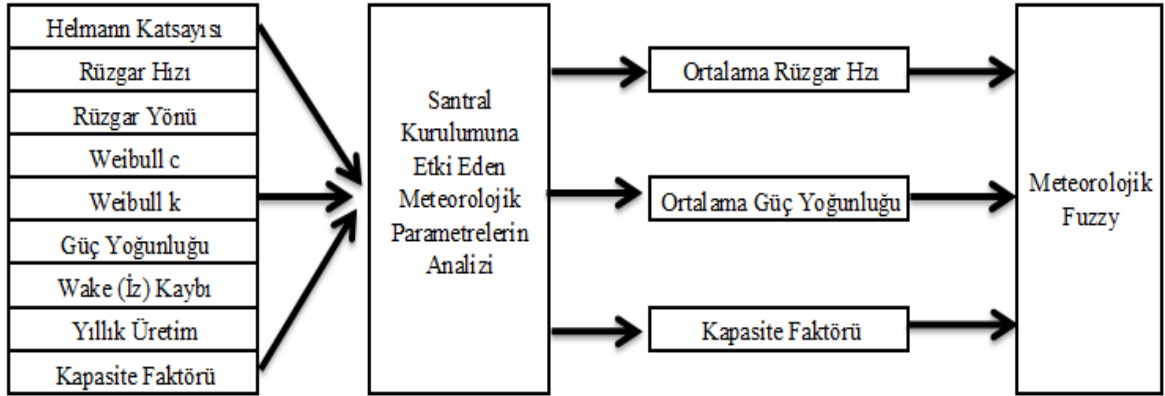
X7	Y1																							
	S				CA				A				O				İ				Çİ			
	Y2				Y2				Y2				Y2				Y2				Y2			
	S	ÇA	A	O	İ	Çİ	S	ÇA	A	O	İ	Çİ	S	ÇA	A	O	İ	Çİ	S	ÇA	A	O	İ	Çİ
Çİ	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CD	D	D	CD	CD	D	D	O	O
İ	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CD	D	CD	CD	CD	D	D	O	D
O	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CD	CD	D	D	CD
K	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CD	CD	CD	CD
ÇK	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD
ÇÇK	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD

2.2.6. Bulanık Çıkarım Sistemi

2.2.6.1. Bulanık Tabanlı Karar Sisteminin Tasarlanması

Rüzgar santrali kurulumu meteoroloji, jeoloji, makine, elektrik, bilgisayar gibi birden fazla disiplinin birleşmesinden oluşmaktadır. Bu nedenle yatırımcılar ve karar vericiler birbirinden farklı bir çok parametreyi bir arada değerlendirmek hatta bir biriyle hiç benzeşmeyen rüzgar hızı ve faiz oranı gibi bir çok parametreyi bir potada eritmek zorundadır. Yapılan çalışma aslında bu parametreleri bulanık mantık gibi bilimsel bir zeminde değerlendirmek ve bunun sonucunda karar vermek amacıyla tasarlanmıştır.

Yapılan çalışmada rüzgar santrali kurulumuna etki eden meteorolojik parametreler olarak Hellmann katsayısı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, weibull c ve weibull k parametreleri, güç yoğunluğu, yıllık üretim, wake (iz) kaybı ve kapasite faktörü parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin tasarlanan sisteme etkisi analiz edildiğinde bazılarının benzer etki yaptığı (Weibull c ve Weibull k parametreleri rüzgar hızıyla temsil edilebilir, iz kaybı ve yıllık üretim, kapasite faktörü ile temsil edilebileceği vb.) anlaşılmıştır. Bulanık mantık giriş parametrelerinin gereksiz ve çok sayıda olmasının tasarlanan sisteme katkısı olmadığı gibi olumsuz etki yapacağı bilinmektedir.

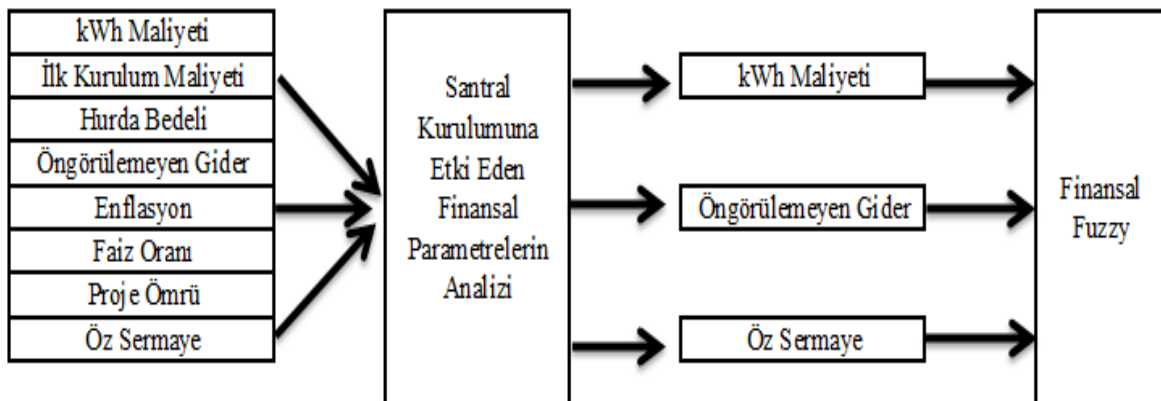


Şekil 2.31. Tasarlanan sisteme etki eden meteorolojik parametreler

Şekil 2.31'de santral kurulumuna etki edebilecek tüm meteorolojik parametreler belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları ve EPDK teknik şartnamesi de göz önüne alındığında rüzgar santralleri kurulumu için tasarlanan sistemde meteorolojik koşulları sağlayan rüzgar hızı, güç yoğunluğu ve kapasite faktörü parametreleri tasarlanan bulanık tabanlı karar sisteminde giriş birimi olarak belirlenmiştir.

Rüzgar kurulumuna etki eden finansal parametreler olarak ise kWh maliyeti, ilk kurulum maliyeti, hurda bedeli, öngörülemez gider, enflasyon, faiz oranı, proje ömrü ve öz sermaye parametreleri olarak belirlenmiştir.

Bu parametrelerin tasarlanan sisteme etkisi analiz edildiğinde yine aynı şekilde bazılarının benzer etki yaptığı (enflasyon, faiz oranı ve hurda bedelinin aslında ilk kurulum maliyetiyle temsil edilebilmektedir vb.) anlaşılmıştır.

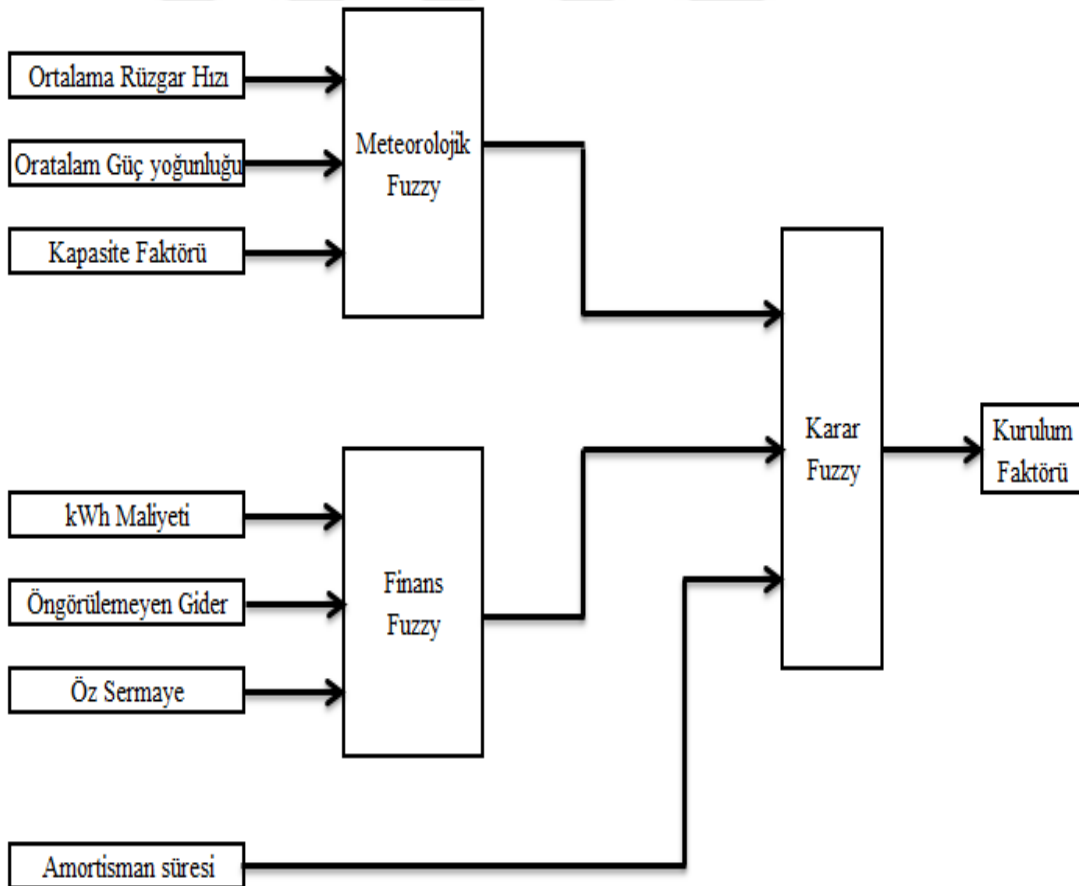


Şekil 2.32. Tasarlanan sisteme etki eden finansal parametreler

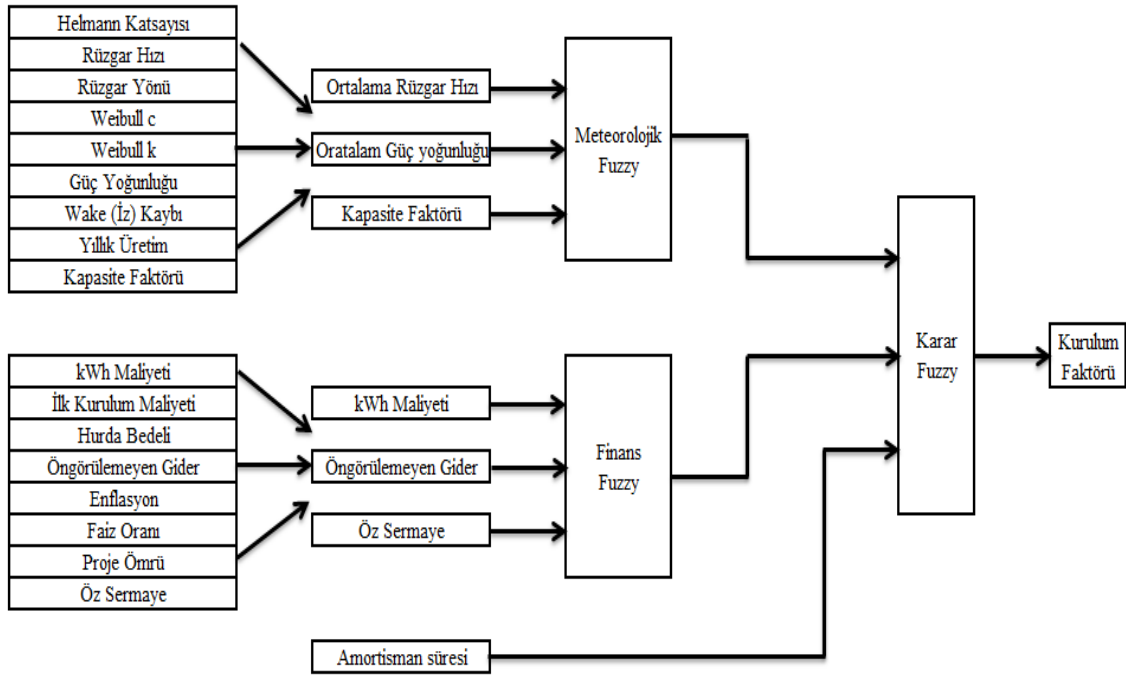
Rüzgar santrali kurulumu için gerekli finans koşulunu sağlayan kWh maliyeti, öngörülemeyen gider, öz sermaye parametreleri giriş birimi olarak belirlenmiştir.

Şekil 2.32'de santral kurulumuna etki edebilecek tüm finansal parametreler belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları, ekonomik analizler, literatür taraması ve uzman görüşleri de dikkate alınarak rüzgar santrali kurulumu için gerekli finans koşulunu sağlayan kWh maliyeti, öngörülemeyen gider, öz sermaye parametreleri tasarlanan bulanık tabanlı karar sisteminde giriş birimi olarak belirlenmiştir.

Tasarlanan sistem meteorolojik ve finansal parametrelerin birlikte değerlendirilmesi suretiyle bir kurulum faktörü oluşturulması esasına dayanmaktadır. Şekil 2.33'de tasarlanan sistem gösterilirken Şekil 2.34'de tasarlanan sisteme etki eden tüm parametrelerle birlikte daha detaylı gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Tasarlanan bulanık tabanlı sistem



Şekil 2.34. Tasarlanan sisteme etki eden parametrelerle birlikte gösterimi

2.2.6.2. Mamdani ve Sugeno Çıkarım Yöntemlerinin Uygulanması

Tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan bulanık tabanlı karar sisteminde kullanacağımız çıkarım modelinin belirlemek için Mamdani ve Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleri (FIS) geliştirilmiş, bu iki FIS'nin sonuçları karşılaştırılmış ve hangisinin daha iyi seçim olduğu belirlenmiştir.

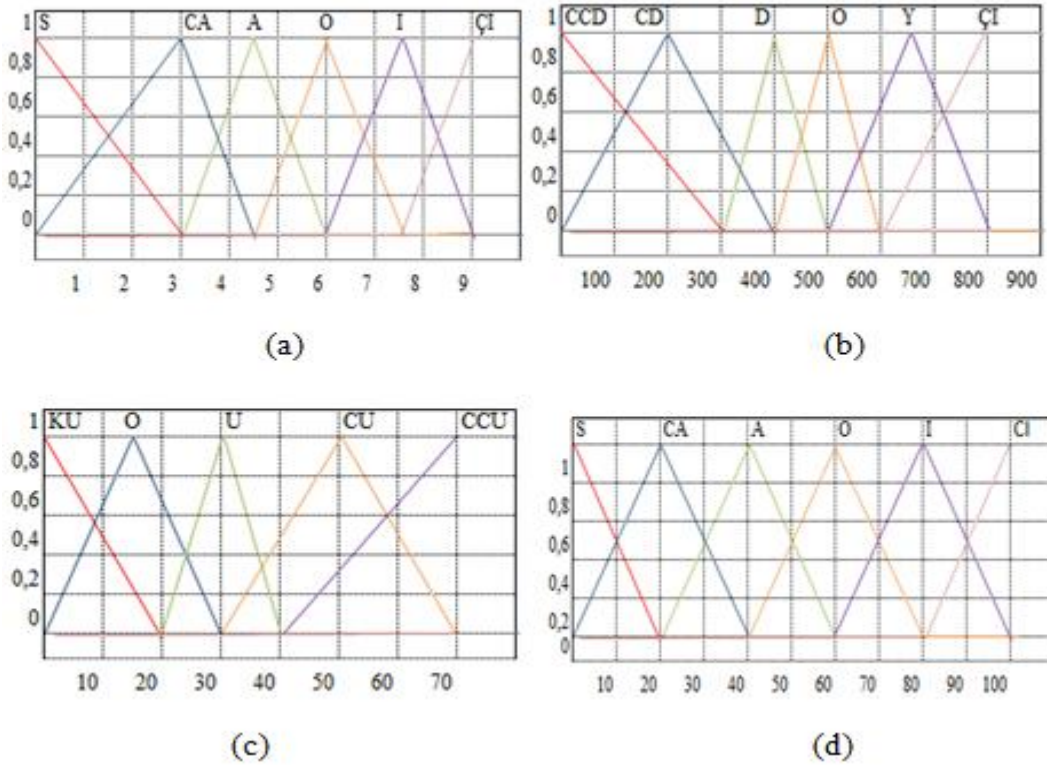
Bulanık çıkarım, bulanık mantık yöntemi kullanarak giriş ile çıkış değerleri arasındaki ilişkinin haritalanmasıdır. Bulanık çıkarım çok farklı disiplinlerde “bulanık kural tabanlı sistemler”, “bulanık uzman sistemler”, “bulanık model”, “bulanık çağrışımsal bellek”, “ bulanık mantık denetçisi” ve “bulanık sistemler” olarak da adlandırılmaktadır [109-115]. Bulanık çıkarım, giriş değerlerini hazırladığımız kural tabanındaki kurallar ile yorumlayarak çıkış değerlerini tanımlayan bir metot diyebiliriz [116].

Bulanık Çıkarım Sistemleri kavramsal olarak çok basittir. Bir girdiden, bir işlemden ve bir çıkış evresinden oluşurlar. Giriş aşaması girdileri alır ve bunları uygun üyelik işlevleri ve doğru değerleri ile eşler. Her işlem aşamasında özel kural çalıştırılır ve karşılık gelen sonuç oluşturulur. Daha sonra sonuçlar, çıktı aşamasına bir girdi olarak verilecek şekilde birleştirilir. Çıkış aşamasında, birleşik sonuç belirli bir değere geri dönüştürülür.

Bulanık çıkarımda Mamdani, Larsen, Tsukamoto , Sugeno gibi birçok farklı yöntem kullanılır . Ancak en yaygın kullanılan çıkarım yöntemi Mamdani ve Sugeno yöntemidir bu nedenle tezimizde de bu iki yöntem denenmiştir. Her iki yöntem de bulanık kurallar üzerine kurulmuştur; Mamdani yöntemi, bulanık kuramı bir kural olarak kullanırken Sugeno yöntemi, kural olarak giriş çeşitliliğinin doğrusal işlevini kullanır.

2.2.6.2.1. Mamdani Tipi Çıkarım Sistemi Tasarlama

Rüzgar santrali kurulumu, ilk önce Mamdani bulanık model kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışmada meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği 3 giriş 1 çıkışlı meteorolojik fuzzy modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan Sistemde ortalama rüzgar hızı (m/s), ortalama güç yoğunluğu (w/m^2) ve kapasite faktörü (%) giriş değerlerine karşın uygunluk faktörü (%) çıkış değerini üretmektedir. Kullanılan her bir üyelik fonksiyonu için belirlenen aralıklar ve dilsel değişkenler Şekil 2.35'de, uygulamada kullanılacak kural tablosu ise Şekil 2.36'da gösterilmiştir.

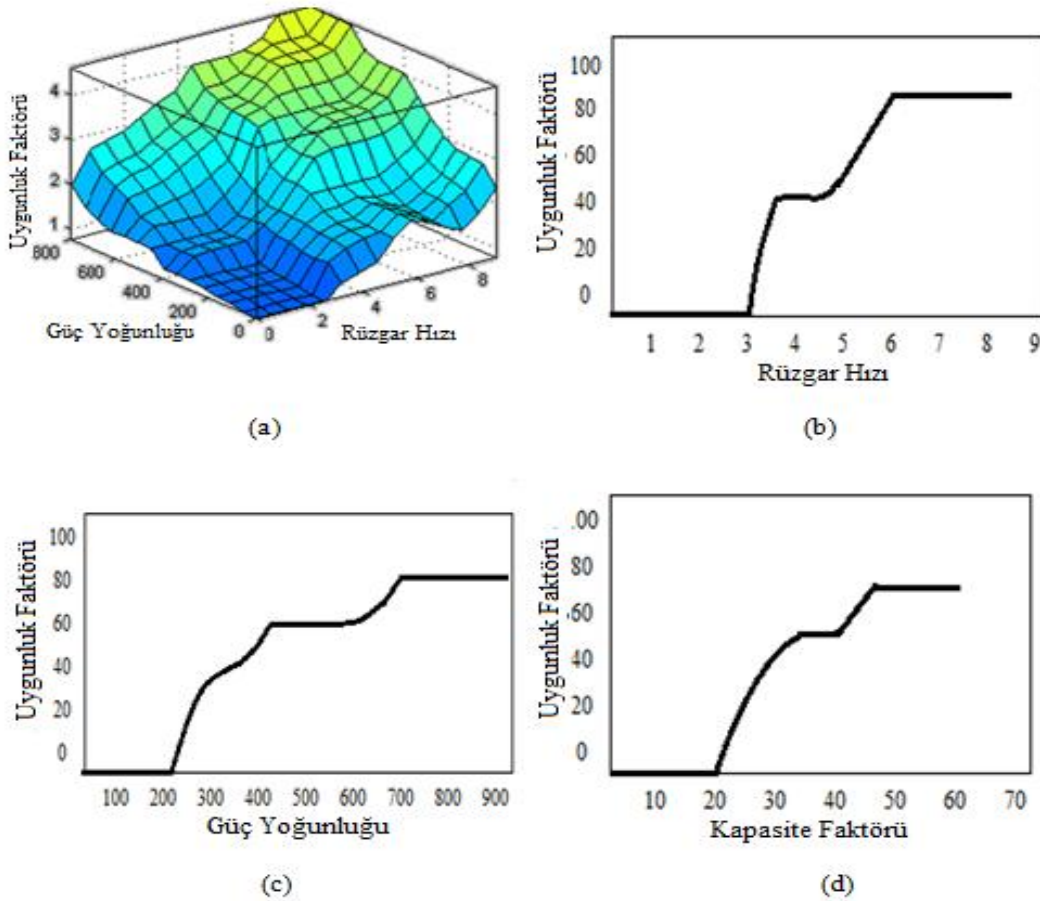


Şekil 2.35. (a) Ortalama rüzgar hızı (b) Ortalama güç yoğunluğu (c) Kapasite faktörü (d) Uygunluk faktörü

X3	S					
	X2					
	CCD	CD	D	O	Y	CY
KÜ	S	S	S	S	S	S
O	S	S	S	S	CA	CA
U	S	CA	CA	CA	CA	A
CU	CA	CA	CA	A	A	A
CCU	CA	A	A	A	A	O

Şekil 2.36. Mamdani tipi kural tablosu

Çalışmada kullanılan mamdani tipi çıkarım yöntemi özellikle karar destek uygulaması için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Mamdani çıkarım yöntemi önemli bir hesaplama yükünü gerektirir. Rüzgar santrali kurulumu için Mamdani çıkarım yöntemi simüle edildikten sonra elde edilen çizimler Şekil 2.37'de gösterilmiştir.



Şekil 2.37. (a) Mamdani tipi FIS'in yüzey görünümü (b) Rüzgar hızı ile uygunluk faktörü (c) Güç yoğunluğu ile uygunluk faktörü (d) Kapasite faktörü ile uygunluk faktörü

2.2.6.2.2. Sugeno Tipi Çıkarım Sistemi Tasarlama

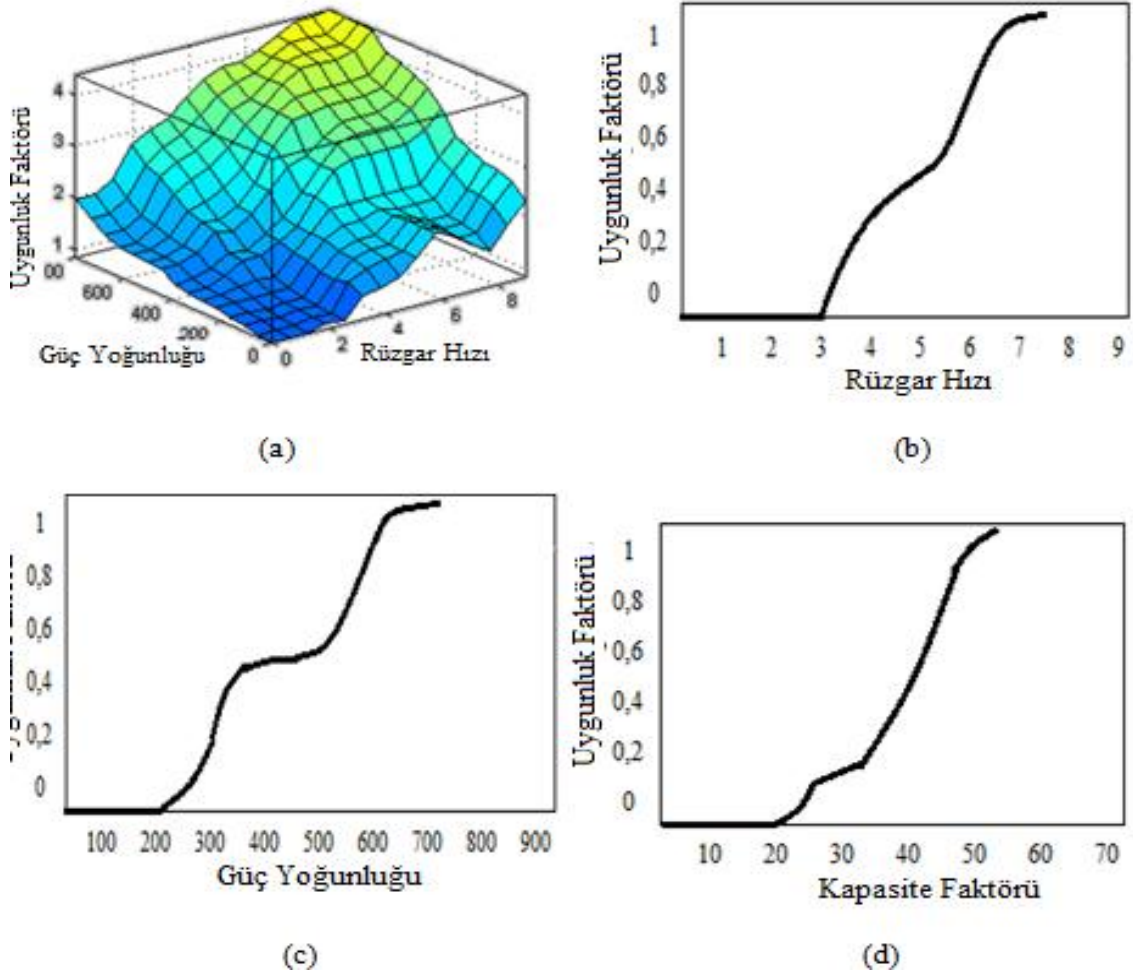
Rüzgar santrali kurulumunun Sugeno tipi model ile geliştirilmesinde ilk basamaklar Mamdani tipi model ile aynıdır. Sistemde ortalama rüzgar hızı (m/s), ortalama güç yoğunluğu (w/m^2) ve kapasite faktörü (%) giriş değerlerine karşın yine uygunluk faktörü (%) çıkış değerini üretmektedir. Sugeno tipi FIS'deki çıktı değeri olan uygunluk faktörü sabit veya doğrusal olabilir.

Sistemin çıktısı Tablo 2.18'de gösterildiği gibi " S" , "ÇA", "A", "O", "İ", "Çİ" şeklindedir. Sugeno tipi FIS'deki çıktı sadece 0-1 aralığında olabilir. Sugeno tipi FIS için kullanılan kural tabanı Şekil 2.36'da gösterilen Mamdani tipi FIS için kullanılan gibidir. Bu iki çıkarım yöntemi arasındaki fark sadece netleştirme aşamasındadır. Çıktının lineer olması durumuna, “Birinci-derece Sugeno bulanık çıkarımı”, çıktının sabit olması durumuna, “Sıfır-derece Sugeno bulanık çıkarımı” denilmektedir [117,118].

Tablo 2.18. Uygunluk faktörü üyelik fonksiyonu

Uygunluk Faktörü	Sabit Değer
S (Sıfır)	0
ÇA (Çok az)	0,2
A (Az)	0,4
O (Orta)	0,6
İ (İyi)	0,8
Çİ (Çok iyi)	1

Sugeno yöntem de hesaplama dinamiklidir ve özellikle dinamik nonlineer için kontrol problemlerinde çok cazip kılan optimizasyon ve adaptif tekniklerle iyi çalışır. Mamdani yöntemi ve Sugeno yöntemi arasındaki temel fark, net çıkışın bulanık girdilerden üretilme biçimindedir. Mamdani yöntemde, bulanık bir çıktının bulanıklaştırma tekniğini kullanırken, Sugeno yöntemde, net çıkışı hesaplamak için ağırlıklı ortalama kullanır Rüzgar santrali kurulumu için Sugeno tipi FIS simüle edildikten sonra elde edilen çizimler Şekil 2.38'de gösterilmiştir.



Şekil 2.38. (a) Sugeno tipi FIS'in yüzey görünümü (b) Rüzgar hızı ile uygunluk faktörü (c) Güç yoğunluğu ile uygunluk faktörü (d) Kapasite faktörü ile uygunluk faktörü

Sugeno'nun yönteminin temel olarak üç avantajı vardır: ilki sayısal olarak verimlidir, ikinci avantajı optimizasyon ve adaptif tekniklerle iyi çalışır, üçüncü avantajı ise matematiksel olarak çok uygundur. Modeller incelendiğinde sonuçlar arasında çok büyük farklar olmayıp benzer şekilde çalıştığı görülmüştür.

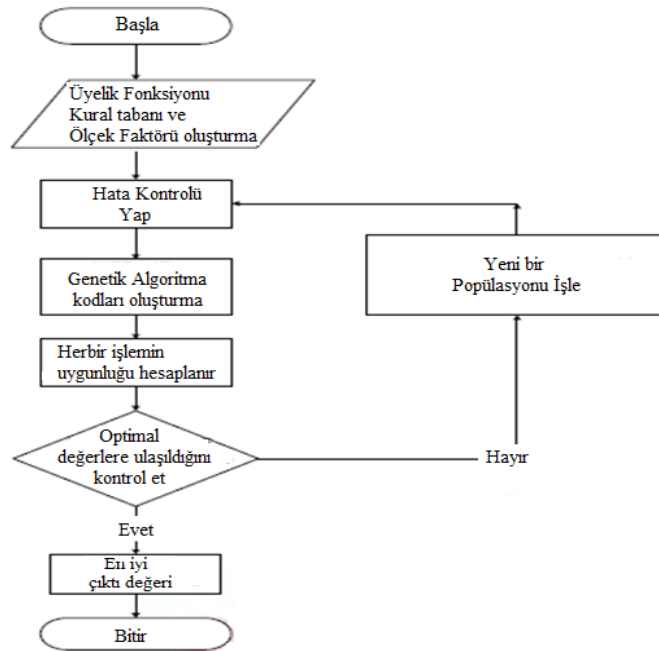
Ancak Sugeno tipi FIS modeli kullanımında çıktı değeri olan uygunluk faktörünün daha yüksek değerleri gördüğü ve sistemin tam kapasitede çalışmasına olanak sağladığı görülmüştür. Bu iki çıkarım yöntemi arasındaki temel fark netleştirme aşamasındadır. Her iki FIS'in tasarımı aynı olmasına rağmen Sugeno tipi çıktı üyeliği fonksiyonları sadece sabit veya doğrusal olabilir ve aynı zamanda net çıkışlar üretir.

2.3. Genetik Algoritma Uygulaması

Bulanık tabanlı karar siteminde en önemli iki unsur üyelik fonksiyonu değer aralığının belirlenmesi ve kural tabanının doğru şekilde tanımlanmasıdır. Yapılan çalışmada bu iki unsurun belirlenmesi literatür taraması ve uzman tecrübesine dayanılarak yapılmıştır. İnsan temelli ve deneme yanılma gibi işlemlerle oluşturulacak tanımlamalardan doğacak sıkıntıları çözmek ve sistemin iyileştirilmesi için genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Sistem parametreleri optimal değerlere ulaşmaya kadar genetik algoritma ile optimize edilmiştir.

Genetik algoritma, sağlamlığı ve en uygun çözümü sağlama yeteneği nedeniyle farklı alanlardaki optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar, doğal evrimden esinlenen, sezgisel bir arama ve optimizasyon tekniğidir. Genetik algoritmalar, bir problemi çözmek için ardışık nesilden bireyler arasında en uygun olanın hayatta kalmasını simüle eder.

Çalışmada Rüzgar enerji türbinlerinin kurulumunda karar vermek için hazırladığımız kural tabanının optimizasyonu amaçlanmıştır. Tasarlanan sitem Matlab Fuzzy Logic Toolbox ve Genetik Algoritma kütüphanesi kullanılarak canlandırılmıştır. Yapılacak çalışmanın akış şeması Şekil 2.39'da verilmiştir.



Şekil 2.39. GA kullanarak optimizasyon için akış şeması

Bulanık denetleyici üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak karakterize edilmiştir. Kontrol sisteminin yüksek performans gösterebilmesi için bu tip bir belirlemeye ihtiyaç duyulmuştur. Seçilen üçgen üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

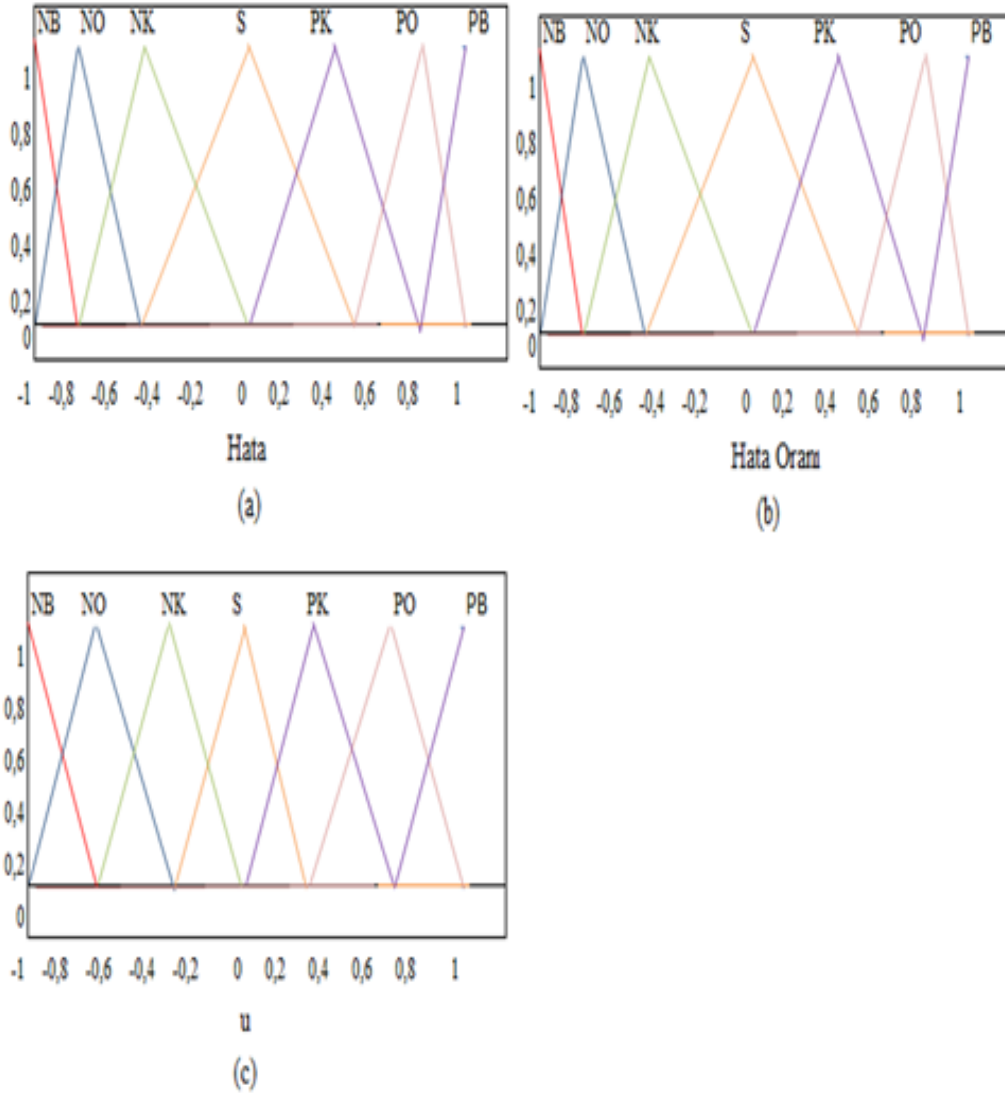
$$A_{\Delta} = \max \left(\min \left(\frac{x-x_1}{x_T-x_1}, \frac{x_2-x}{x_2-x_T} \right), 0 \right) \quad (2.21)$$

Yapılan çalışmada sistemi optimize etmek için iki parametre eşzamanlı olarak birleştirilmiştir:

- Üyelik fonksiyonlarını ayarlama ve bulanık kuralları ayarlama.
- Ölçekleme faktörlerinin seçimi.

Bulanık kontrol tasarımındaki ilk adım, girişler ve çıktı için üyelik fonksiyonlarının sayısını ve dağıtımını seçmektir. Yapılan çalışmada, üçgen üyelik fonksiyonu için yedi normalleştirilmiş eleman işlevi düşünülmektedir. Bulanık kümeleri tanımlamak için kullanılan dilsel etiketler Pozitif Büyük (PB), Pozitif Ortam (PO), Pozitif Küçük (PK), Negatif Büyük (NB), Negatif Ortam (NO), Negatif Küçük (NK) ve Sıfır (S) şeklindedir. Hem girdiler hem de çıktılar, [-1 1] söyleminin bir evreninde normalleştirilmiştir.

Çıkarım sistemi iki adet giriş ve bir adet çıkış sisteminden oluşmaktadır. Girişlerden biri (ee) hata değeri. Bu değer istenilen frekans değeri ile sistemin çıkışından elde edilen gerçek frekans değeri arasındaki matematiksel farkın ifadesidir. İkinci giriş değişkeni (de) hatanın türevi yani hatanın zaman domaini üzerindeki değişim oranıdır. Sistemin çıkışı ise üyelik kümelerinin pozisyon değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.40. (a) Hata için üyelik fonksiyonu (b) Hata oranı için üyelik fonksiyonu (c) Çıkış için üyelik fonksiyonu

İkinci adım, girdi ve çıktı üyelik fonksiyonları için Tablo 2 'de sunulan bulanık kuralların oluşturulmasıdır. Bu kurallar, temel bilgi ve süreç hakkında insan deneyiminden çıkarılmaktadır. Kurallar, kontrol stratejisini tanımlayan girdi/çıkış ilişkilerini içerir. Sistemde çıkarım yöntemi olarak mamdani çıkarım yöntemi benimsenmiştir. Bu metod uzman tarafından tecrübe edilerek belirlenmiş sözel kuralları kullanarak çıkarım yapılmasını sağlamaktadır. Uzman tarafından belirlenmiş bulanık çıkarım sistemi meteorolojik kural tabanı Tablo 2.19'da gösterilmektedir. Tablodaki değerler kural sonuçlarını gösterir.

Tablo 2.19. 180 kural için belirlenen meteorolojik kural tablosu

u	de																																														
ee	X3	X1																																													
		S						CA						A						O						i						Ci															
		X2						X2						X2						X2						X2						X2															
		CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY										
	KÜ	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	CA	CA	S	CA	CA	A	A	A	CA	CA	CA	A	A	O	CA	CA	A	A	A	O	CA	CA	A	A	A	O	A	A	O	i	i	i				
	O	S	S	S	S	CA	CA	S	S	CA	CA	A	A	CA	CA	CA	A	O	O	CA	CA	A	A	A	O	CA	CA	A	O	O	i	A	O	O	i	i	çi										
	U	S	CA	CA	CA	CA	A	S	CA	CA	CA	A	O	CA	A	A	O	O	i	A	A	O	O	i	i	CA	A	O	O	i	çi	A	O	i	i	çi	çi										
CU	CA	CA	CA	A	A	A	CA	CA	A	A	O	i	A	O	O	O	i	i	O	O	i	i	i	i	A	O	i	i	çi	çi	O	i	çi	çi	çi	çi											
CCU	CA	A	A	A	A	O	A	A	O	O	O	i	A	O	O	i	i	çi	O	O	i	i	çi	çi	O	i	i	çi	çi	çi	i	i	çi	çi	çi	çi											

Sistemi optimize edecek genetik algoritmayı uygulamak ve farklı parametrelerin değerlendirilmesi için bir araç gereklidir. Bu parametrelerin değerlendirilmesi, genetik algoritmanın çok sayıda farklı parametreler kombinasyonunu işleyebilmesinden dolayı nispeten hızlı bir şekilde gerçekleştirilir.

GA, değerlendirme işlevini genetik algoritma optimizasyon araç kutusu ile bir dizi parametrenin uygunluğunu hesaplar. İşlemlerden sonra, parametrelerin eldeki görevi ne kadar iyi yerine getirdiğine karşılık gelen bir değer döndürür.

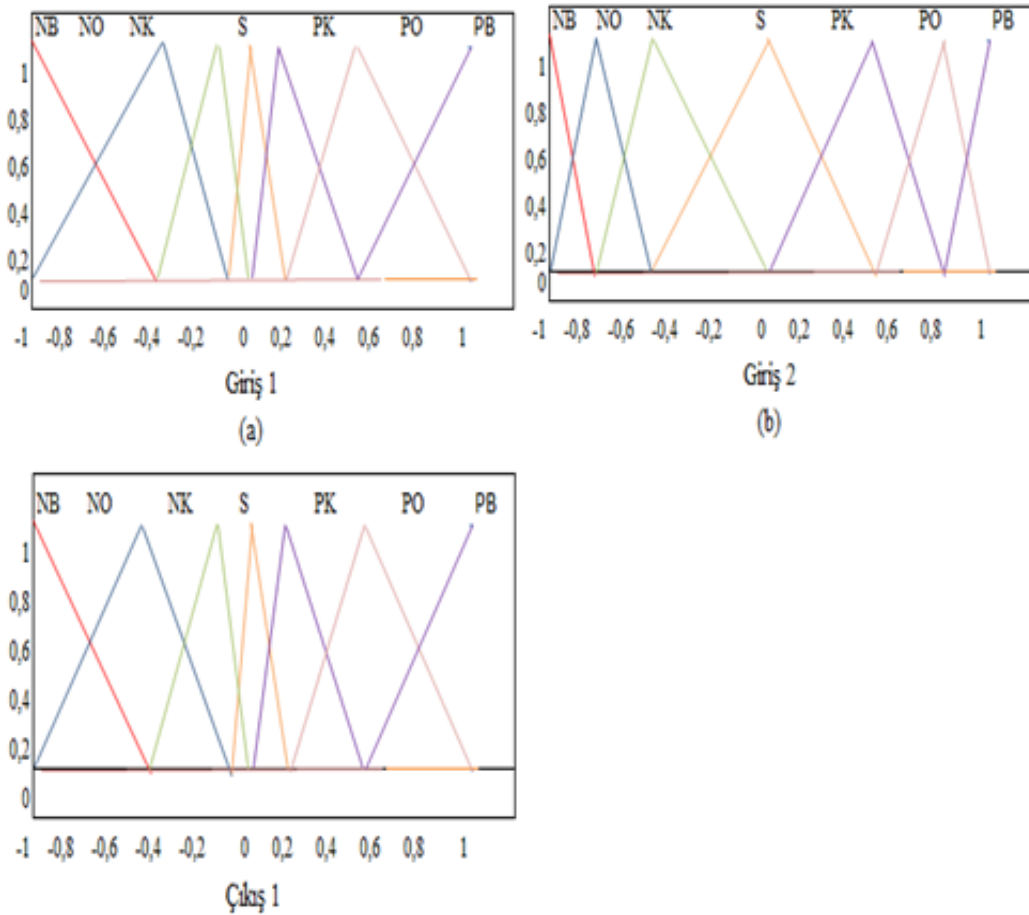
İlk fonksiyon, girilen kromozomdan ilgili parametreleri çıkarır. Bu, bazı hata kontrollerini gerçekleştirecektir, parametreler daha sonra bulanık çıkarım sistemi oluşturmak ve ikinci ölçekle uygun ölçekleme faktörlerini ayarlamak için kullanılır. Herhangi bir yinelemenin sonunda, bir değer kaydedilir ve daha sonra simülasyon döndürülür. Tablo 2.20'de GA için kullanılan parametreleri vermektedir. Meteorolojik parametrelerin en üst limitleri ve en iyi performans için istenen tutum [7,5 500 75].

Tablo 2.20. Genetik algoritma için kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Nesil Sayısı	20
Popülasyon Boyutu	20
Gen değişimi Türü	Arithmetic
Mutasyon Türü	Uniform
Sonlandırma Yöntemi	Maximum Generation

İki giriş hata ve hata oranı, Genetik Algoritma tarafından belirlenen uygun kazançlar tarafından ölçeklendirilir. İçerisindeki söylem evreni -1 ile 1 arasındadır. Bu girişler FLC'yi besler ve FLC'nin çıktıları daha sonra başka bir kazanç ile ölçeklendirilir. Meteorolojik değer yapısından farklılaştığında, yani istenen tutumdan saptığında, bu sisteme girdi olarak işlev görür.

Fonksiyon ayarlama yaklaşımında, bulanık mantık araç kutusunun kullanılmış, genetik algoritma optimizasyon araç kutusu uygun şekilde değiştirilmiş, komutların yazılması ve simülasyon gereksinimlerini karşılamak için Matlab kodları kullanarak uygulanmıştır. Bu sistem, optimum bir çözüm bulmak için sürekli olarak modifiye edilmiştir. Yapılan uygulama sonucunda elde edilen üyelik işlevi Şekil 2.41, bulanık kuralların optimal yanıtını veren meteorolojik kural tabanı Tablo 2.21, finansal kural tabanı Tablo 2.22 ve karar kural tabanı ise Tablo 2.23'de gösterilmiştir.



Şekil 2.41. (a) Hata için optimal üyelik fonksiyonu (b) Hata oranı için optimal üyelik fonksiyonu (c) Çıkış için optimal üyelik fonksiyonu

Tablo 2.21. Optimize edilmiş meteorolojik kural tabanı

Çıkış	Hatanın Değişim Oranı																																																
Hata	X3	X1																																															
		S						CA						A						O						İ						Çİ																	
		X2						X2						X2						X2						X2						X2																	
		CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY	CCD	CD	D	O	Y	CY												
		KÜ	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	CA	A	S	S	CA	CA	A	O	CA	CA	A	A	A	O	CA	CA	A	O	O	İ	CA	CA	O	İ	İ	İ	İ										
	O	S	S	S	CA	CA	CA	S	S	CA	A	O	CA	CA	A	A	O	İ	CA	CA	A	A	O	İ	CA	CA	A	O	İ	Çİ	A	A	İ	İ	İ	Çİ													
	U	S	CA	CA	CA	A	A	S	S	CA	CA	O	O	CA	A	A	O	İ	İ	CA	A	O	O	İ	İ	CA	A	O	İ	İ	Çİ	A	O	İ	İ	Çİ	Çİ												
	CU	CA	CA	CA	A	A	O	CA	CA	A	A	O	İ	CA	A	O	O	İ	Çİ	CA	O	İ	İ	Çİ	Çİ	O	O	İ	Çİ	Çİ	Çİ	O	O	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ												
CCU	CA	A	A	A	O	O	CA	CA	O	A	İ	İ	A	O	O	İ	Çİ	Çİ	O	O	İ	İ	Çİ	Çİ	O	O	İ	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ													

Tablo 2.22. Optimize edilmiş finansal kural tabanı

Çıkış	Hatanın Değişim Oranı																																										
Hata	X6	X4																																									
		CCA						CA						A						O						İ						Çİ											
		XS						XS						XS						XS						XS						XS											
	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK	Çİ	İ	O	K	ÇK	ÇÇK							
	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	Çİ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	O	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ
	İ	Çİ	İ	İ	O	A	CA	Çİ	İ	İ	O	O	A	Çİ	Çİ	İ	O	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	O	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ	O
	O	İ	O	O	A	A	CA	İ	İ	O	O	A	CA	İ	İ	O	O	O	A	İ	İ	İ	O	O	A	Çİ	İ	İ	O	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	O	A	Çİ	Çİ	İ	İ	İ	A
	K	O	O	A	A	CA	CA	İ	O	A	A	CA	S	İ	O	A	A	A	CA	İ	İ	O	O	A	CA	İ	İ	O	O	A	CA	İ	İ	O	O	A	CA	İ	İ	İ	O	O	A
ÇK	O	O	A	A	S	S	O	A	A	A	S	S	O	A	A	A	CA	S	İ	O	A	A	CA	S	İ	O	A	A	CA	CA	O	O	A	A	CA	CA	İ	İ	O	O	O	CA	
ÇÇK	A	A	CA	CA	S	S	A	A	CA	CA	S	S	O	A	A	CA	S	O	A	A	CA	S	O	A	A	CA	CA	S	O	O	A	A	CA	CA	O	O	O	O	O	A	CA		

Tablo 2.23. Optimize edilmiş karar kural tabanı

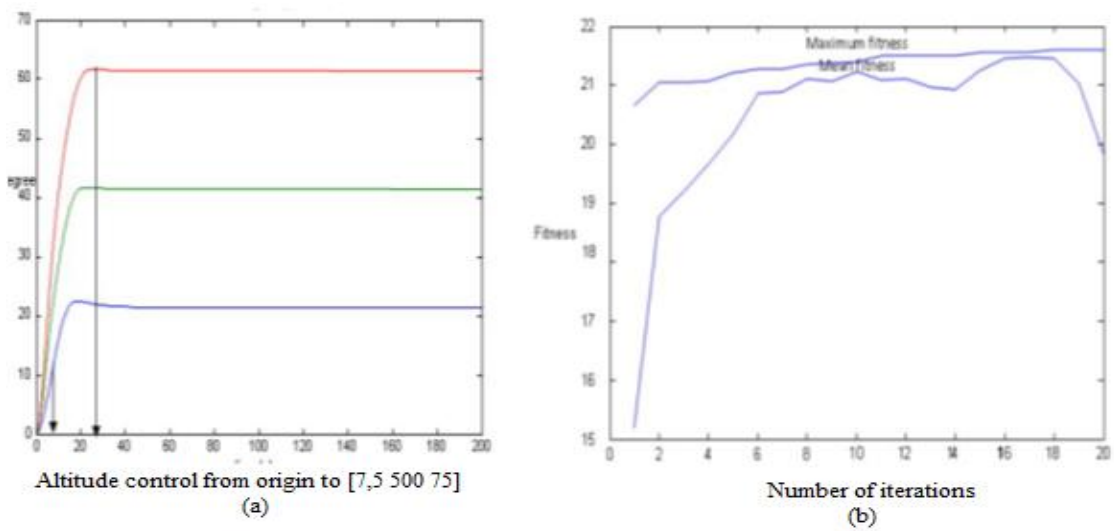
Çıkış	Hatanın Değişim Oranı																																																
Hata	X7	Y1																																															
		S						CA						A						O						İ						Çi																	
		Y2						Y2						Y2						Y2						Y2						Y2																	
		S	ÇA	A	O	İ	Çi	S	ÇA	A	O	İ	Çi	S	ÇA	A	O	İ	Çi	S	ÇA	A	O	İ	Çi	S	ÇA	A	O	İ	Çi	S	ÇA	A	O	İ	Çi												
		Çi	CCD	CCD	CD	CD	D	CCD	CD	CD	CD	D	D	CCD	CD	D	D	O	O	CD	CD	D	O	İ	İ	D	D	O	İ	Çi	CCi	O	O	İ	ÇÇi	CCi	CCi												
	İ	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CD	CD	D	CCD	CCD	CD	D	D	O	O	CD	CD	D	D	O	İ	D	D	D	İ	İ	Çi	O	O	İ	Çi	CCi	CCi													
	O	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CD	CD	D	CCD	CD	CD	O	O	CD	CD	D	O	İ	İ	D	O	O	İ	Çi	CCi															
K	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CCD	CCD	CD	CCD	CCD	CCD	CD	CD	CCD	CCD	CD	CD	D	O	CD	CD	CD	D	O	İ	D	D	O	İ	Çi	Ci															
ÇK	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	D	O	CD	D	D	O	İ	Çi											
ÇÇK	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	D	O	CD	D	O	İ	İ												

Ayarlama yaklaşımı, MATLAB M-File kullanımını ve hata değişkeni için 1.00 ile 2.00 aralığında ve -8,5 ila -7,5 hata oranı arasında en iyi ölçeklendirme faktörünün seçimini işlemek için fonksiyonlar kullanmıştır. Simülasyon sonunda, G1, G2, G3, G4, G5 ve G6 etiketli üç hata oranı girişi ve en iyi konum fonksiyonu etiketli üç hata değişken girişi için Tablo 2.24'de elde edilmiştir.

Tablo 2.24. En iyi ölçek faktörleri ve uygunluk fonksiyonu

G1	1.8644
G2	1.9423
G3	1.9546
G4	-7.9438
G5	-8.4561
G6	7.6735
En iyi Konumlandırma fonksiyonu	327.0316

Şekil 2.42'de üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar ve ölçeklendirme faktörü optimize edildiğinde en iyi tutum yanıtını göstermektedir.



Şekil 2.42. (a) Zamana karşı en iyi yanıt cevabı (b) En iyi performansı gösteren Genetik Algoritma İterasyonu

Daha çok deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen kural hazırlama işlemi sadece spesifik yani özel bir uygulamaya ait olmakta ve genelleme şansı pek mümkün olmamaktadır. Çalışmanın bu kısmında uzman görüşü ve literatür taraması sonucu hazırlanmış olduğumuz kural tabanını genetik algoritma tekniğiyle optimizasyonunu sağlayarak insan temelli hataları minimize etmesi sağlandı.

2.4. Karar Sonuçlarının Analizi

Çalışmada bu bölüme kadar yapılmış olan işlemleri sırası ile özetleyecek olursak üyelik fonksiyonları, bulanıklaştırma, kural tabanı ve durulaştırma alt bileşenlerinden oluşan bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır.

Tasarlanan karar sisteminde özel karakterleri sayı olarak değil günlük hayatta kullandığımız kelimeler ve cümlelerle ifade ettiğimiz dilsel değişkenler tanımlanmış ve tanımlanan dilsel değişkenler ışığında giriş ve çıkış değerlerinin bir elemanın bir alt kümeye yakınlığını gösteren üyelik fonksiyonları hazırlanmıştır. Hazırlanan üyelik fonksiyonları vasıtasıyla günlük hayatta kesin olarak tanımlanan değerlerin bulanık değerlere dönüştürülmesi sağlanmıştır. Elde edilen bulanık değerler önceden hazırladığımız kurallar ile işleme tabi tutulmuştur. Kural tabanı sonucu elde edilen bulanık değerler gerçek hayatta kullanılmak üzere kesin değerlere dönüştürülmüştür.

Tez çalışmasının bu bölümünde hazırlanmış olduğumuz bulanık tabanlı karar sisteminin Matlab/Simulink modelinin hazırlanması ve farklı uygulamalar için sonuçların analiz edilmesi sağlanmıştır. Sistemin simülasyonu için dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizi için etkileşimli, grafiksel bir ortam sunan Matlab/Simulink yazılımı ve Fuzzy Logic Toolbox kullanılmıştır.

Simulink, tasarım konseptlerini en az çabayla her ayrıntıda keşfetmek için sanal prototiplerin hızlı bir şekilde inşasını sağlar. Modelleme için Simulink, yapı modelleri için blok diyagramları olarak bir grafik kullanıcı ara yüzü sunar. Sürükle-bırak fare işlemlerini kullanan sistemlerin grafik modellerini oluşturmak için kullanılacak önceden tanımlanmış blokların kapsamlı bir kütüphanesini içerir. Kullanıcı, inşa etmek için saatler gerektirecek bir çalışmayı laboratuvar ortamında kolaylıkla modelleyebilir. Sürekli zaman, örneklenmiş Simulink'in etkileşimli doğası bizi bir şeyler denemeye teşvik eder, “anında”

parametrelerini değiştirebilir ve ne olduğunu hemen görebiliriz. Son olarak Simulink matlab ile entegre edilmiştir ve veriler programlar arasında kolayca paylaşılabilir.

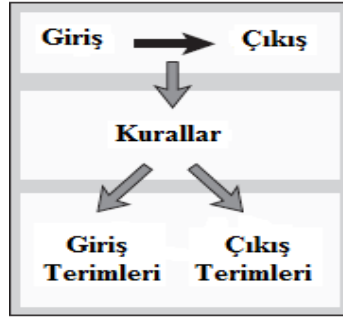
Fuzzy Logic Toolbox yazılımı ile bulanık çıkarım sistemleri oluşturabilir ve düzenleyebiliriz. Grafiksel araçlar veya komut satırı fonksiyonları kullanarak bu sistemleri oluşturabilir veya bunları kümeleme veya uyarlamalı nöro-bulanık teknikler kullanarak otomatik olarak oluşturabiliriz. Simulink yazılımına erişiminiz varsa, bulanık sisteminizi bir blok diyagramı simülasyon ortamında kolayca test edebilirsiniz.

Araç kutusu ayrıca kendi bağımsız C programlarınızı doğrudan alıştırmamıza izin verir. Bu, matlab oturumundan kaydedilen bulanık sistemleri okuyan tek başına bir bulanık çıkarım motoru ile mümkün kılınmıştır. Tek başına kendi kodumuzla bulanık çıkarım motoru oluşturmak için zelleştirebiliriz. Matlab ortamının entegre doğası nedeniyle, araç kutusunu özelleştirmek veya kendi denetim masası gibi başka bir araç kutusuyla kullanmak için kendi araçlarınızı oluşturabilirsiniz.

2.4.1. Sistemin Matlab/Simulink Modelinin Tasarlanması

Bulanık modellemede sisteme etki eden parametreler ve giriş/çıkış değişkenleri belirlenerek üç ayrı bulanık kural tabanından oluşan bulanık tabanlı karar sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan model, meteorolojik tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip meteorolojik_fuzzy, finansal tabanlı parametrelerin değerlendirildiği kural tabanına sahip finansal_fuzzy ve bu iki fuzzy sisteminin çıkışı ile ek parametrelerin değerlendirileceği ve çıkış parametresinin karar verme aşamasında kurulum faktörü olarak kullanacağımız kural tabanına sahip karar_fuzzy bulanık sistemlerinden oluşmaktadır.

Bulanık mantık, bir giriş uzayını bir çıktı uzayına eşlemektir ve bunu yapmak için birincil mekanizma, if-then ifadeleri olarak adlandırılan kuralların bir listesidir. Tüm kurallar paralel olarak değerlendirilir ve kuralların sırası önemsizdir. Kuralları yorumlayan bir sistem kurmadan önce, kullanılması planlanan tüm terimleri ve bunları tanımlayan sıfatların tanımlanması gerekir. Rüzgarın hızlı olduğunu söylemek için rüzgar hızının değişebileceği aralığı ve hız kelimesi ile ne demek istenildiğinin tanımlanması gerekir.

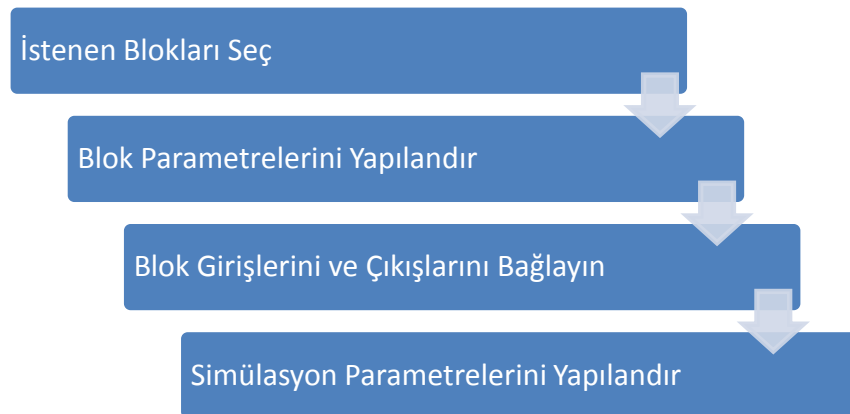


Şekil 2.43. Bulanık sistem yapısı

Şekil 2.43'de betimlenen bulanık çıkarım kavramını özetlemek için, bulanık çıkarım, girdi vektöründeki değerleri yorumlayan ve bir takım kurallara dayanarak, çıktı vektörüne değerler atayan bir yöntemdir. Bulanık mantık araç kutusu yazılımı, Simulink ortamında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bulanık sistemleri doğrudan Simulink'e götürebilir ve bunları simülasyon ortamında test edebiliriz.

Günümüzde mühendislik alanında en çok kullanılan programlardan birisi matlab'dir. Simulink, matlab ile birlikte bütünleşik olarak çalışan bir simülasyon ortamıdır. Simulink bize karmaşık sistemleri tasarlama ve simülasyon yapma olanağı vermektedir. Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemleri veya her ikisini de içeren hibrit sistemleri desteklemektedir. İçinde birçok alt sistemi blok olarak barındırdığından sürükle bırak yöntemiyle birçok sistemi bir kaç dakikada kurarak simule edebilir, değişik durumlardaki cevabını test edebiliriz. Ayrıca Simulink bizlere zengin bir blok kütüphanesi sunmaktadır.

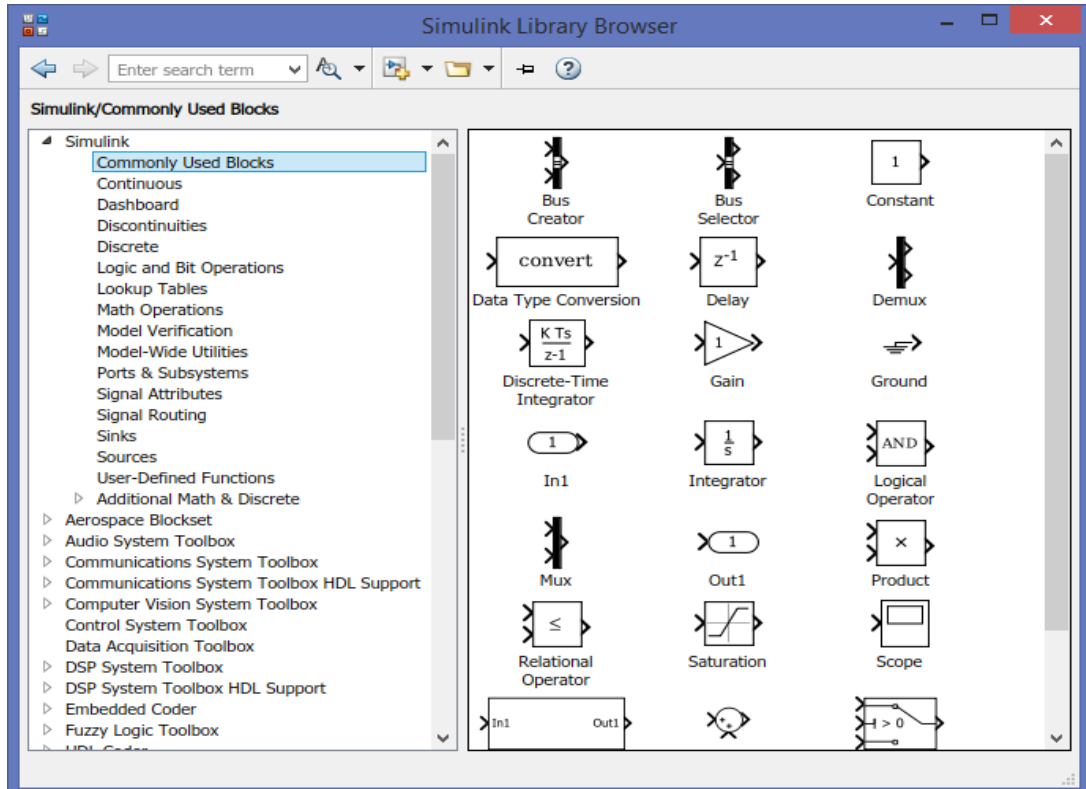
Tez çalışmasında Simulink ile bir çalışma modeli oluşturmak için Şekil 2.44'deki dört temel adımı sırasıyla izlenmiştir.



Şekil 2.44. Simulink çalışma modeli

Yapılan çalışmada önce tüm gerekli bloklar kütüphane tarayıcısından seçilir. Daha sonra blokları, istenen modelin bloklarına karşılık gelecek şekilde konumlandırılır. Son olarak tüm sistemi oluşturmak ve genel simülasyon parametrelerini ayarlanması için bloklar çizgilerle birleştirilir. Bundan sonra, çalıştığını doğrulamak için tüm sistem simüle edildi.

Öncelikle Şekil 2.45'deki Simulink kütüphane tarayıcısı kullanılarak gerekli blokların seçimi sağlanıp daha sonra Simulink çalışma modeli aşamaları uygulanacaktır.



Şekil 2.45. Simulink kütüphane tarayıcısı

Signal Routing bloğu:



Mux, girişlerini tek bir vektör çıktısıyla birleştirir. Bir giriş skaler veya vektör sinyali olabilir. Tüm girişler aynı veri tipinde ve sayısal tipte olmalıdır. Vektör çıkış sinyalinin elemanları emirleri yukarıdan aşağıya veya soldan sağa giriş port sinyallerinden alır.

Sink bloğu:



Display, girdi değerini gösterir biçim parametresini kullanarak görüntü formatını kontrol ederiz. Bir görüntüleme bloğundaki girişin numaralandırılmış bir veri türü varsa blok, sayılan değerleri gösterir, alttaki tamsayıların değerlerini değil. Kayıtlı tamsayı ayarlarından herhangi birine biçim ayarlama, bir hataya neden olur.



Scope, Test kapsamı numaralandırma sınıfı, test yürütme kapsamını belirtmek için bir araç sağlar.

Sources bloğu:



Sabit blok, gerçek veya karmaşık bir sabit değer üretir. Blok, aşağıdakilere bağlı olarak skaler, vektör veya matris çıktı üretir:

- Sabit değer parametresinin boyutsallığı
- Vektör parametrelerinin 1-D parametresi olarak ayarlanması

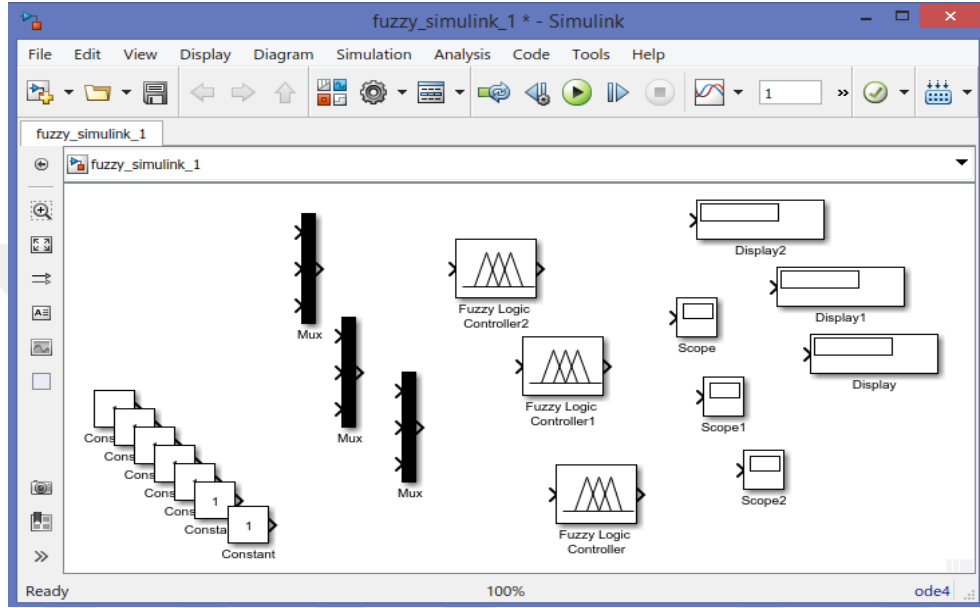
Bloğun çıkışı, sabit değer parametresiyle aynı boyutlara ve ögelere sahiptir. Bu parametre için bloğun vektör olarak yorumlanmasını istediğimiz bir vektör belirtirsek vektör parametrelerini 1-D parametresi olarak yorumla seçilir. Aksi takdirde, sabit değer parametresi için bir vektör belirtirsek, blok bu vektöre matris olarak davranır.

Fuzzy Logic Toolbox



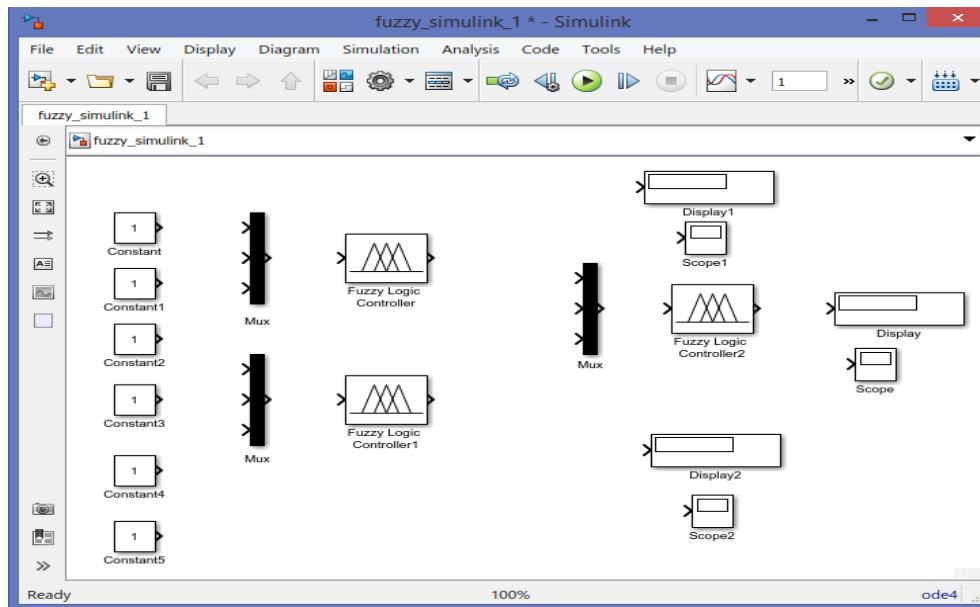
Bulanık çıkarım sistemini değerlendirir. Bulanık Mantık Denetleyici bloğu, Simulink'te bir bulanık çıkarım sistemi (FIS) uygular. FIS adı parametresini kullanarak değerlendirmek için FIS belirtiriz. Simülasyon sırasında kural görüntüleyicide bulanık çıkarım sürecini görüntülemek için, kural görüntüleyici bloğu ile bulanık mantık denetleyicisini kullanırız.

Adım 1: Bir sistemin bir Simulink modeli oluşturmak, uygun blokları seçmek ve bunları matematiksel modelleri temsil edecek şekilde bağlamaktan oluşur. Yapılan çalışmada Şekil 2.46'da görüldüğü gibi Simulink Kütüphane Tarayıcısı, içinde sistemimiz için gerekli olan parametreleri Signal Routing, Sink, Sources ve Fuzzy Logic Toolbox bloklarından seçildi.



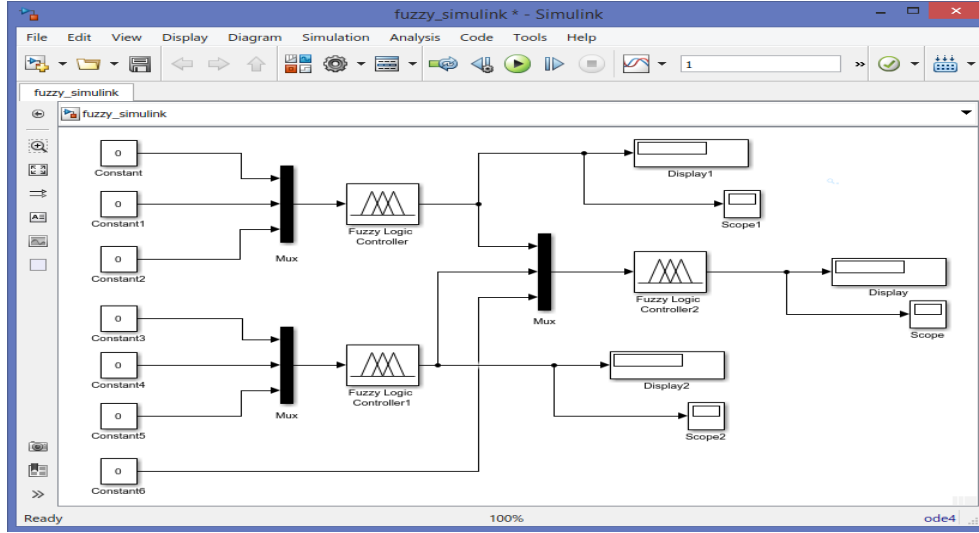
Şekil 2.46. Simulink kütüphane tarayıcısından parametrelerin seçimi

Adım 2: Şekil 2.47'de seçilen blok parametrelerini boyutlandırıp yapılandırıldı.



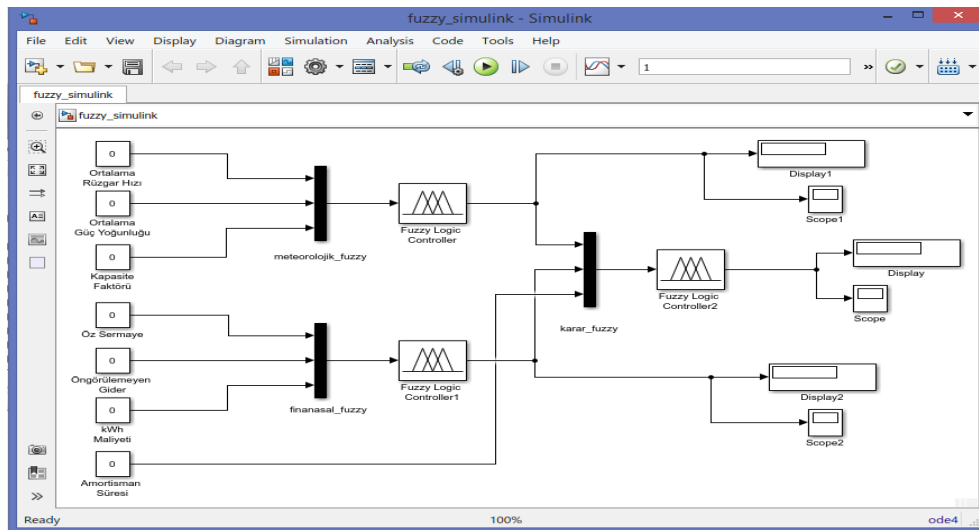
Şekil 2.47. Seçilen blok parametrelerinin boyutlandırılması ve yapılandırılması

Adım 3: Şekil 2.48'de Blok girişlerini ve çıkışlarını bağladık. Bir dal satırı eklemek:Constant çıkışını Mux bloğunun girişine bağlamak için bir dal hattı kullanılır ve bun tüm parametreler için uygulandı.



Şekil 2.48. Blok girişlerinin ve çıkışlarının bağlanması

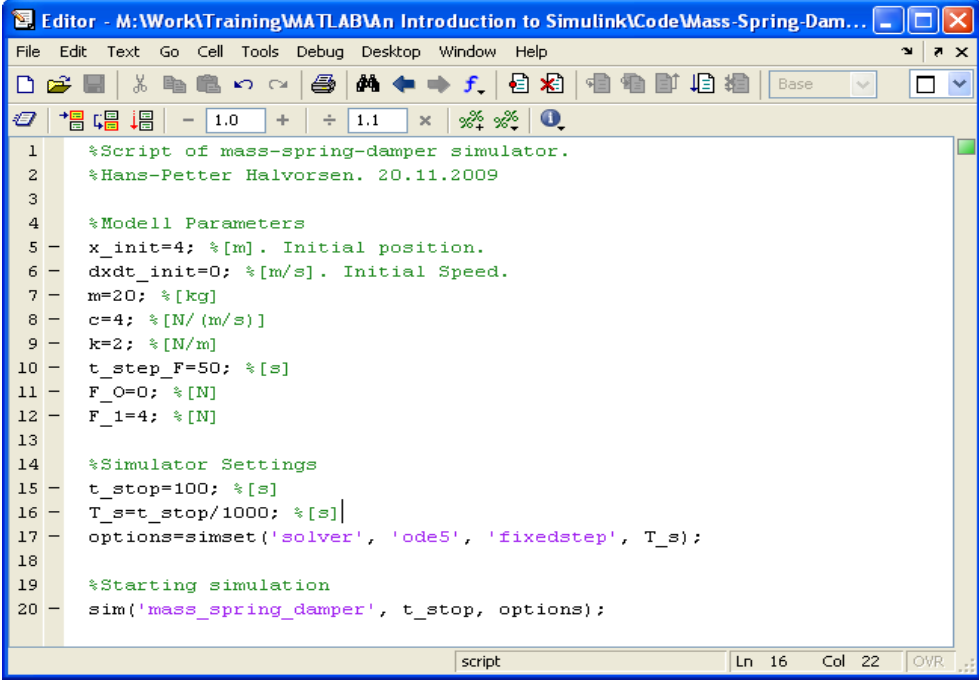
Adım 4: Şekil 2.49'daki gibi simülasyon parametreleri yapılandırıldı. Ek açıklamalar tasarlanmış model hakkında metinsel bilgi ekler. Blok diyagramımızın herhangi bir boş alanına bir açıklama eklenebilir. Ayrıca modelimizde bir sinyal etiketi oluşturmak için, bir çizgi parçasına çift tıklayarak ekleme noktasına etiketi yazabiliriz.



Şekil 2.49. Simülasyon parametrelerinin yapılandırılması

Birçok simülasyon parametresi seçeneği vardır, Simulink'e simülasyonu gerçekleştirmek için hangi zaman dilimi üzerinde olduğunu söyleyen Başlangıç zamanı ve Durma zamanı ile ilgileniriz. Başlangıç saatini 0,0'da tutup ve Durma süresini 10,0'dan 1000,00'e değiştiririz. Ardından, Max adım boyutunu değiştireceğiz. Maks. Adım boyutunu otomatik olarak 0,001 olarak değiştiririz. Tamam'ı tıklararak ve simülasyonu çalıştırırız. Scope, kapsam bloğu, girişini simülasyon zamanına göre gösterir. Scope bloğu birden fazla eksene sahip olabilir; tüm eksenler ortak bir zaman aralığına sahiptir. Scope penceresini taşıyabilir ve yeniden boyutlandırabiliriz. Ayrıca, Scope'un parametre değerlerini simülasyon sırasında değiştirebiliriz.

Simulink'imizi oluşturmak ve simülasyonu Matlab M-File'dan yapılandırabiliriz ve çalıştırabiliriz. M-File dosyası Şekil 2.50'deki gibi gösterilebilir.



```

1 %Script of mass-spring-damper simulator.
2 %Hans-Petter Halvorsen. 20.11.2009
3
4 %Modell Parameters
5 x_init=4; %[m]. Initial position.
6 dxdt_init=0; %[m/s]. Initial Speed.
7 m=20; %[kg]
8 c=4; %[N/(m/s)]
9 k=2; %[N/m]
10 t_step_F=50; %[s]
11 F_0=0; %[N]
12 F_1=4; %[N]
13
14 %Simulator Settings
15 t_stop=100; %[s]
16 T_s=t_stop/1000; %[s]
17 options=simset('solver', 'ode5', 'fixedstep', T_s);
18
19 %Starting simulation
20 sim('mass_spring_damper', t_stop, options);
  
```

Şekil 2.50. M- File dosyası

M-File dosyasında atıfta bulunduğunuz değişkenler, her blok için Parametre penceresindeki Sabit değer alanına ayarlanır. En çok kullanılan komutlar simset ve sim komutlarıdır. Simulink modelimizi bir m-file den yapılandırır ve çalıştırırız bu komutları kullanırız. Simülasyon parametrelerinizi ve simülasyonu çalıştırmak için sim komutunu yapılandırmak için simset komutunu kullanabiliriz.

2.4.2. Uygulama Sonuçlarının Analizi

Tez çalışması, verilerin hazırlanması, bulanık mantık uygulaması ve karar sonuçlarını değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Çalışmanın son bölümü olan karar sonuçlarının değerlendirmesi aşamasında ilk olarak tasarlanan bulanık tabanlı karar sisteminin Matlab / Simulink modeli geliştirildi, ikinci aşamada ise bu modelin hesaplanan veriler üzerinde uygulanmasını sağlanarak sonuçları analiz edildi.

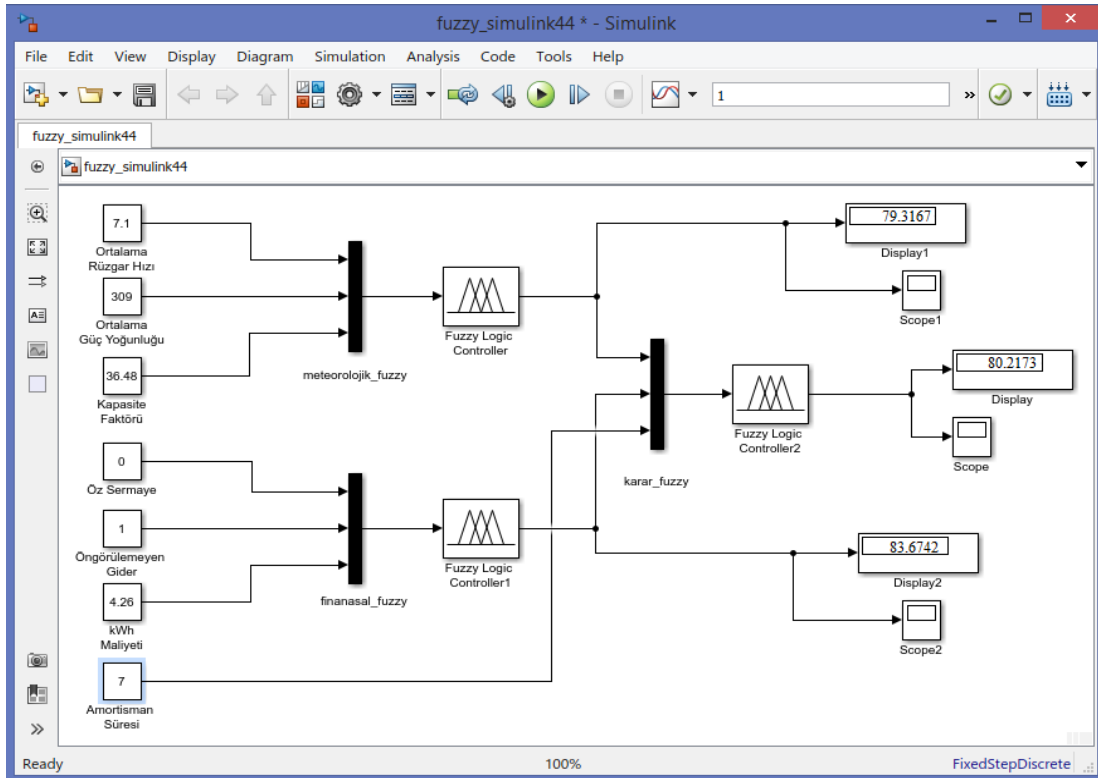
Analiz çalışmasında kullanılacak meteorolojik ve finansal giriş parametreleri verilerin analizi kısmında hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada meteorolojik_fuzzy sisteminde giriş birimi olarak kullanılacak ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu ve kapasite faktörünün hesaplanması için OMGI'den alınan 10 m yükseklik ve 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgar hız ve yön verilerinin WAsP yazılımı ile analiz edilesi sonucu ortalama rüzgar hızını 2,75 m/s, ortalama güç yoğunluğu 53 W/m², k şekil parametresi 1.51 ve c ölçek parametresi 4,2 m/s olarak bulunmuştur.

Çalışmada WAsP kütüphanesinde bulunan VESTAS V80 rüzgar türbini kullanılmıştır. Bu türbinin göbek yüksekliği 80 m olduğundan 10 m için hesaplanan değerlerin 80 m yükseklik için pürüzlülük özelliği de dikkate alınarak yeniden hesaplanması sağlanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 80 m yükseklikte ortalama rüzgar hızını **7,1 m/s**, ortalama güç yoğunluğu **309 W/m²**, şekil parametresi 1.67 ve ölçek parametresi 6,87 m/s olarak bulunmuştur.

Tasarlanan 12 MW lık kurulu güce sahip rüzgar santralinin 24*365= 8760 saat çalışması durumunda 8760*12 MW nominal güçte üretilebilecek enerji miktarı 105,120 GWh olarak hesaplanmıştır, 12 MW'lık kurulu güç için WAsP yazılımı ile yıllık hesaplanan üretim miktarını 38,352 GWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak kapasite faktörünü $38,352 / 105,120 = 0,3648$ yani **%36.48** olarak hesaplarız.

Yapılan çalışmada finansal_fuzzy ve karar_fuzzy sisteminde giriş birimi olarak kullanılacak KWh başına maliyet ve amortisman süreleri 12 MW kurulu güçteki tesisin hesaplanan % 36,48 kapasite faktörü kullanılarak üretilen enerjinin KWh başına maliyeti **4,26 € c / KWh** olarak bulunmuştur. Çalışmada planlanan 12 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santralinden elde edilen elektriğin 5.5 €cent/kWh üzerinden satılması durumunda, projenin kendini **7. senede amorti** ettiği görülmektedir. Yapılan çalışmada öz sermaye ve öngörülemeyen giderler kurulu sistemler baz alınarak öz sermaye **% 0** ve öngörülemeyen gider % 1 olarak alınmıştır.

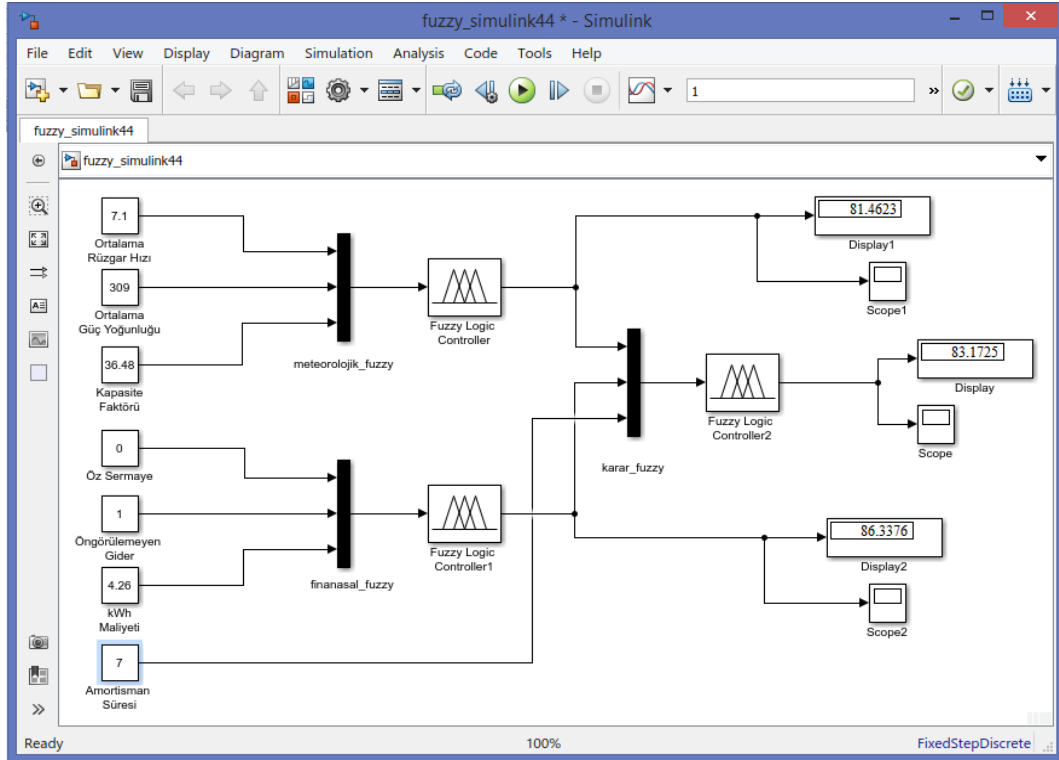
Çalışmada üç analiz yapılmıştır birinci analiz literatür taraması ve uzman görüşü alınarak hazırlanan kural tabanlarından oluşan sistemin analizi, ikincisi Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilen kural tabanlarından oluşan sistemin analizi, üçüncüsü ise mevcut kurulu Karova RES parametreleri ile yapılan analizdir. Şekil 2.51'de hesaplanan giriş değerlerine göre optimize edilmemiş sistemin ürettiği değerler gösterilmiştir.



Şekil 2.51. Optimize edilmemiş sistem analizi

Optimize edilmemiş sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 79, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 83 ve sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise yaklaşık olarak % 80 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 2.52'de Genetik Algoritma optimizasyon algoritması kullanılarak yapılan iyileştirme sonucu elde edilen kural tabanlarından oluşan sistemin ürettiği değerler gösterilmiştir. Optimize edilmiş sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 81, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 86 ve sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise yaklaşık olarak % 83 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.52. Optimize edilmiş sistem analizi

Genetik Algoritma ile optimize edilen kural tabanları incelendiğinde özellikle sistemin alt ve üst sınır değerlerinde anlamlı değişiklikler olduğunu söyleyebiliriz. Bu değer aralıkları alt sınırdaki %10- 30 aralığında üst sınırdaki ise % 70-90 aralığında olduğu gözlenmektedir. Bir rüzgar santralının kurulumu için kurulum faktörünü % 70 olarak belirledik. Bu nedenle alt sınırdaki değişiklikler santral kurulumuna etkisi olmamakla birlikte üst sınırdaki değişiklikler kurulum faktörünü ciddi oranda etkilemektedir.

Optimize edilmiş sistemde özellikle üst sınırdaki meydana gelen değişikliklerin bulanık kural tabanları ve kurulum faktörü üzerinde de anlamlı değişimler yaptığını söyleyebiliriz. Genetik Algoritma kullanılarak optimize edilmiş olan sistemin insan temelli ve deneme yanılma gibi işlemlerle oluşturulacak tanımlamalardan doğacak sıkıntıları çözmek ve sistemin iyileştirilmesi için daha faydalı ve rasyonel olduğunu söyleyebiliriz.

Çalışmada gerçekleştirilen üçüncü analiz Karova Rüzgar Enerji Santrali (30 MWe / 30,15 MWm) uygulaması için gerçekleştirilmiştir. Muğla ili Bodrum İlçesi, Çelin dağı, Atalan tepe, Bahçekuyu tepe, Büyükuşça tepe, Akdağ mevkiinde yer alan RES 110 Milyon TL proje bedeline sahiptir. Karova RES, 2,85 MW gücünde 7 adet ve 1,7 MW gücünde 6 adet (toplam kurulu gücü 30,15 MW) rüzgar türbini içerecektir.

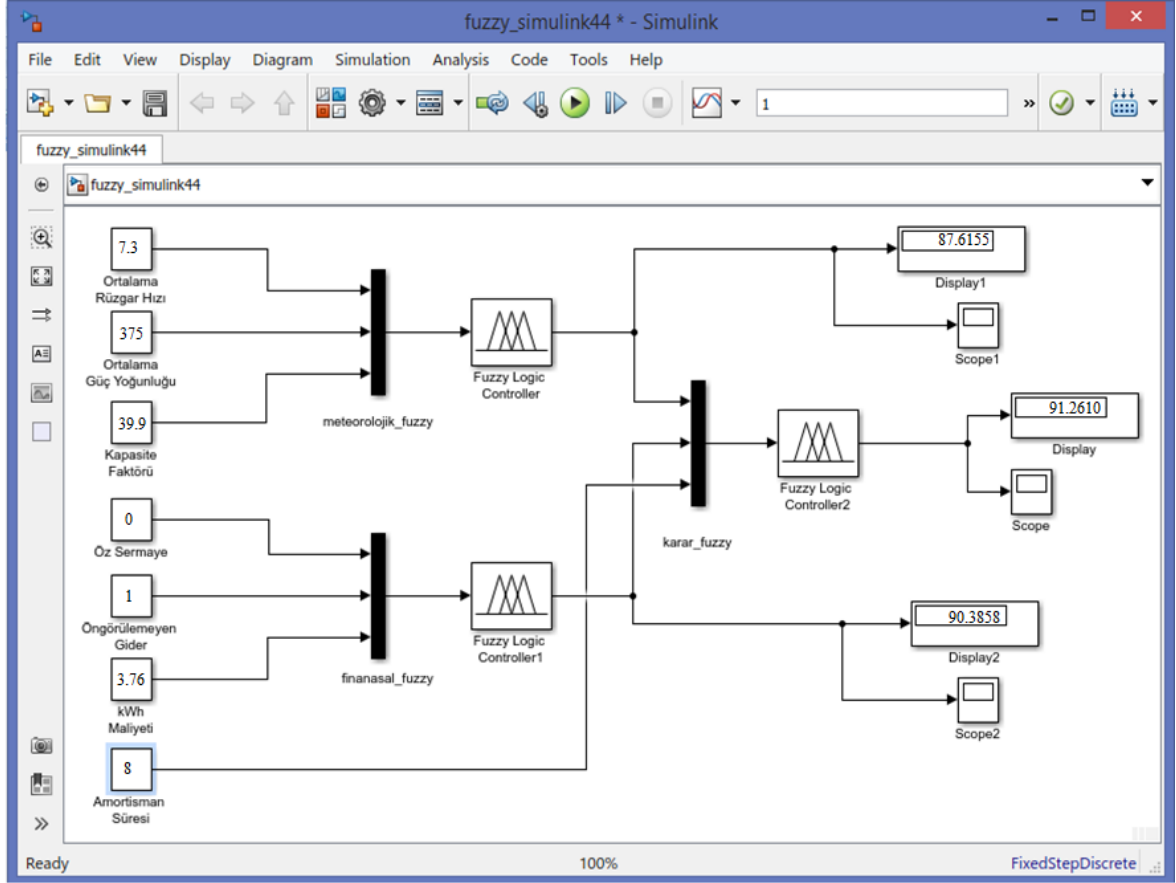
Rüzgar Yönü ve Hızı Rüzgar (hız ve yön) verileri proje sahasına kurulmuş olan 2 adet istasyonda kaydedilen değerlerden alınmıştır. Bu istasyonlar St359 ve S427 olarak adlandırılmışlardır. Bölgede rüzgar ölçümleri her ili istasyonda da Haziran 2010 tarihinden itibaren yapılmıştır. Yaklaşık 3,9 yıl periyodu boyunca (06.2010 - 05 2014) elde edilen verilere göre, bölgedeki rüzgar hızı 60,5 m yüksekliğe 560509 D/4102385K koordinatlarına kurulan St359 istasyonunda 6,1 m/s ve 86 m yüksekliğe 557952D74100385K koordinatlarına kurulan St427 istasyonunda 7,3 m/s olarak ölçülmüştür.

Mevcut kurulu gücü ile üretebileceği yıllık azami üretim miktarı 122.500.000kWh/yıl ve Kapasite Faktörü %39,9 olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.25'de kurulu RES'ne ait ilk kurulum maliyetine ilişkin finansal veriler verilmiştir.

Tablo 2.25. Karova RES ilk kurulum maliyeti

RES Kurulum Maliyeti	
Türbin Ekipman	71.973.933 TL
Türbin Montaj	3.232.425 TL
Elektrik	10.215.163 TL
İnşaat	12.358.251 TL
Lojistik	4.074.426 TL
Enerji Nakil Hattı	1.550.000 TL
Diğer	6.380.490 TL
TOPLAM	109.784.688 TL

Şekil 2.53'de mevcut kurulu Karoava RES santrali parametreleri kullanılarak analiz edilen sistemin ürettiği değerler gösterilmiştir. Kurulu sistem sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 87, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 90 ve sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise yaklaşık olarak % 91 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.53. Kurulu RES sistemi analizi

Mevcut kurulu RES sistemi analizinde tasarlanan sistemin ürettiği değer ile RES fizibilite raporunda öngörülen başarımlar düzeyinin benzeştiği görülmektedir. Uygulama sonucu elde edilen bulgular tasarlanan modelin rüzgar santrali kurulumunda kullanılmasının etkili ve yararlı bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Çok kriterli karar verme teknikleri arasında Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, karar verme problemlerinde kullanılan pek çok diğer yöntemle göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Yapılan çalışmada bulanık kural tabanının genetik algoritma ile optimizasyonu sonucu elde edilen bulanık karar sisteminin, konuyla ilgili uzman kişilerin görüş ve değerlendirmelerine dayanan, en doğru sonuca varmak için, insani düşünme biçiminden kaynaklanan belirsizliği de hesaba katan bulanık AHP yöntemi ne bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

3.SONUÇLAR

Günümüze kadar rüzgar santrali kurulumu için genel kabul görmüş bir skalanın olmaması, değerlendirme sonuçlarının değerlendirmeyi gerçekleştiren kişilere ve kurumlara göre farklılıklar göstermesine sebep olmaktadır. Bu amaçla bu tez çalışmasında rüzgar santrallerinin kurulumu için gerekli parametrelerin tespiti ve ölçeklendirmesi sağlanılarak karar verme aşamasında temel teşkil edecek bulanık tabanlı bir karar sistemi tasarlanmıştır. Böylelikle proje geliştiriciler, karar vericiler, dağıtım şirketleri, rüzgar enerji santrali işletmecileri, rüzgar enerji santrali kurmayı planlayan girişimciler ile rüzgar enerjisi konusunda araştırmalar yapan araştırmacıların ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenmiştir.

Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli 48.000 MW olarak hesaplanmıştır. 2017 yılı sonu itibarıyla 6.516 MW toplam kurulu güce sahip 207 adet Rüzgâr Enerji Santrali (RES) devrede olup Türkiye toplam kurulu gücünün %7,6'sına karşılık gelmektedir. Bu bilgi bize rüzgar enerjisi alanında yapılan çalışmaların daha başında olduğumuzu göstermektedir. Tez çalışması sonucu tasarlanan karar sisteminin kullanımı ile henüz değerlendirilmemiş % 92,4'lük potansiyelin daha verimli ve rasyonel kullanılacağı düşünülmektedir.

Tez çalışması meteorolojik ve finansal verilerin hazırlanması ve analiz edilmesi, bulanık karar sisteminin tasarlanması ve sistemin Matlab/Simulink modelinin tasarlanarak uygulama sonuçlarının analiz edilmesi şeklinde üç aşamadan oluşmaktadır. Rüzgar türbini kurulumu birçok disiplinin birleşmesinden oluşan oldukça geniş ve kompleks bir sistemdir. Sistem bulanık kümeler, bulanık kurallar, bulanık çıkarım işlemleri, Matlab/Simulink model tasarımı gibi birçok aşamayı kapsamaktadır. Geliştirilen sisteme ilişkin sonuçlar kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Meteorolojik Parametrelerin Belirlenmesi ve Analizi İşlemleri:

- Parametrelerin analizi rüzgar hız verilerinin 2 parametrelili Weibull dağılımına uyduğu varsayımıyla analiz yapan WAsP yazılımı ile ortalama rüzgar hızı, güç yoğunluğu ve kapasite faktörü hesaplanmıştır.
- OMGI'den alınan 10 m yükseklik ve 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgar hız ve yön verilerinin analiz edilesi sonucu ortalama rüzgar hızını 2,75 m/s, ortalama güç

yoğunluğu 53 W/m^2 , k şekil parametresi 1.51 ve c ölçek parametresi 4,2 m/s olarak bulunmuştur.

- Çalışmada WAsP kütüphanesinde bulunan VESTAS V80 rüzgar türbini kullanılmıştır. Bu türbinin göbek yüksekliği 80 m olduğundan 10 m için hesaplanan değerlerin 80 m yükseklik için pürüzlülük özelliği de dikkate alınarak yeniden hesaplanması ortalama rüzgar hızını $7,1 \text{ m/s}$, ortalama güç yoğunluğu 309 W/m^2 , şekil parametresi 1.67 ve ölçek parametresi $6,87 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.
- Tasarlanan 12 MW lık kurulu güce sahip rüzgar santralinin $24 \times 365 = 8760$ saat çalışması durumunda $8760 \times 12 \text{ MW}$ nominal güçte üretilebilecek enerji miktarı $105,120 \text{ GWh}$ olarak hesaplanmıştır, 12 MW'lık kurulu güç için WAsP yazılımı ile yıllık hesaplanan üretim miktarını $38,352 \text{ GWh}$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar kullanılarak kapasite faktörünü $38,352 / 105,120 = 0,3648$ yani %36.48 olarak hesaplanmıştır.

Finansal Parametrelerin Belirlenmesi ve Analizi İşlemleri:

- 12 MW kurulu güçteki tesisin hesaplanan % 36,48 kapasite faktörü kullanılarak üretilen enerjinin KWh başına maliyeti $4,26 \text{ € c / KWh}$ olarak bulunmuştur.
- Çalışmada planlanan 12 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santralinden elde edilen elektriğin 5.5 €cent/kWh üzerinden satılması durumunda, projenin kendini 7. senede amorti ettiği hesaplanmıştır.

Bulanık Küme İşlemleri:

- Çalışmada ilk olarak dilsel değişkenler tanımlanarak giriş değerlerine verilen derecelerle üyelik fonksiyonları hazırlanmış ve kesin olarak tanımlanan değerler üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değerlere dönüştürme işlemi yapılmıştır.
- Tasarlanan sistemde üçgen, yamuk ve gaussian üyelik fonksiyonlarının sisteme etkisi incelenmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde , sonuçlar arasında çok büyük farklılıklar olmayıp, üçgen-trapezoid üyelik fonksiyon tipindeki üyelik fonksiyonunun aranılan adım cevabı kriterlerine daha yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür.
- α - kesme tekniği ile üyelik fonksiyonlarının evrensel küme üzerinde esnek değer aralıklarının belirlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle farklı α kesim katsayıları için normal değer komşulukları ve belirlenen adım değerleri için düzeltilmiş komşuluklar

hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan yararlanılarak üyelik fonksiyonları değer aralıkları çevresindeki birikimlerin niteliğine göre α kesme katsayısını seçilebileceği ve sistem için en doğru değer aralıklarının hesaplanması sağlanmıştır.

Bulanık Kural Tabanı İşlemleri:

- Tasarlanan sistemde literatür taraması ve uzman görüşü ile hazırlanmış ve her biri 180 kuraldan oluşan 3 farklı bulanık kural tabanı hazırlanmıştır.
- Daha çok deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen kural hazırlama işlemi sadece spesifik yani özel bir uygulamaya ait olmakta ve genelleme şansı pek mümkün olmamaktadır. Çalışmada uzman görüşü ve literatür taraması sonucu hazırlanmış olduğumuz kural tabanını genetik algoritma tekniğiyle optimizasyonunu sağlayarak insan temelli hataları minimize edilmesi sağlandı.

Bulanık Çıkarım İşlemleri:

- İlk olarak meteorolojik_fuzzy sistemi tasarlanmıştır. Sisteme etki edeceği düşünülen Hellmann katsayısı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, weibull c ve weibull k parametreleri, güç yoğunluğu, yıllık üretim, wake (iz) kaybı ve kapasite faktörü parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri incelenmiş ve giriş birimi olarak ortalama rüzgar hızı, ortalama güç yoğunluğu ve kapasite faktörü belirlenmiştir.
- İkinci olarak finans_fuzzy sistemi tasarlanmıştır. Aynı şekilde sisteme etki edeceği düşünülen kWh maliyeti, ilk kurulum maliyeti, hurda bedeli, öngörülemeyen gider, enflasyon, faiz oranı, proje ömrü ve öz sermaye parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi incelenmiş ve giriş birimi olarak ilk kurulum maliyeti, öngörülemeyen gider ve kWh maliyeti belirlenmiştir.
- Üçüncü olarak ise meteorolojik ve finansal parametrelerin birlikte değerlendirileceği ve çıkış biriminin kurulum faktörü olarak kullanılacağı karar_fuzzy sistemi tasarlanmıştır.
- Tasarlanan bulanık tabanlı karar sisteminde kullanacağımız çıkarım modelinin belirlemek için Mamdani ve Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleri geliştirilmiş ve bu iki çıkarım sisteminin sonuçları karşılaştırılmıştır. Modeller incelendiğinde sonuçlar arasında çok büyük farklar olmayıp benzer şekilde çalıştığı görülmüştür. Ancak Sugeno tipi FIS modeli kullanımında çıktı değeri olan uygunluk faktörünün daha

yüksek değerleri gördüğü ve sistemin tam kapasitede çalışmasına olanak sağladığı görülmüştür. Bu iki çıkarım yöntemi arasındaki temel farkın netleştirme aşamasında olduğu belirlenmiştir.

Karar Sonuçlarının Analiz İşlemi:

- Sistemin Matlab/Simulink modeli tasarlanarak uzman sistem tabanlı ve Genetik Algoritma tabanlı kural tabanlarının simülasyonu sağlanmıştır. Optimize edilmemiş sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer % 79.3167, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer % 83.6742 ve sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise % 80.2173 olarak hesaplanmıştır. Optimize edilmiş sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer % 81.4623, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer % 86.3376 ve sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise % 83.1725 olarak hesaplanmıştır.
- Genetik Algoritma ile optimize edilen kural tabanları incelendiğinde özellikle sistemin alt ve üst sınır değerlerinde anlamlı değişiklikler olduğunu söyleyebiliriz. Bu değer aralıkları alt sınırdaki %10- 30 aralığında üst sınırdaki ise % 70-90 aralığında olduğu gözlenmektedir. Bir rüzgar santralinin kurulumu için kurulum faktörünü % 70 olarak belirledik. Bu nedenle alt sınırdaki değişiklikler santral kurulumuna etkisi olmamakla birlikte üst sınırdaki değişiklikler kurulum faktörünü ciddi oranda etkilemektedir.
- Optimize edilmiş sitemde özellikle üst sınırdaki meydana gelen değişikliklerin bulanık kural tabanları ve kurulum faktörü üzerinde de anlamlı değişimler yaptığını söyleyebiliriz. Genetik Algoritma kullanılarak optimize edilmiş olan sitemin insan temelli ve deneme yanılma gibi işlemlerle oluşturulacak tanımlamalardan doğacak sıkıntıları çözmek ve sistemin iyileştirilmesi için daha faydalı ve rasyonel olduğunu söyleyebiliriz.
- Mevcut kurulu Karoava RES santrali parametreleri kullanılarak analiz edilen sistemin ürettiği değerler gösterilmiştir. Kurulu sistem sistem analizinde meteorolojik_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 87, finansal_fuzzy bulanık kural tabanının ürettiği değer yaklaşık olarak % 90 ve

sonucunun aynı zamanda kurulum faktörü olarak kullanılacak olan karar_fuzzy sisteminin ürettiği değer ise yaklaşık olarak % 91 olarak hesaplanmıştır. Mevcut kurulu RES sistemi analizinde tasarlanan sistemin ürettiği değer ile RES fizibilite raporunda öngörülen başarımlar düzeyinin benzeştiği görülmektedir.

Çok kriterli karar verme teknikleri arasında Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, karar verme problemlerinde kullanılan pek çok diğer yöntemlere göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Yapılan çalışmada bulanık kural tabanının genetik algoritma ile optimizasyonu sonucu elde edilen bulanık karar sisteminin, konuyla ilgili uzman kişilerin görüş ve değerlendirmelerine dayanan, en doğru sonuca varmak için, insani düşünme biçiminden kaynaklanan belirsizliği de hesaba katan bulanık AHP yöntemi ne bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın literatüre kattığı en önemli özellik bir çok farklı disipline ait parametrelerin ve yöntemlerin birlikte kullanımı ile komplike bir rüzgar türbini kurulumu karar sisteminin tasarlanmasıdır. Bu güne kadar yapılan çalışmalar daha çok meteorolojik parametrelerin belirlenmesi ve maliyet analizi şeklinde olup nihai sonuçta rüzgar santralinin kurulumuna dair bir karar verme şeklinde gerçekleşmemiştir. Uygulama safhasında verilecek kararları teknik ve bilimsel bir zemine oturtmak önemli bir zorunluluktur. Uygulama sonucu elde edilen bulgular tasarlanan modelin rüzgar santrali kurulumunda kullanılmasının etkili ve yararlı bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

4.ÖNERİLER

Rüzgar türbinleri kurulumu üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla meteorolojik parametrelerin hesaplanması ve maliyet analizi üzerine yapılmıştır. Bu çalışmaların bir çoğunda meteorolojik parametrelere etki eden topografya bilgisi, pürüzlülük bilgisi, yakın engel bilgisi gibi çok önemli unsurlar ile finansal parametrelere etki eden özellikle ilk kurulum maliyetini belirleyen faiz oranı, enflasyon oranı, hurda bedeli gibi unsurlar bulunmamaktadır. Ayrıca yapılan hesaplamaları değerlendirecek bir mekanizmada olmadığından karar süreci tamamen karar vericinin inisiyatifine bırakılmıştır. Bu nedenle yapılan hesaplamalar tam anlamıyla gerçeği yansıtmayacağından proje geliştiricilerin ve yatırımcıların genel resmi görebilmelerini, olası teknik ve ticari riskleri baştan belirlemelerini zora sokacaktır.

Yapılan tez çalışmasında verilerin belirlenmesi ve analiz edilmesi WAsP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. WindPRO, WindFarmer, Windographer, Homer, Retscreen, WindSim yazılımları vasıtasıyla rüzgar enerji potansiyeli hesaplaması yapılabilir. Karar sistemi için insanın karar verme ve muhakeme yeteneğini modelleyen bulanık mantık sistemi kullanılmıştır. Bunun en önemli sebeplerinden biri türbin firmalarının yatırım fiyatlarının gizli tutulması ilkeleri gereğince rüzgar enerjisi alanında veri elde etmenin zorluğudur. İleriki aşamalarda rüzgar santrali verilerinin bulunduğu uluslar arası veri tabanları oluşturulursa yapay sinir ağları gibi diğer yapay zeka teknikleri veya hibrid sistemler kullanılabilir.

Çalışmada sistemin denetiminde üçgen, yamuk ve gaussian üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık mantık denetleyicileri ayrı ayrı uygulanmış her üyelik fonksiyonunun sisteme olan etkileri incelenmiş ve en uygun üyelik fonksiyonunun hangisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Çan eğrisi, Sigmoidial, S üyelik fonksiyonu ve Π üyelik fonksiyonları da uygulanabilir.

Yapılan çalışmada üyelik fonksiyonu değer aralığı belirlenirken α -kesme tekniği uygulanarak en iyi değer aralığı seçilecek α katsayısına göre hesaplanmıştır. Genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, yapay arı kolonisi, yapay sinir ağları, benzetim tavlama, yasak arama gibi optimizasyon yöntemleri ile de belirlenebilir.

Bulanık kural tabanlarının insan temelli ve deneme yanılma gibi işlemlerle oluşturulacak tanımlamalardan doğacak sıkıntıları çözmek ve sistemin iyileştirilmesi için bir arama algoritması olan genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, yapay arı kolonisi, yapay sinir ağları, benzetim tavlama, yasak arama gibi optimizasyon yöntemleri ile de iyileştirmeler yapılabilir. Çıkarım modeli olarak en çok kullanılan ve Matlab yazılımında da yer alan mamdani ve sugeno yöntemleri denenmiştir. Ayrıca Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemleri de denenebilir.

Rüzgar türbini kurulumunda karar aşaması için tasarlanan bulanık tabanlı karar sistemi güneş enerji santralleri, biyokütle, jeotermal ve deniz kökenli gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulumunda karar aşaması içinde tasarlanabilir. Tez çalışması daha önceki rüzgar santrali kurulumu çalışmalarının tümü göz önüne alındığında baştan sona bir rüzgar santrali kurulum tasarımı geliştirmek için yeterli akademik alt yapı çalışması yapılmıştır. Böylelikle proje geliştiriciler, karar vericiler, dağıtım şirketleri, rüzgar enerji santrali işletmecileri, rüzgar enerji santrali kurmayı planlayan girişimciler ile rüzgar enerjisi konusunda araştırmalar yapan araştırmacıların ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Karagöl, E., T. ve Kavaz, İ., Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji, Analiz, 197 (2017) 7-30.
2. International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap: Wind Energy, Paris, 2013.
3. [http://www.enerjiatlası.com/ruzgar/Rüzgar Enerji Santralleri](http://www.enerjiatlası.com/ruzgar/Rüzgar_Enerji_Santralleri). 23.01.2018.
4. Yalçın, Y., İstanbul Terkos Bölgesi'nde Kurulması Planlanan Bir Rüzgar Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Potansiyeli, Kurulum Maliyeti ve Geri Ödeme Süresinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2010.
5. Talayoğlu, S., Denizli İlinin Tavas İlçesine Ait Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanması ve Ekonomik Analiz, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2010.
6. Güzel, B., Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2012.
7. Yalçın, U., Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanarak Rüzgar Enerjisi Santral Yeri Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
8. Ceylan, M., Muğla Bölgesi'nde Mermer Endüstrisinin Elektrik Enerjisi Talebini Karşılama İçin, Matlab Paket Programı ile Rüzgar Çiftliği Tasarım Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2006.
9. Özcan, İ., Isparta İlinde Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011.
10. Koyuncu, E., Yeni matematiksel kod; bulanık mantık, Teknolojist, 1 (2004) 5-7.
11. Işıklı, Ş., Bulanık Mantık ve Bulanık Teknolojiler, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Felsefe Bölümü Dergisi, 19 (2008) 105-126.
12. Türkbey, O., Makine Sıralama Problemlerinde Çok Amaçlı Bulanık Küme Yaklaşımı, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 18, 2 (2003) 63-77.
13. Zadeh, L.A., Fuzzy Logic, , University of California, April 1988, Barkley, 83-93.

14. Zadeh, L.A., Fuzzy Logic = Computing with Words, IEEE Transactions On Fuzzy Systems, 4, 2 (1996) 103-111.
15. Shimoda, M., A Natural Interpretation of Fuzzy Sets and Fuzzy Relations, Fuzzy Sets and Systems, 128, 2 (2002) 135–147.
16. Vrusias, L.B., Fuzzy Logic. Artificial Intelligence Lectures Notes, London, 2005.
17. Altaş, İ.H., Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı, Bileşim Yayıncılık, Enerji, Elektrik, Elektromekanik- 3e, 62 (1999) 80–85.
18. Metaxiotis, K., Psarras, J. and Samouilidis, E., Integrating Fuzzy Logic into Decision Support Systems: Current Research and Future Prospects, Information Management & Computer Security, 11, 2 (2003) 53-59.
19. Baykal N. ve Beyan T., Bulanık Mantık İlke ve Temelleri, 413 ss., Bıçaklar Kitabevi, Ankara, 2004.
20. Zadeh, L.A. and Kacprzyk, J., Fuzzy Logic for The Management of Uncertainty, . 676 pp, John Wiley&Sons Inc, Newyork, 1992.
21. Sivanandam, S.N., Sumathi, S. and Deepa, S.N., 2007, Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, 430 pp, 1nd Edition, Springer, Berlin, 2007.
22. Bojadziev G., Bojadziev M., Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications, 283 pp, World Scientific, London, 1991.
23. Bai, Y. and Wang, D., Fundamentals of Fuzzy Logic Kontrol-Fuzzy Sets,Fuzzy Rules and Defuzzifications, Advanced Fuzzy Logic Technologies InIndustrial Applications, Springer, London, 2006.
24. Lee, C.C., Fuzzy logic in control system: fuzzy logic controller, IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, 20, 2 (1990) 404-435.
25. Akcayol, M.A., Bulanık Mantık Denetimli Katodik Koruma Devresi Tasarımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17, 1 (2004) 111-127.
26. Mamdani, E.H., “Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems”, IEEE Trans.on Comput., 26, 2 (1977) 1182-1191.
27. Yılmaz, M. ve Arslan, E., Bulanık Mantığın Jeodezik Problemlerin Çözümünde Kullanılması. 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 2005, İstanbul, 512- 522.
28. Elmas, Ç., Yapay Zekâ Uygulamaları, Seçkin Yayınları, Ankara, 2007.
29. Frandsen, S., and Christensen, C. J., Accuracy of Estimation of Energy Production from Wind Power Plants, Wind Engineering, 16, 5 (1992) 257-268.
30. Freris, L. L., Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall International, 1990,

New Jersey, 97, ISBN: 0-13-960527-4 .

31. Özgür, M.A., Review of Turkey's renewable energy potential, Renewable Energy, 33, 11 (2008) 2345-2356.
32. İlkılıç, C., Rüzgar Enerjisinin Mekanik Enerjiye Dönüştürülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1990.
33. <http://www.elektrikport.com/> Rüzgar Enerjisinin Gelişimi ve Tarihi. 17.02.2018.
34. Çağlar, M., Canbaz, M., Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Ekim 2002, İstanbul.
35. Global Wind Energy Council (GWEC), Global Wind Statistics 2016, Brussels, 2017.
36. Şenel, M. C., Koç, E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makina, 56, 663 (2015) 46-56.
37. http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/RGI_AYLIK_HIZLAR.xls. 14.03.2018
38. http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx. 14.03.2018
39. İlkılıç, C., Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012) 1165-1173.
40. Danish Wind History, Danish Wind Turbine Manufacturers Association Wind Power, 1999.
41. Nurbay, N., Çınar, A., Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim 2005, Mersin, 164-168.
42. Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Yekarum e-Dergi, 2, 3 (2014) 1-14.
43. [https://egitim448.wordpress.com/Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması](https://egitim448.wordpress.com/Rüzgar-Türbinlerinin-Sınıflandırılması). 27.01.2018.
44. Kavsaoğlu, M., Ş., Rüzgar Enerjisi ve Sistemleri Ders notları, İ.T.Ü. Uçak Uzay Fakültesi, İstanbul, 2008.
45. Walker, J., F., Jenkins, N., Wind Energy Technology, 178 Page, Edition 1, John Willey & Sons, England, 1997.
46. Kovac-Andrić, E., Radanović, T., Topalović, I., Marković, B. and Sakać, N., Temporal variations in concentrations of ozone, ~ nitrogen dioxide, and carbon monoxide at Osijek, Croatia, Advances in Meteorology, 2013, 469786 (2013) 1-7.

47. Pearce, J. L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman R. J. and Tapper, N. J., Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models, Atmospheric Environment, 45, 6 (2011) 1328–1336.
48. <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>. Rüzgar Atlası. 9 Mart 2018.
49. Kissi, M., Ramdani, M., Tollabi M. and Zakarya, D., Determination of fuzzy logic membership functions using genetic algorithms: application to structure-odor modeling, Journal of Molecular Modeling, 10, 5-6 (2004) 335-341.
50. Kim, J.W., Kim, B.M. and Kim, J.Y., Genetic algorithm simulation approach to determine membership functions of fuzzy traffic controller, Electronics Letters, 34, 20 (1998) 192- 198.
51. Mondelli, G., Castellano, G., Attolico, G. and Distanto, C., Parallel genetic evolution of membership functions and rules for a fuzzy controller, High-Performance Computing and Networking Lecture Notes in Computer Science, 1401 (1998) 922-924.
52. Kim, J.H., Seo, J. Y. and Kim, G.C., Estimating membership functions in a fuzzy network model for part-of-speech tagging, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 4, 4 (1996) 309-320.
53. Singpurwalla, N.D., Membership functions and probability measures of fuzzy sets – Rejoinder, Journal of the American Statistical Association, 99, 467 (2004) 884-889.
54. Lindley, D. V., “Membership functions and probability measures of fuzzy sets – Comment,” Journal of the American Statistical Association, 99, 467 (2004) 877-879.
55. Simon, D., Sum normal optimization of fuzzy membership functions,” International Journal of Uncertainty fuzzyness and Knowledge-Based Systems, 10, 4 (2002) 363-384.
56. Sancho-Royo, A. and Verdegay, J.L., Methods for the construction of membership functions, International Journal of Intelligent Systems, 14, 12 (1999) 1213-1230.
57. Inoue, H., Kamei, K. and Inoue, K., Automatic generation of fuzzy rules using hyper-elliptic-cone membership functions by genetic algorithms, Journal Of Intelligent & Fuzzy Systems, 6, 1 (1998) 65-81.
58. Kim, M.W., Ryu, J. W., Kim, S. and Lee, J.G., Optimization of fuzzy rules for classification sing genetic algorithm, Advances in Knowledge Discovery and Data Mining Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2637 (2003) 363-375.
59. Pal, T., Pal, N.R. and Pal, M., Learning fuzzy rules for controllers with genetic algorithms, International Journal of Intelligent Systems, 18, 5 (2003) 569-592.

60. De Castro, P.A. and Camargo, H.A., A study of the reasoning methods impact on genetic learning and optimization of fuzzy rules, Advances in Artificial Intelligence - Sbia 2004 Lecture Notes in Artificial Intelligence, 317 (2004) 414-423.
61. Besada-Juez, .M. and Sanz-Bobi, M.A., Extraction of fuzzy rules using sensibility analysis in a neural network, Artificial Neural Networks - ICANN 2002 Lecture Notes in Computer Science, 2415 (2002) 395-400.
62. Jin, Y.C. and Sendhoff, B., Extracting interpretable fuzzy rules from RBF networks, Neural Processing Letters, 17, 2 (2003) 149-164.
63. Leng, G., McGinnity, T.M. and Prasad, G., An approach for on-line extraction of fuzzy rules using a self-organising fuzzy neural network, Fuzzy Sets and Systems, 150, 2 (2005) 211- 243.
64. Wu, S. Q., Er, M. J. and Gao, Y., A fast approach for automatic generation of fuzzy rules by generalized dynamic fuzzy neural networks, IEEE Transactions On Fuzzy Systems, 9, 4 (2001) 578-594.
65. Yin, T.K., A characteristic-point-based fuzzy inference system aimed to minimize the number of fuzzy rules,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 12, 2 (2004) 250-273.
66. Chen, S.M. and Lee, S.W., A new method to generate fuzzy rules from relational database systems for estimating null values, Cybreneticsand Systems, 34, 1 (2003) 33-57.
67. Luciano, A.M., Lauria, D. and Napoli, E., Algorithm for automatic generation of fuzzy rules applied to power system controllers, IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 145, 2 (1998) 161-167.
68. Fahn, C.S., Lan, K. T. and Chern, Z.B., Fuzzy rules generation using new evolutionary algorithms combined with multilayer perceptrons, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46, 6 (1999) 1103-1113.
69. Wan, F., Shang, H.L., Wang, L. X. and Sun, Y. X., How to determine the minimum number of fuzzy rules to achieve given accuracy: a computational geometric approach to SISO case, Fuzzy Sets and Systems, 150, 2 (2005) 199-209.
70. Casillas, J., Cordon, O., De Viana, I. F. and Herrera, F., Learning cooperative linguistic fuzzy rules using the best-worst ant system algorithm, International Journal of Intelligent Systems, 20, 4 (2005) 433-452.
71. Finn, G.D., Learning fuzzy rules from data, Neural Computing & pplications, 8, 1 (1999) 9-24.

72. Chen, S. M., Kao, C. H. and Yu, C.H., Generating fuzzy rules from training data containing noise for handling classification problem, Cybernetics and Systems, 33, 7 (2002) 723-748.
73. Cho, Y., Lee, K., Yoo, J. and Park, M., Autogeneration of fuzzy rules and membership functions for fuzzy modelling using rough set theory, IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 145, 5 (1998) 437-442.
74. Lin C. J. and Ho, W. H., An asymmetrysimilarity- measure-based neural fuzzy inference system, Fuzzy Sets and Systems, 152, 3 (2005) 535- 551.
75. Wu, T. P. and Chen, S. M., A new method for constructing membership functions and fuzzy rules from training examples, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, 29, 1 (1999) 25-40.
76. Halgamuge, S. K., Poechmueller, W. and Glesner, M., An alternative approach for generation of membership functions and fuzzy rules based on radial and cubic basis functions networks, International Journal of Approximate Reasoning, 12, 3-4 (1995) 279-298.
77. <https://daskuza.wordpress.com/> Arapgir Coğrafyası. 23 Mart 2018.
78. <http://www.arapgir.gov.tr/> Coğrafi Durum. 23 Mart 2018.
79. Kim, J. and Yum, B., Selection Between Weibull and Lognormal Distributions: A Comparative Simulation Study, Computational Statistics & Data Analysis, 53 (2008) 477-485.
80. Manwell, J.F., Morgan, J.G., Rogers, A.L., Wind Energy Explained Theory, Design and Application, 1nd Edition, 577 pp, Chichester Wiley, New York, 2002.
81. Rehman, S. and Al-Abbadi, N. M., Wind Shear Coefficients And Their Effect On Energy Production, Energy Conversion and Management, 46 (2005) 2579-2584.
82. Lettau, H., Note On Aerodynamic Roughness- Parameter Estimation On The Basis Of Roughness- Element Distribution, Journal of Applied Meteorology, 8 (1969) 828-832.
83. Akpınar, E.K. and Akpınar, S., An assessment on seasonal analysis of wind energy haracteristics and wind turbine characteristics, Energy Conversion and Management, 46 (2005) 1848-1867.
84. Şenkal, A. and Çetin, N.S., Türkiye’de kurulu olan büyük güçlü rüzgar santrallerinin kapasite faktörlerine genel bir bakış, Ege Bölgesi Enerji Forumu, 2009, Denizli, 40-45.

85. Köse, F. ve Özgören, M., Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgar Türbini Seçimi, Mühendis ve Makine, 46, 551 (2005) 20-30.
86. Özgener, Ö., Türkiye’de ve Dünya’da rüzgar enerjisi kullanımı, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 4, 3 (2002) 159-173.
87. Nielsen, P., Offshore Wind Energy Projects Feasibility Study Guidelines, Seawind - Altener project 4 Ver 3.0., Aalborg, 2003.
88. Camporeale, C., Offshore Wind Farms in Italy: The Sicily Case, Owemes, April 2006, Roma, 1-7.
89. ODE, Study of The Costs of Offshore Wind Generation- A Report to the Renewables Advisory Board (RAB) & DTI, URN NUMBER 07/779, 2007, 7-116.
90. EWEA, Financing and investment trends 2016, Brussels, 2017
91. WINDEUROPE, Wind energy will reduce costs sharply over next five years, IEA report finds, Brussels, 2016.
92. WINDEUROPE, Costs come down again in 1 GW German onshore wind auction, Brussels, 2017
93. WINDEUROPE, Avoiding fossil fuel costs with wind energy, A report by the European Wind Energy Association, Brussels, 2014.
94. Krohn, S., Morthorst, P. E., Awerbuch, S., The Economics of Wind Energy- The European Wind Energy Association Report 2009.
95. Kilincci, O., Onal, S.A., Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company, Expert System with Applications, 38, 8 (2011) 9656–9664.
96. Chan, K.Y., Lam, H.K., Dillon, T.S., Ling, S.H., A stepwise-based fuzzy regression procedure for developing customer preference models in new product development, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 23, 5 (2015) 1728–1745.
97. De Salles, D.C., Neto, A.C.G., Marujo, L.G., Using fuzzy logic to implement decision policies in system dynamics models, Expert System with Applications, 55 (2016) 172–183.
98. Bilgin, A., Hagraş, H., Van Helvert, J., Alghazzawi, D., A linear general type-2 fuzzy-logic-based computing with words approach for realizing an ambient intelligent platform for cooking recipe recommendation, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 24, 2 (2016) 306– 329.

99. Korczak, J., Hernes, M., Bac, M., Fuzzy logic as agents knowledge representation in A-trader system. In: Information Technology for Management, 109-124 pp, Springer, Cham, 2016.
100. Darwish, N.R., Abdelghany, A.S., A fuzzy logic model for credit risk rating of egyptian commercial banks, International journal of Computer Science and Information Security, 14, 2 (2016) 11-18.
101. Bojadziev G., Bojadziev M., Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications, 283 pp, World Scientific, London, 1991.
102. Bai, Y. and Wang, D., Fundamentals of Fuzzy Logic Kontrol Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications, Advanced Fuzzy Logic Technologies In Industrial Applications, 334 pp, Springer Verlag London, 2006.
103. Tanaka, K., Ohtake, H., Seo, T., Tanaka, M., Wang, H.O., Polynomial fuzzy observer designs: a sum-of-squares approach, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 42, 5 (2012), 1330– 1342.
104. Han, H., Higaki, Y., Lam, H.K., Fuzzy disturbance observer for a class of polynomial fuzzy control systems. In: Proc. of the 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, July 2014, Beijing, 2306–2312.
105. Liu, C., Lam, H.K., Design of polynomial fuzzy observer-controller with sampled output measurements for nonlinear systems considering unmeasurable premise variables, IEEE Transactions Fuzzy Systems, 23, 6 (2015) 2067–2079.
106. Liu, C., Lam, H.K., Ban, X., Zhao, X., Design of polynomial fuzzy observer–controller with membership functions using unmeasurable premise variables for nonlinear systems, Informations Sciences, 355 (2016) 186–207.
107. Chibani, A., Chadli, M., Braiek, N.B., A sum of squares approach for polynomial fuzzy observer design for polynomial fuzzy systems with unknown inputs, International Journal of Control Automation and System, 14, 1 (2016) 323–330.
108. Abebe, A. J., Guinot, V., Solomatine, D. P., Fuzzy alpha-cut vs. Monte Carlo techniques in assessing uncertainty in model parameters. Proc. 4-th International Conference on Hydroinformatics, July 2000, Iowa City, USA, 1-7.
109. Jang, J.S.R. and Sun, C.T., Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, 614 pp, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
110. Kandel, A., Fuzzy expert systems, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1992.

111. Osofisan, P.B., Fuzzy logic control of the syrup mixing process in beverage production, Leonardo journal of sciences, 11 (2007) 93-108.
112. Kosko. B., Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1991.
113. Lee, C.C., Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-part 1, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20, 2 (1990) 404-418.
114. Lee, C.C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-part 2, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20, 2 (1990) 419-435.
115. Mamdani, E. H. and Assilian, S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1 (1975) 1-13.
116. Reznik, L., Fuzzy controllers, Biddles Ltd., Guildford and King's Lynn, 1997.
117. Sugeno, M. and Kang, G. T., Structure identification of fuzzy model, Fuzzy Sets and Systems, 28, 1 (1988) 15-33.
118. Takagi T. and Sugeno, M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 15 (1985) 116 - 132.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih TOPALOĞLU, 1980 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla, Kahramanmaraş Yavuz Selim İlkokulu, Malatya Sümer Ortaokulu ve Malatya S.K.Ö. Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Bilgisayar Öğretmenliği Bölümü'nü, 2002 yılında tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmalarına başladı. 2002 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'nda başladığı öğretmenlik görevine halen devam etmektedir.

Topaloğlu, F., Pehlivan, H., Comparison of Mamdani type and Sugeno type fuzzy inference systems in wind power plant installations, 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), March 2018, Antalya, 1-4

Topaloğlu, F., Pehlivan, H., Analysis of the effects of different fuzzy membership functions for wind power plant installation parameters, 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), March 2018, Antalya, 1-6

Topaloğlu, F., Pehlivan, H., Analysis of Wind Data, Calculation of Energy Yield Potential, and Micrositing Application with WAsP, Advances in Meteorology, 2018, 2716868 (2018) 1-10.