KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI RİSKLERİNİN FUZZY-FMEA YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

HÜLYA YÖRÜKOĞLU

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI RİSKLERİNİN FUZZY-FMEA YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

HÜLYA YÖRÜKOĞLU

Yrd.Doç.Dr. Celal Özkale
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Alpaslan Fığlalı
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Alparslan S. Demir
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih:25.06.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnsanoğlunun varlığını sürdürebilmesi için enerji vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir. Yapılan araştırmalar yeryüzünde bulunan fosil kökenli enerji kaynaklarının yakın bir gelecekte tükeneceği gerçeğini gözler önüne sermektedir. Bununla beraber bu enerji kaynaklarının çevreye verdikleri zarar dünyanın geleceği adına da tehlike oluşturmaktadır. Tüm bu olumsuzlukların doğal sonucu olarak insanoğlu çalışmalarını çevre dostu ve tükenmeyen doğal enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları üzerine araştırma, geliştirme faaliyeti gösteren firmaların günümüz rekabet ortamında varlıklarını sürdürebilmeleri ve karlılıkları adına risk yönetimi oldukça kritik bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmayla yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerinin riskleri ele alınarak, hata türleri ve etkileri analizi yönteminin klasik ve bulanık yaklaşımlarına göre değerlendirilmesi ve karşılaştırılması sağlanacaktır.

Çalışmalarım boyunca yapmış olduğu katkılarından dolayı danışmanım Yrd. Doç. Dr. Celal ÖZKALE'ye, yüksek lisans öğrenimim boyunca birlikte çalışmaktan, sabahlamaktan, ödev hazırlamaktan ve daha birçok anı paylaşmaktan keyif aldığım arkadaşım F. Gözde AYTEKİN'e ve son olarak hayatım boyunca beni destekleyen ve her zaman yanımda olan canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2014 Hülya YÖRÜKOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI 3
1.1. Güneş Enerjisi 5
1.2. Rüzgâr Enerjisi 8
1.3. Jeotermal Enerji 10
1.4. Biyokütle Enerjisi 13
1.5. Hidroelektrik Enerjisi 15
1.5.1. Düşülerine göre HES'ler 16
1.5.2. Ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre HES'ler 17
1.5.3. Kapasitelerine göre HES'ler 17
1.5.4. Yapılışlarına göre HES'ler 17
1.5.5. Üstünde kuruldukları suyun özelliklerine göre HES'ler 17
1.6. Hidrojen Enerjisi 18
1.7. Deniz Kökenli Enerji 20
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI RİSKLERİ 26
2.1. Ekonomik ve Finansal Riskler 27
2.1.1. Döviz riski 27
2.1.2. Kredi riski 28
2.1.3. Enflasyon riski 29
2.1.4. Elektrik fiyat riski 29
2.2. Politik Riskler 30
2.2.1. Terörizm 31
2.2.2. İç karışıklık ve savaş 32
2.2.3. Kanun ve mevzuatların değişmesi 33
2.3. Teknolojik Riskler 34
2.3.1. Teknik ve mühendislik tasarım hataları 36
2.3.2. Diğer enerji türlerindeki teknolojinin gelişme riski 36
2.4. İnşaat ve İşletme Riskleri 38
2.4.1. İşçi hataları ve iş kazaları 39
2.4.2. Plan dışı bakım ve onarım 40
2.4.3. Periyodik bakım süresinin uzaması 41
2.4.4. İşletme masraflarının tahmin edilenden yüksek çıkması 41
2.4.5. İnşaat süresinin uzaması 43
2.4.6. Ekipmanların tedariklerinde gecikme 43
2.4.7. Doğal afetler 44
2.4.8. Yangın ve patlama 45

2.4.9. Rüzgârın değişkenliği 46
2.4.10. Seçilen türbinin uygunluğu 46
2.4.11. Keşif riski 47
2.4.12. Sondaj riski 48
2.4.13. Güneşin değişkenliği 49
2.4.14. Hırsızlık 49
2.5. Sosyal ve Çevresel Riskler 50
2.5.1. Üçüncü şahısların zarar görmesi 51
2.5.2. Gürültü 53
2.5.3. Kuş ölümleri 54
2.5.4. Gaz emisyonları riski 55
2.5.5. Jeotermal atık riski 56
2.5.6. Atık riski 57
2.5.7. Ekilebilir alanların azalması 58
3. HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ 60
3.1. FMEA'nın Tanımları 60
3.2. FMEA'nın Tarihi ve Günümüz Endüstrisindeki Yeri 62
3.3. FMEA'de Kullanılan Kavramlar 63
3.4. FMEA'nın Amaçları ve Faydaları 66
3.5. FMEA Çeşitleri 68
3.5.1. Sistem FMEA 69
3.5.2. Tasarım FMEA 70
3.5.3. Süreç FMEA 71
3.5.4. Servis FMEA 73
3.6. FMEA Takımı 75
3.6.1. Takım büyüklüğü 75
3.6.2. Takım üyeliği 75
3.6.3. Takım liderliği 76
3.7. FMEA Uygulama Adımları 76
3.7.1. FMEA kapsamının belirlenmesi 80
3.7.2. FMEA takımının kurulması 82
3.7.3. FMEA uygulanacak sürecin incelenmesi 82
3.7.4. Olası hata türlerinin belirlenmesi 83
3.7.5. Olası hata nedenlerinin belirlenmesi 85
3.7.6. Olası hata etkilerinin belirlenmesi 86
3.7.7. Mevcut kontrollerin belirlenmesi 88
3.7.8. Ortaya çıkma değerinin belirlenmesi 89
3.7.9. Şiddet değerinin belirlenmesi 91
3.7.10. Saptama değerinin belirlenmesi 93
3.7.11. Risk öncelik sayısının hesaplanması ve değerlendirilmesi 95
3.7.12. Alınacak önlemlerin belirlenmesi ve uygulanması 96
3.7.13. Yeni RÖS değerinin hesaplanması 98
4. BULANIK MANTIK 99
4.1. Bulanık Mantık Kavramı ve Tanımı 99
4.2. Bulanık Mantığın Tarihsel Gelişimi 102
4.3. Bulanık Küme Teorisi 105
4.4. Bulanık Kümelerin Temel Özellikleri 108
4.5. Bulanık Küme İşlemleri 110
4.6. Üyelik Fonksiyonu ve Çeşitleri 114

4.7. Bulanık Sistem 117
4.7.1. Bulanıklaştırma 118
4.7.2. Kural tabanı 119
4.7.3. Çıkarım 120
4.7.4. Durulaştırma 123
5. UYGULAMA 126
5.1. FMEA ve Bulanık Yaklaşımlı FMEA Değerlerinin Hesaplanması 126
5.2. Sonuçların Yorumlanması 133
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 138
KAYNAKLAR 140
EKLER 152
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 156
ÖZGEÇMİŞ 157

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneşten Gelen Işınımın Dağılımı 5
Şekil 1.2. Güneş Paneli 7
Şekil 1.3. Güneş Kollektörü 7
Şekil 1.4. Fotovoltaik Pil Yapısı 8
Şekil 1.5. Rüzgâr Türbini 10
Şekil 1.6. Jeotermal Enerji Oluşumu 12
Şekil 1.7. Biyokütle Enerji Oluşumu 14
Şekil 1.8. Hidroelektrik Enerji Santrali Kesit Görünüşü 15
Şekil 1.9. Hidrojen Enerjisi Sistemi 19
Şekil 1.10. Dalga Enerjisi Sistemi 22
Şekil 1.11. OTEC Enerjisi Sistemi 23
Şekil 1.12. Deniz Akıntısı Enerjisi Santrali 24
Şekil 1.13. Med-cezir Enerjisi Santrali 25
Şekil 2.1. Risk İlişki Gösterimi 59
Şekil 3.1. FMEA Çeşitleri 69
Şekil 3.2. FMEA Süreci 79
Şekil 4.1. Klasik Küme Üyelik Fonksiyonu 107
Şekil 4.2. Bulanık Küme Üyelik Fonksiyonu 107
Şekil 4.3. Normal Bulanık Küme 109
Şekil 4.4. Normal Altı Bulanık Küme 109
Şekil 4 5. Dışbükey Bulanık Küme 110
Şekil 4.6. İki Bulanık Kümenin Birleşimi 111
Şekil 4.7. İki Bulanık Kümenin Kesişimi 112
Şekil 4.8. a) A Bulanık Kümesi b) A Bulanık Kümesinin Tümleyeni 112
Şekil 4.9. Üyelik Fonksiyonunun Kısımları 116
Şekil 4.10. Bir Bulanık Sistemin Genel Yapısı 118
Şekil 4.11. Mamdani Çıkarım Yönteminin Gösterimi 122
Şekil 4.12. Durulaştırma Yöntemleri 124
Şekil 5.1. Bulanık Model 128
Şekil 5.2. Girdi Değişkenleri Üyelik Fonksiyonu 129
Şekil 5.3. Çıktı Değişkeni Üyelik Fonksiyonu 129
Şekil 5.4. Kural Tabanı 130
Şekil 5.5. Giriş ve Çıkış Değerleri Arasındaki İlişki Yüzeyi 132
Şekil 5.6. Bulanık Kural Tabanı MATLAB Görünümü 133

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. FMEA başlangıç formu 81
Tablo 3.2. Ortaya çıkma derecelendirme tablosu 90
Tablo 3.3. Şiddet derecelendirme tablosu 92
Tablo 3.4. Tespit edilebilirlik tablosu 94
Tablo 4.1. Klasik küme ve bulanık küme notasyonları 111
Tablo 4.2. Klasik küme ve bulanık küme özellikleri 113
Tablo 4.3. En çok kullanılan üyelik fonksiyonu çeşitleri 115
Tablo 5.1. Hata türlerinin değerlendirilmesi 126
Tablo 5.2. Hata türlerinin bulanık FMEA yaklaşımıyla değerlendirilmesi 131
Tablo 5.3. Rüzgâr enerjisi sonuç karşılaştırma tablosu 134
Tablo 5.4. Jeotermal enerji sonuç karşılaştırma tablosu 135
Tablo 5.5. Güneş enerjisi sonuç karşılaştırma tablosu 135

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

°C :Santigrat Derece
°F :Fahrenheit Derece
cm/s :Santimetre/Saniye
cm² :Santimetrekare
CO_2 :Karbondioksit
ft :Feet
GWth :Gigawatt Ton Saat
H :Kot Farkı
J :Joule
km :Kilometre
kW :Kilowatt
m :Metre
mm :Milimetre
MW :Megawatt
TWh :Terawatt Saat

Kısaltmalar

AB :Avrupa Birliği
Ar&Ge :Araştırma ve Geliştirme
EPDK :Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
FMEA :Failure Mode and Effects Analysis (Hata Türleri ve Etkileri Analizi)
HES :Hidroelektrik Santral
HTEA :Hata Türleri ve Etkileri Analizi
LIFE :Laboratory for International Fuzzy Engineering (Uluslararası Bulanık Mühendislik Laboratuvarı)
LPG :Likit Petrol Gaz
MIL-P :Military Procedure (Askeri Prosedür)
M.Ö. :Milattan Önce
OTEC :Ocean Thermal Energy Conversion (Okyanus Termal Enerji Dönüşümü)
RÖS :Risk Öncelik Sayısı
STK :Sivil Topum Kuruluşu
vb. :ve benzeri
YEK :Yenilenebilir Enerji Kaynakları

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI RİSKLERİNİN FUZZY-FMEA YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

ÖZET

Günümüz toplumlarında ekonomik büyümenin en önemli göstergelerinden biri enerji kaynaklarıdır. Hızlı nüfus artışının ve sanayileşmenin beraberinde getirdiği enerji ihtiyacı hızla artmakta ve kısıtlı kaynaklarla karşılanamamaktadır. Dolayısıyla enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık hızla büyümektedir. Bu nedenle çevre dostu, yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli bir şekilde yararlanmak son derece önem kazanmaktadır.

Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA), bir sistemde, sistem bileşenlerinde ya da fonksiyonlarında varolan hata türlerinin, mümkün olduğunca erken aşamada belirlenmesini, çözümlenmesini ya da hata oluşumunun engellenmesini sağlayan bir kalite geliştirme yöntemidir. Bu çalışmada: Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerine ilişkin risklerin tespiti, giderilmesi veya iyileştirilmesi amacıyla, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) ve Fuzzy FMEA teknikleri kullanılarak risk analizleri yapılmıştır.

Çalışmada; rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerine ilişkin riskler, ekonomik ve finansal, sosyal ve çevresel, inşaat ve işletme, politik ve teknolojik açılardan sınıflandırılmış ve 5 ayrı ana başlık altında toplanmıştır. FMEA ve Fuzzy FMEA teknikleri kullanılarak enerji santrallerinin risk öncelik sayıları hesaplanmış ve risk tablosu oluşturulmuştur. Oluşturulan risk tablosuna göre çalışmamızda ele aldığımız 3 tip enerji santrali her iki teknik kullanılarak elde edilen sonuçlara göre değerlendirilmiş ve meydana getirdikleri riskler yönünden karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fuzzy FMEA, Risk Analizi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları.

THE ANALYSIS OF THE RISKS OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES BY USING FUZZY-FMEA TECHNIQUE

ABSTRACT

In the modern societies, one of the most important indicators of the economical growth is the energy resources. The energy demand is increasing continuously due to the rapid population growth and industrialization and this demand can not be satisfied with the available limited resources. Consequently, the gap between the production and the consumption of the energy is growing rapidly. Thus, it is gaining much more importance to benefit from the renewable energy resources in a more effective manner.

FMEA, Failure Mode and Effects Analysis, is a quality improvement technique that prevents the formation of a failure or that determines and resolves the failure types existing in a system, and in the functions or the components of a system as early as possible. In this study, a risk analysis is done to improve, overcome and determine the risks in the solar, geothermal, and wind power plants by using FMEA and Fuzzy FMEA techniques.

In the study, the risks in wind, solar and geothermal power plants are classified according to the economical and financial, social and environmental, construction and management, political and technological aspects. By using FMEA and Fuzzy FMEA techniques, the risk priority numbers of power plants are calculated and a risk table is constructed. The three power plant types are rated according to the results obtained by using the two techniques and they are compared in terms of the risks that they produce.

Keywords: Fuzzy FMEA, Risk Analysis, Renewable Energy Resources.

GİRİŞ

Enerji, ekonomik bir girdi, sürdürülebilir kalkınma için itici güç ve toplumsal refah seviyesini arttırıcı bir unsurdur [1]. Bu bağlamda ülkelerin refah ve gelişmişlik düzeyinin arttırılması ve beraberinde küresel rekabet alanında yer alınabilmesi için stratejik öneme sahip olan enerji konusu, ihtiyaçlar doğrultusunda uzun vadede şekillenecek olan politikalarla belirlenmelidir. Özellikle sanayi devrimi ile başlayan ve günümüze kadar devam eden süreçte, artan dünya nüfusu ve buna bağlı artan enerji tüketimi yaşadığımız evreni, enerji ve enerji ile ilişkili çevresel sorunlarla karşı karşıya bırakmıştır.

Enerji üretimi amacıyla kullanılmakta olan petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların tüketimi sırasında açığa çıkan gazların oluşturduğu asit yağmurları, sera etkisi, hava kirliliği, iklim değişiklikleri ve dünya geleceği açısından tehlike oluşturan daha birçok nedenden dolayı fosil yakıtlardan uzaklaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar göz önünde bulundurulacak olursa 2040 yılında petrol, 2060 yılında doğalgaz ve 2150 yılında kömür rezervleri yüksek ihtimalle tükenecektir [2]. Dolayısıyla fosil yakıtlar gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına önem ve öncelik veren enerji politikası yerini çevre dostu ve sürdürülebilir enerji politikalarına bırakmıştır.

Yenilenebilir enerji Uluslararası Enerji Ajansı'nın tanımına göre; "doğal yollarla elde edilebilen ve sayısız olarak kendini yenileyebilen kaynaklar" olarak tanımlanmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları genel olarak güneş, jeotermal, rüzgâr, hidroelektrik, dalga, gel-git ve biyoenerji şeklinde sıralanabilir.

Enerji yatırımları genelde hem büyük olmaları hem de çoğunun önemli derecede tabiata ve insana bağlı olmaları nedeni ile ciddi riskler taşımaktadır. Enerji sektöründe faaliyet gösteren ve bu sektörde yatırım hedefleyen firmaların, günümüz rekabet ortamında ayakta kalabilmeleri ve uzun vadede karlılıkları adına öne çıkan, risk yönetimi konusuna titizlikle eğilmeleri gerekmektedir.

Risk yönetimi, potansiyel risklerin sistematik olarak değerlendirilerek olası zararların etkisini azaltıcı yönde, verilere dayalı karar vermeyi sağlayan yönetimi ifade etmektedir. FMEA'de bir sistemin, sisteme ait fonksiyon ya da bileşenin hata türlerini belirleyen ve etkilerini değerlendirmek için risk analizi çalışmalarında kullanılan sistematik bir yol olarak tanımlanmaktadır.

Tez çalışmasının amacı, sürdürülebilir, ucuz ve temiz enerji politikaları ışığında yenilenebilir enerji kaynakları için yapılan araştırma, geliştirme ve yatırım faaliyetlerinin taşıdığı risklerin araştırılması ve farklı metodlarla değerlendirilerek kıyaslama çalışmasının yapılmasıdır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde yenilenebilir enerji kaynakları ve türleri hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde yenilenebilir enerji kaynaklarına ait riskler sınıflandırılmış olup sınıflandırılan riskler hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. Üçüncü bölümde risk analizi kavramı hakkında açıklamalara yer verilmiş olup çalışmada kullanılacak FMEA ve bulanık küme yaklaşımıyla FMEA yöntemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde uygulama anlatılmakta olup, uygulamada kullanılacak veri seti oluşturulmuş ve her iki yöntemin veri setine uygulanışı sağlanmıştır. Son olarak her iki yöntem için elde edilen bulgular ışığında varılan sonuçlar ve sonraki çalışmalar için öneriler sonuç ve öneriler bölümünde ele alınmıştır.

1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Gündelik hayatın devamlılığı, yaşamın sürdürülebilirliği için enerji vazgeçilmez bir kaynaktır. Sanayi devrimiyle birlikte hızla gelişen teknoloji, dünya nüfusundaki artış ve küreselleşme enerjiye olan talebi her geçen gün arttırmaktadır. Dolayısıyla ülkelerin gelişmişlik seviyesini belirlemede enerji tüketimi önemli bir parametre haline gelmektedir. Fosil kaynaklı yakıtların tükeneceği gerçeğini göz önünde bulunduracak olursak birçok ülke her geçen gün artan enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı sorusuna cevap aramaktadır. Bununla beraber fosil yakıtların kullanımıyla ortaya çıkan CO_2 salınımının meydana getirdiği küresel ısınmadan kaynaklı iklim değişiklikleri ve ekolojik dengelerdeki bozulma yeryüzünde geri dönüşü olmayan tahribatlara yol açmaktadır. Söz konusu problemlerden yola çıkılarak modern yaşamın vazgeçilmez unsuru olan enerji ihtiyacını karşılamak üzere, alternatif kaynaklar arayışı içerisinde bulunulmuştur. Bu arayış insanoğlunu, insan yaşamının kalitesini arttıracak ve beraberinde değişen gereksinimleri de karşılayabilecek olan temiz enerji kaynakları veya yeşil enerji olarak da bilinen yenilenebilir enerji kaynaklarına itmiştir.

İklim değişikliğinin küresel bir sorun olduğu günümüzde tüm dünya ülkelerinin sera gazı salımlarını azaltmak için somut yükümlülükler üstlenmeleri gerektiği bir gerçektir. Bu bilinçle 1992 yılında Rio Dünya Zirvesi olarak bilinen toplantıda ülkeler bir araya gelerek Birleşmiş Milletler İklim değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni hazırlamışlardır.

11 Aralık 1997 tarihinde, Japonya'nın Kyoto şehrinde imzalanan Kyoto Protokolü Birleşmiş Milletler İklim değişikliği Çerçeve Sözleşmesi çerçevesinde, ülkelerin dünya üzerindeki yaşam alanlarına ve gelecekteki durumlarına yönelik uluslararası bir protokoldür. Protokol ülkelerin atmosfere saldıkları sera gazı miktarlarını 1990 yılındaki düzeylere çekmelerini beklemektedir.

Protokolün temel amacı, fosil yakıtların kullanımına bağlı salınan gazların azaltılması, dolayısıyla fosil yakıt kullanımının azaltılmasının sağlanması ve çevreye zarar vermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanılmasıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine (prosesine) ihtiyaç duymadan temin edilebilen, fosil kaynaklı (kömür, petrol ve karbon türevi) olmayan, elektrik enerjisi üretilirken CO_2 salınımı az bir seviyede gerçekleşen çevreye zararı ve etkisi geleneksel enerji kaynaklarına göre çok daha düşük olan, sürekli bir devinimle yenilenen ve kullanılmaya hazır olarak doğada var olan hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git, hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade eder [3].

10 Mayıs 2005 tarih ve 5346 sayılı "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun"'da "Tanımlar ve kısaltmalar" başlıklı üçüncü maddesinin birinci fıkrasının sekiz numaralı bendinde, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), şöyle tanımlanmıştır: Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biokütleden elde edilen gaz (çöp gazı dâhil), dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır. Yine aynı maddenin birinci fıkrasının on bir numaralı bendinde, bu kanun kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynakları: "Rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biokütleden elde edilen gaz (çöp gazı dâhil), dalga, akıntı enerjisi ve gel-git ile kanal veya nehir tipi veya rezervuar alanı on beş kilometrekarenin altında olan hidroelektrik üretim tesisi kurulmasına uygun elektrik enerjisi üretim kaynaklarını ifade eder." şeklinde tanımlanmıştır.

En genel olarak yenilenebilir enerji; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda ve kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır [4].

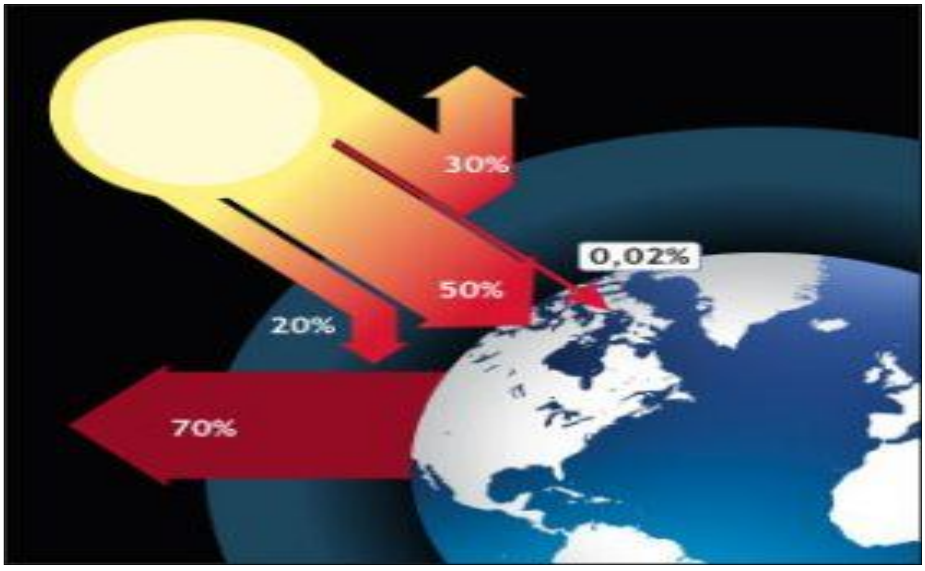
Yenilenebilir enerji kaynakları, genel olarak 7 gruba ayrılmaktadır:

1) Güneş Enerjisi
2) Rüzgâr Enerjisi,
3) Jeotermal Enerji
4) Biyokütle Enerjisi
5) Hidroelektrik Enerjisi
6) Hidrojen Enerjisi
7) Deniz Kökenli Enerji Kaynakları

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş sistemi içerisinde yer alan ve yeryüzünden 151.106 km uzaklıkta bulunan güneş, vazgeçilmez bir yaşam kaynağı olmasının yanısıra dünyamıza ve diğer tüm gezegenlere enerji veren sonsuz denebilecek güce sahip bir yıldızdır. Bugün insanoğlunun kullandığı çeşitli enerji kaynaklarına baktığımızda bunların neredeyse hepsinin güneş kökenli olduğu görülmektedir. Günlük güneş enerjisi ile yeryüzü aydınlanabilmekte ve ısınabilmekte, yağışlar ile su döngüsü sağlanabilmekte, rüzgârlar esebilmekte ve en önemlisi fotosentez ile canlılar yaşamlarını sürdürebilmektedir [4].

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan ve hidrojen gazını helyuma dönüştüren füzyon reaksiyonları sonucu saniyede ortaya çıkan 4 milyon tonluk kütle farkının ısı enerjisine dönüştüğü çok güçlü bir enerjidir. Oluşan bu enerji ışınım yoluyla uzaya yayılmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere güneşten gelen enerjinin çok az bir kısmı dünyaya gelerek, burada yaşamın ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Güneşin ömrünün beş milyar yıldan fazla olduğu göz önüne alınırsa, güneş ışınlarının, dünyamız için sonsuz bir enerji kaynağı olacağı düşünülmektedir [5].



Şekil 1.1. Güneşten Gelen Işınımın Dağılımı

Dünyamıza bir günde gelen güneş enerjisi, güneşin toplam yaydığı enerjinin yaklaşık 10 milyarda birine eşdeğerdir. Bunun değeri, $1{,}5 \times 10^{22}$ J yani 15 000 000 katrilyon joule'dür (Bir Joule, bir kibritin yanması ile ortaya çıkan ısı enerjisinin yaklaşık binde

birine eşittir.). Dünyaya bir yılda düşen güneş enerjisi yaklaşık 200 trilyon ton kömüre eşdeğerdir (Bu değer, günümüzde dünyada kullanılan toplam enerjinin 15-16 bin katına karşılık gelmektedir.). Sadece Türkiye üzerine bir yılda düşen güneş enerjisi, 80 milyar ton petrole eşdeğerdir. Dünyamıza bir yılda düşen güneş enerjisi dünyadaki çıkarılabilir fosil yakıt kaynakları rezervlerinin tamamından elde edilecek enerjinin yaklaşık 15-20 katına eşdeğerdir [6].

Güneş enerjisinden faydalanmak amacıyla insanoğlunun yaptığı çalışmalar çok eski tarihlere dayanmaktadır. Kaynaklara göre, ilk defa Sokrat (M.Ö. 400) evlerin güney yönüne fazla pencere konularak güneş ışınlarının içeri alınmasını ve kuzey kısımların yüksek yapılarak rüzgârın önlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Arschimed (M.Ö. 250)'in ise içbükey aynalarla güneş ışınlarını odaklayarak 30-40 metre uzaklıktaki Sirakuza'yı kuşatan Roma gemilerini yaktığı mitolojik kaynaklarda belirtilmektedir. Güneş enerji sistemleri ile ilgili çalışmalar 1600'lü yıllarda Galile'nin merceği bulmasıyla gelişme göstermiştir. İlk olarak 1725 yılında Belidor tarafından güneş enerjisi ile çalışan bir su pompası geliştirilmiştir. Fransız bilim adamı Mohuchok 1860'da parabolik ayanalar yardımı ile güneş ışınlarını odaklayarak elde ettiği enerji ile küçük bir buhar makinesini çalıştırmaya uğraşmış, güneş pompaları ve güneş ocakları üzerinde deneyler yapmıştır [5].

Günümüzde yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi ısıya dönüştürme ve elektrik enerjisine çevirme şeklinde olmak üzere iki yolla değerlendirilmektedir.

Güneş enerjisinden ısı elde etmek için günlük yaşantımızda sıcak su ısıtmak amaçlı evlerimizde kullandığımız, Şekil 1.2'de görüldüğü üzere çatılara yerleştirilen güneş panellerinin doğrudan haznede bulunan suyun sıcaklığını arttırması ve evlerimizde kullanılabilecek şekle getirmesiyle mümkün olmaktadır. Güneş evleri olarak bilinen ve yıl içerisinde uzun süre yeterli miktarda güneş alan coğrafi bölgelerde, uygun mimari yapıda konutlar inşa edilerek direk güneş ışınlarının etkisiyle ısınma sağlanabilmesi de güneş enerjisinin ısıya dönüştürülmesine diğer bir örnektir.



Şekil 1.2. Güneş Paneli

Güneş enerjisindn elektrik üretimi doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Dolaylı olarak odaklayıcı aynalar yardımıyla güneş ışınları bir noktada toplanarak yüksek dereceli sıcaklıklar elde edilir.

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi kollektörlerde toplanan sıcaklıkla ısınan sıvı daha sonra su ile dolu kazanlardan geçirilerek buhar üretilir ve türbinler vasıtasıyla jeneratöre mekanik hareket sağlanır. Böylece dolaylı olarak elektrik enerjisi elde edilmektedir [1].

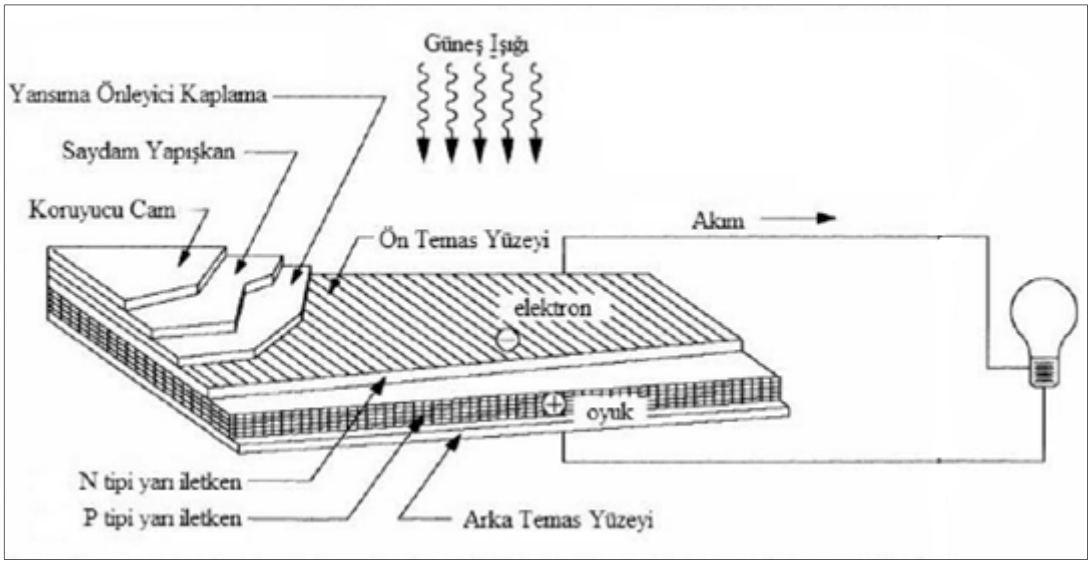


Şekil 1.3. Güneş Kollektörü

Doğrudan elektrik üretimi ise güneş pilleri olarak da bilinen fotovoltaik piller tarafından gerçekleştirilmektedir. Fotovoltaik piller ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Edmond Becquerel tarafından bulunmuştur. Fotovoltaik piller, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen yarı-iletken

malzemelerden oluşan düzeneklerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır.

Fotovoltaik pillerin yapısı Şekil 1.4'te görüldüğü üzere basitçe p ve n yarı iletken malzemeden oluşan diyotlara benzemektedir. Çalışma mantığı fotoelektrik olay prensibine dayanarak pilden fotonlar tarafından kopartılan elektronların hareketi esnasında bir elektrik akımı oluşmaktadır. Fotovoltaik piller birbirleriyle seri veya paralel olarak bağlanarak, bu sayede çıkış gücünü arttırabilmektedir [7]. Piller uygulamaya bağlı olarak akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik devreler ile birlikte kullanılarak güneş pili sistemi veya fotovoltaik sistem oluşturabilmektedirler.



Şekil 1.4. Fotovoltaik Pil Yapısı

1.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr en genel şekilde atmosferde bulunan havanın hareketi olarak tanımlanmaktadır. Güneş ışınları yeryüzünü oluşturan kara ve su parçaları üzerine düşerek onları ısıtmaktadır. Kara parçaları üzerindeki hava su üzerindeki havadan daha çabuk ısındığından kara üzerinde ısınan hava yükselmeye başlar ve su üzerindeki soğuk hava karaya doğru hareket ederek yükselen havanın yerini alır. Bu olayın sonucunda ise rüzgâr oluşmaktadır [8]. Rüzgârın hareketi daima alçak basınç

bölgesinden yüksek basınç bölgesine doğrudur. Bu iki bölge arasındaki basınç farkı hava akımının hızını belirler.

Rüzgâr enerjisi ise; hareket halindeki havanın sahip olduğu enerjiyi (hareket enerjisi) ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en gelişmişi ve enerjiye çevrilmesi kolay olması açısından en uygunu olarak nitelendirilen rüzgâr enerjisinin üretimi günümüzde hızla yaygınlaşmaktadır. Rüzgâr enerjisi, güneşten gelen enerjinin sadece % 1'ini kullanmasına rağmen ortaya çıkan enerji miktarı, dünyadaki tüm bitkilerin biyokütle enerjisine dönüşmüş olması durumunda ortaya çıkabilecek enerji miktarından 50-100 kat daha fazla olmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek bu gücün, kullanılan teknolojiye bağlı olarak gelecek yıllarda daha da artması beklenmektedir [9].

Rüzgâr enerjisi çok eski çağlardan beri kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar M.Ö. 3000 yıllarında rüzgâr enerjisinin yelkenli gemilerde kullanıldığını göstermiştir. M.Ö. 200'de Çin'de basit yel değirmenleri ve su pompalamasında kullanılırken, M.S. İran ve Afganistan dolaylarında yel değirmenlerinin kullanıldığı kaynaklarda belirtilmektedir [10]. Yel değirmenleri Avrupa'da Haçlı Seferleri sonucu kullanılmaya başlanmıştır [11]. Fransa ve İngiltere'de 12. yüzyılda kullanılan yel değirmenleri, 14. yüzyılda Hollanda'da geliştirilerek kullanılmıştır. Rüzgâr'dan elektrik üretimi ilk kez Danimarka'da 1894 yılında gerçekleştirilmiştir [5].

Rüzgârdan elektrik enerjisi üretiminde Şekil 1.5'te görüldüğü üzere rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri rüzgârdaki hareket enerjisini önce mekanik daha sonra elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr enerjisi üretimi, kurulu rüzgâr türbinlerinde esen rüzgârın, pervaneleri döndürmesiyle oluşan hareket enerjisinin jeneratör sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi şeklinde gerçekleşir. Rüzgâr enerjisi türbinleri pervane, şaft ve jeneratörden oluşur [5].



Şekil 1.5. Rüzgâr Türbini

Rüzgâr türbinleriyle elektrik enerjisi üretilmesi genelde iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Şebeke bağlantısı olmayan sistemler: Bu tip sistemler, genelde şebeke bağlantısı olmayan dağ ve deniz evleri, gözetleme kuleleri ve meteoroloji istasyonlarında kullanılmaktadır. Özellikle çevresel etkileri açısından oldukça uygun olmasına karşın, rüzgârın esmediği zamanlar önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, şebeke bağlantısı olmayan sistemlerde akü gibi enerji depolama donanımlarına gereksinim duyulmaktadır. Şebeke bağlantısı olan sistemler: Bu tip sistemlerde, üretilen elektriğin bir kısmının veya tamamının şebekeye aktarılması mümkün olmaktadır. Elektrik üretimi, tek bir rüzgâr türbiniyle sağlanabileceği gibi, birden fazla rüzgâr türbinin bir araya getirildiği rüzgâr çiftlikleri tarafından da gerçekleştirilebilmektedir [9].

1.3. Jeotermal Enerji

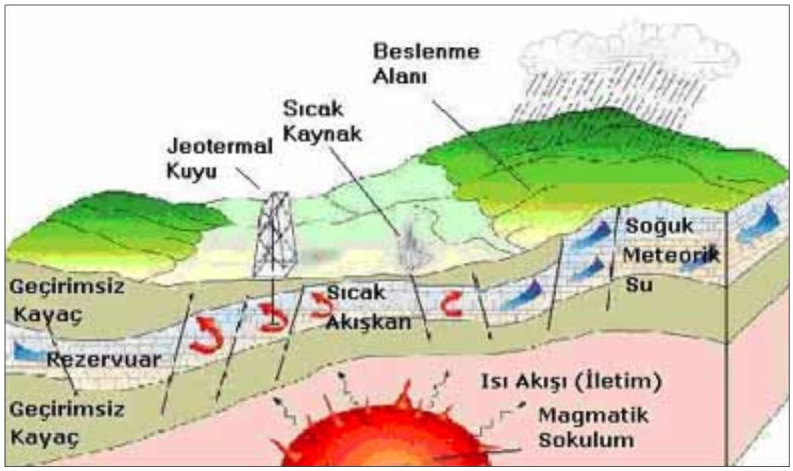
Jeotermal kelimesi Yunanca geo (yeryüzü) ve therme (ısı) kelimelerinden türemiş olup yer ısısı ya da yeryüzü ısısı anlamına gelmektedir [6]. Jeotermal enerji ise; yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde yoğunlaşarak birikmiş ısının oluşturduğu ve bu ısının meteorik kökenli sularla yüzeye taşınması ile oluşan, sıcaklıkları sürekli olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli gazlar ve tuzlar içerebilen sıcak su ve buhar olarak tanımlanabilmektedir.

Dünyanın merkezine doğru inildikçe sıcaklık yüzeye yakın yerlerde her 100 m'de bir

3 ºC (yaklaşık 5,4 ºF), magma tabakasına yakınlaştıkça ise daha yüksek derecelerde artış gösterir. Bazı bölgelerde yaklaşık 3 km kadar derinlikte mevcut olan sıcaklık suyun kaynaması için yeterli seviyelere ulaşabilmektedir [12]. Jeotermal sular derin tabakalarda ısındıktan sonra yer yüzeyine kendileri boşluklar bularak yükseldikleri gibi sondaj yöntemiyle de çıkarılabilirler. Günümüzde mevcut olan teknoloji sayesinde 4000 m (13.000 ft) kadar derinlere ulaşılarak, jeotermal kaynaklardan ekonomik olarak yararlanılabilmektedir [13].

Jeotermal enerji; yeni, yenilenebilir, sürdürülebilir, ucuz, güvenilir, çevre dostu, yerli ve yeşil bir enerji türüdür. Yağmur, kar, deniz ve magmatik suların yeraltında oluşturdukları jeotermal rezervuarlar, jeolojik koşulların devam ettiği, reenjeksiyon (Üretilen jeotermal akışkanların yapay yöntemlerle kullanıldıktan sonra tamamının veya kalan kısmının üretildikleri jeolojik formasyonlara geri gönderilmesi/basılması) işleminin yapıldığı ve beslenme-üretim değerlerine uyulduğu takdirde yenilenebilir olma özelliğini korurlar ve kısa süreli atmosferik koşullardan etkilenmezler [15]. Bu sebeple çıkarıldığı yerde değerlendirilmesi gereken bir enerji kaynağıdır. Çok yüksek enerji verimliliğine sahiptir ve dolaylı olarak elde edilmediğinden dolayı düşük maliyetli bir enerji kaynağıdır. Dünya'nın 10 km derinliğine kadar olan bölümünde ısı enerjisi olarak depolanan miktar, günümüzdeki tüm dünya enerji tüketiminin 50 milyon katıdır. Yıllık yeryüzüne ulaşan miktar ise yaklaşık 36 milyar ton taşkömürü eşdeğerinde olup dünya enerji tüketiminin 5-7 katıdır. Düşük yoğunlukta olan bu enerji, yeryüzünün bazı bölümlerinde önemli bir potansiyel oluşturmaktadır [14].

Jeotermal enerjisinin oluşumu Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Jeotermal Enerji Oluşumu

Jeotermal enerjinin tarihçesi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. M.Ö. 10.000'de jeotermal akışkandan Akdeniz Bölgesi'nde çanak, çömlek, cam, tekstil, krem imalatında yararlanılmaktaydı. M.Ö. 1500'de Romalılar ve Çinlilerin doğal sıcak su termal banyolarda ısıtma ve sağlık amaçlı kullandıkları bilinmektedir. 14.yüzyılda Fransa'da köylüler doğal sıcak suyla evlerini ısıtmışlardır. ABD'de ilk olarak 1891 yılında Idaho'da, daha sonra 1900 yılında Oregon'da konut ısıtılmasında kullanılmıştır. 1904 yılında İtalya'nın Larderello şehrinde ilk defa jeotermal buhardan elektrik üretilmiştir [5].

Jeotermal enerji sıcaklık seviyelerine bağlı olarak düşük sıcaklıklı (entalpili) (20-70 ºC) sahalar, orta sıcaklıklı (70-150 ºC) sahalar ve yüksek sıcaklıklı (150 ºC'den yüksek) sahalar olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Jeotermal enerjinin doğrudan ve dolaylı kullanımı ile ısı ve elektrik enerjisi üretimi mümkün olmaktadır.

Düşük ve orta sıcaklıklı sahaların doğrudan kullanımı ile bugünkü teknolojik ve ekonomik koşullar altında başta ısıtmacılık olmak üzere (sera, bina, zirai kullanımlar), endüstride (yiyecek kurutulması, kerestecilik, kâğıt ve dokuma sanayisinde, dericilikte, soğutma tesislerinde), kimyasal madde üretiminde (borik asit, amonyum bikarbonat, ağır su, akışkandaki karbondioksitten kuru buz eldesinde) kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklı sahalardan elde edilen akışkanın dolaylı kullanımı ile elektrik üretiminin yanı sıra entegre olarak diğer alanlarda da faydalanılabilmektedir. Doğrudan kullanımın dolaylı kullanıma göre verimi daha yüksektir.

Genel olarak jeotermal enerji buhar veya sıcak su boruları ile güç santraline taşınarak elektrik üretiminde, buhar ya da sıcak su pompalanarak borular vasıtasıyla aynı zamanda evlerin ısıtılmasında, soğutma sistemlerinde, tarımda, endüstride kullanılmaktadır. Ayrıca yol ve kaldırımlarda karların eritilmesinde de direkt olarak kullanılmaktadır [16].

1.4. Biyokütle Enerjisi

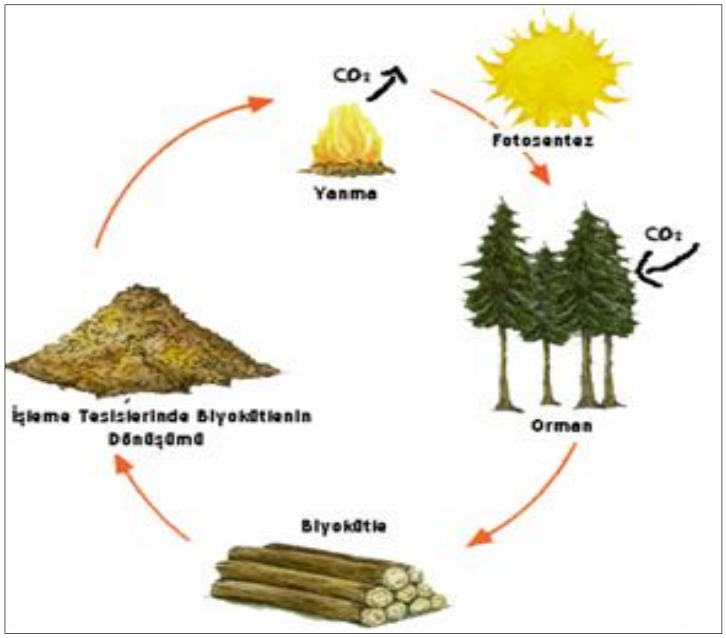
Biyokütle her yerde yetiştirilmesi mümkün olan, sosyo-ekonomik gelişme sağlayan, çevre dostu, elektrik üretilebilen, taşıtlar için yakıt elde edilebilen, yenilenebilir ve sürdürülebilir stratejik bir enerji kaynağıdır. Biyokütle, enerji kaynağı olarak yararlanılabilen biyolojik kaynaklı maddeleri ifade etmek için kullanılan geniş kapsamlı bir terimdir. Kaynağı odun, tarımsal ürün, yosun ve diğer bitkiler olabileceği gibi tarım ürünlerinden ve ormanlardan elde edilen artık maddeler de biyokütle olarak sayılmaktadır. Bu kaynaklardan elde edilen enerjiye ise biyokütle enerjisi denilmektedir [9].

Biyokütle enerjisi, güneş enerjisinin bitkiler tarafından dönüştürülmüş şekli olarak bilinmekle beraber farklı bir ifade ile bitkiler tarafından, fotosentez olayı ile kimyasal olarak depo edilen enerjinin daha sonra çeşitli şekillerde kullanılması olarak belirtilebilir [11]. Fotosentez olayında atmosferdeki karbondioksit kullanılmakta, atmosfere de oksijen verilmektedir. Fotosentez sonucu üretilen organik maddelerin yakılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit, daha önce bu maddelerin oluşması sırasında atmosferden alınmış olduğundan, biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre, karbondioksit salınımı açısından korunmuş olmaktadır.

Dünya elektrik enerjisi üretiminde biyokütle, hidroelektrik ve rüzgâr türbinlerinden sonra 3. sırada yer almaktadır. Toplam yenilenebilir güç kapasitesinde biyokütle ısıtmada 235 GWth ile birinci sırada ve elektrik üretiminde ise 45 milyar litre/yıl değeri ile yer almaktadır. Klasik olarak biyokütleden yararlanma çok eski çağlara dayanmaktadır. Ateşin bulunmasından sonra, yemek yapmak ve ısınmak için biyokütle (odun) kaynaklardan yararlanıldığı bilinmektedir. Modern anlamda biyokütle enerjisinden Asurlular ve Perslerin banyo ısıtmasında biyogaz şeklinde yararlandıkları bilinmektedir [11]. 19. yüzyılda İngiltere'de fosseptiklerde oluşan gazlar sokak aydınlatmasında kullanılmıştır [17].

Günümüzde biyokütle enerjisi, klasik ve modern olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi olan klasik biyokütle enerjisi; ormanlardan elde edilen yakacak odun ve yine yakacak olarak kullanılan bitki ve tezek gibi hayvan atıklarıdır. İkincisi olan modern biyokütle enerjisi ise; enerji ormancılığı ve orman-ağaç endüstrisi atıkları, tarım kesimindeki bitkisel atıklar, kentsel atıklar, tarıma dayalı endüstri atıklarının fermantasyon, gazlaştırma gibi modern tekniklerle işlenmesi sonucu elektrik, ısı, sıvı ve gaz yakıt olarak değerlendirilmesidir [10].

Biyokütle enerjisinin oluşumu Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Biyokütle Enerji Oluşumu

Biyokütle genel olarak, ısı sağlamak, yakıt üretmek ve elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Çevre kirliliğine neden olan endüstriyel, kentsel ve diğer atık maddeler biyokütle enerji teknolojileri kapsamında kullanılmakta ve fosil yakıtlara alternatif çok sayıda katı, sıvı ve gaz yakıtlara ulaşılmaktadır [17]. Biyokütle kökenli, en önemli yakıtlar, dizel motor alternatif yakıtı biyodizel, benzin alternatifi etanol, LPG alternatifi biyogaz olarak sıralanabilir. Bu yakıtlar, sera gazı salınımına neden olmadığından çevreci yakıtlardır.

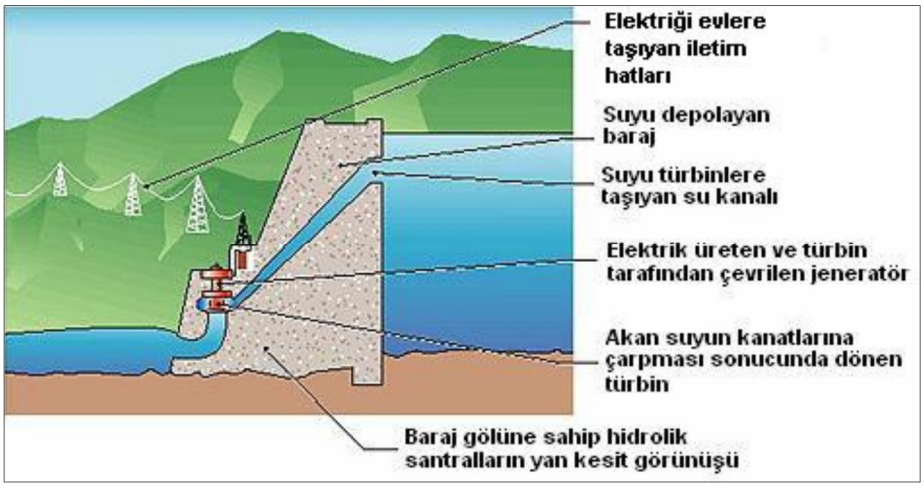
Biyokütlenin elektrik enerjisi üretiminde kullanılması, termik santrallere benzer olarak, organik maddelerin doğrudan yakılıp oluşan ısıdan yararlanılarak elektrik üretilmesi şeklinde olmaktadır. Ayrıca, değişik tekniklerle biyokütleden elde edilen

biyogazın kullanımı ile kombine çevrim gaz santrallerine benzer bir sistemle elektrik üretilebilmektedir. Kentsel atıklardan, çöplerin çürümesi sonucu ortaya çıkan yanıcı biyogaz olan metan gazının kullanımı ile çöp termik santralleri çalıştırılmaktadır. Böylece hem kentsel atıkların depolama sorunu ortadan kalkmakta hem de çöpten enerji üretimi gerçekleşmektedir [6].

1.5. Hidroelektrik Enerjisi

Su var olduğu sürece sınırsız bir kaynak olarak düşünülen ve çevre açısından en yararlı enerji kaynağı olarak kabul edilen hidroelektrik enerjisi; hidrolik (su) güç ile üretilen elektrik enerjisi anlamına gelmektedir. Hidroelektrik enerji üretimi, suyun sahip olduğu enerjinin bir başka enerji türüne dönüştürülmesini gerektirmektedir. Bunun gerçekleşmesi, suyun "baraj" adı verilen su tutucu alanlarda depolanması ve buradan "hidroelektrik enerji santrallerine" aktarılmasıyla gerçekleşmektedir [9].

Hidroelektrik enerji santrali kesit görünüşü Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Hidroelektrik Enerji Santrali Kesit Görünüşü

Barajlarda biriken su zamanla yükselerek, belirli bir yükseklikten aşağıya bırakılmakta (potansiyel enerjinin hareket enerjisine dönüşümü); böylece, aşağıda bulunan türbin sistemi içindeki pervanelerin dönmesi sağlanmaktadır (hareket enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü). Türbin sisteminin, mekanik enerjiyi üretece iletmesiyle birlikte hidroelektrik enerji üretim süreci tamamlanmaktadır (mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü).

Su gücünden yararlanma milâttan önce ilk çağlarda su değirmenleri ile başlamıştır. Günümüzde de vazgeçilmez bir enerji kaynağı olma özelliğini korumaktadır ve bu amaçla su gücünden yararlanmak için hidroelektrik santraller yapılmaktadır. ABD'de, Niagara Enerji Santrali ilk yapılan hidroelektrik santral olarak, dünya genelinde hidroelektrik santral inşaatlarının da öncüsü olmuştur [6].

Bugün dünyada 160'dan fazla ülke su gücünden faydalanarak enerji üretmektedir. Bu ülkelerin üretmiş olduğu enerji, yaklaşık 3100 TWh/yıl'a ulaşmıştır. Dünya Enerji Konseyi'nin 2010 raporuna göre de, önümüzdeki 20 yılda hidroelektrik santraller aracılığı ile üretilen enerji miktarında önemli bir artış olacağı beklenmektedir [21].

Elektrik üretimi amacıyla kullanılan kaynaklar arasında önemli bir yere sahip olan hidrolik güç Birleşik Devletlerin toplam elektrik üretiminin % 7'sini dünyanın en büyük üreticisi konumunda olan Kanada'nın ise % 21'ini karşılamaktadır. Kanada'ya benzer şekilde Çin de artan elektrik enerjisi ihtiyacının büyük bir bölümünü hidrolik güçten sağlamaktadır. Tahmini 18 GW kurulu potansiyele sahip olmasına rağmen planladığı yeni baraj ve hidroelektrik santrallerle mevcut kapasitesini daha da arttırarak yenilenebilir enerjinin payını genişletmeyi hedeflemektedir [1].

Hidroelektrik santraller, düşülerine göre, ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre, kapasitelerine göre, yapılışlarına göre, üzerinde kuruldukları suyun özelliklerine göre olmak üzere beş kısımda incelenmektedir.

1.5.1. Düşülerine göre HES'ler

Hidroelektrik santraller düşülerine göre üç kısma ayrılmaktadır. Birincisi alçak düşülü santraller $H < 15$ m'dir. Genellikle debisi büyük ve düz arazilerde akmaktadır. Yatak eğimi az arazilerde kurulmakta olup çoğunlukla Kaplan türbini kullanılan santrallerdir. İkincisi orta düşülü santraller $15 \text{ m} < H < 50$ m arasındadır. Çeşitli debilerdeki nehirler üzerinde Kaplan veya Francis türbini kullanılan santrallerdir. Üçüncüsü yüksek düşülü santraller $H > 50$ m'dir. Genellikle engebeli veya dağlık arazilerde akan nehirler veya barajlar üzerine kurulan Francis veya Pelton kullanılan santrallerdir [22].

1.5.2. Ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre HES'ler

Devamlı enerji üreten baz santraller ve enerjinin en çok ihtiyaç duyulduğu sürelerde çalışan pik santraller olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [22].

1.5.3. Kapasitelerine göre HES'ler

99 kW'a kadar olan küçük kapasiteli santraller, 100 kW - 999 kW arası olan düşük kapasiteli santraller, 1000 kW - 9999 kW arası olan orta kapasiteli santraller ve 10000 kW ve daha fazla olan yüksek kapasiteli santraller olmak üzere dörde ayrılmaktadır [22].

1.5.4. Yapılışlarına göre HES'ler

Yapılışlarına göre santraller yeraltı, yarı gömülü ve yer üstü olmak üzere üç ayrılır. Yeraltı santrali: Topoğrafik, jeolojik, ekonomik veya emniyet nedenleri ile santral yeraltında yapılabilir. Yarı gömüllü veya batık santraller: Eğer santral dar veya kayalık bir vadide yapılacaksa ve açıkta yer yoksa yarısı yer altında yarısı açıkta yapılabilir. Yerüstü santrali: Jenaratör katı ve üst yapı yer üstünde olan santraldir [18].

1.5.5. Üstünde kuruldukları suyun özelliklerine göre HES'ler

Nehir santraller: Nehir santral yapıları regülatör ve ilgili yapılar (nehir nakil araçları geçiş yeri, tomruk yolu, balık geçiş yeri) eşik, ızgara, perde, ve benzeri duvar, servis köprüsü, dalgıç perde, giriş yapısı ve bölme ayakları, santral binası, kuyruk suyu kanalı, istinat duvarlarından ibarettir.

Kanal santraller: Kanal santrallerin yapılabilmesi için su, bir çevirme yapısı ile kanala çevrilerek santraller ve ilgili yapılar bu kanalın üzerine yapılabilir.

Baraj santraller: Su alma yapısı, kuvvet tüneli, denge bacası, vana odası, cebri borular, santral binası, çıkış suyu kanalı, şalt sahası ve iletim hatları tipik bir baraj santraline ait yapılardır.

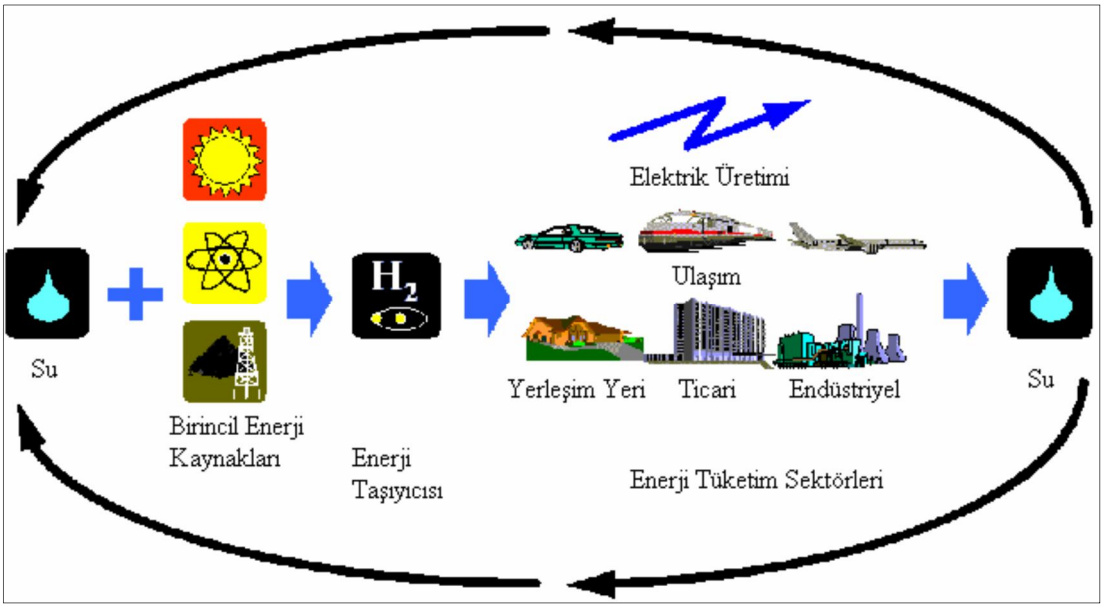
Pompaj rezervuarlı santraller: Enerjiye ihtiyacın azaldığı zamanlarda şebekeden aldıkları enerji ile rezervuara su pompalayan santrallerdir [22].

1.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen tarihte ilk defa İngiliz kimyacı Robert Boyle (1627-1691) tarafından 1671 yılında asit çözeltisi içerisinde demir parçası eritilmeye çalışılırken bulundu. Robert Boyle ve beraberindeki bilim adamları tarafından tesadüfen bulunan hidrojen elementinin üzerinde fazla durulmamıştır. Bir başka İngiliz bilim adamı olan Henry Cavendish (1731-1810) gazların fiziksel özellikleri üzerinde bir takım çalışmalar yürütürken hidrojenin benzersiz özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Henry Cavendish'in elde ettiği tecrübelerden yola çıkarak Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) adlı Fransız bilim adamı 1785 yılında hidrojene Latince'de su anlamına gelen ''hydro'' ve şekil veren anlamına gelen ''genes'' kelimelerinden türetilen ''hydrogenes'' ismini vermiştir. Böylece on yedinci yüzyılda hidrojen resmiyet kazanan bir gaz çeşidi olmuştur [1].

Dünyanın giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu bugün bütün bilim adamlarınca kabul edilmektedir. Hidrojen enerjisinin insan ve çevre sağlığını tehdit edecek bir etkisi yoktur. Kömür, doğalgaz gibi fosil kaynakların yanısıra sudan ve biyokütleden de elde edilen hidrojen, enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısı olarak düşünülmektedir. Elektriğe 20. yüzyılın enerji taşıyıcısı, hidrojene 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı diyen çevreler vardır. Hidrojen yerel olarak üretimi mümkün, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınması sırasında az enerji kaybı olan, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar her alanda yararlanacağımız bir enerji sistemidir.

Hidrojen enerjisi sistemi Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Hidrojen Enerjisi Sistemi

Üretim kaynakları bol ve çeşitli olan hidrojen fosil yakıtlardan elde edildiği gibi güneş, rüzgâr, hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile suyun elektrolizi yolu ile üretimi, biyokütleden üretimi ve biyolojik proseslerle üretimi mümkündür. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir. Suyun elektrolizi bilinen bir yöntem olmakla beraber ekonomik hale getirilmesi ve güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen üretimi konusunda araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir [18]. Ayrıca buhar elektrolizi, termokimyasal ayrıştırma, foto elektrokimyasal gibi üretim yöntemleri ile de hidrojen ayrıştırma çalışmaları yapılmaktadır. İhtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için geçerli bir alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. Bu tarzda depolanan enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi yakıt piline dayalı teknolojilerin geliştirilmesine bağlıdır [5]. Depo edilen hidrojen, elektrik üretiminde kullanılabileceği gibi toplu ulaşım araçlarında ve otomobillerde yakıt pilleri olarak istenildiği zaman kullanılabilmektedir [19].

Yakıt pilleri, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip, bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilen enerji dönüşüm teknolojileridir. Yakıt pilleri, taşınabilir bilgisayarlar, cep telefonları gibi mobil uygulamalar için de kullanılabilmektedir [5].

Enerji gerektiren hemen her alanda kullanımı kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su veya su buharı olmaktadır. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisine neden olan hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir. Ayrıca hidrojenin hızla dağılma özelliğinden dolayı, herhangi bir kaçak anında hızla yukarı doğru uçtuğundan, diğer gazlar gibi tehlikeli değildir. Hidrojenin ısı değeri tüm yakıtlardan fazladır. Bu özelliğinden dolayı, uzay araçlarında sıvılaştırılmış olarak kullanılmaktadır [20].

Hidrojen üretimi gerçekleştirilirken suyun tükenmesi söz konusu değildir, çünkü hidrojenin yanması ile yeniden su oluşmaktadır. Bu nedenle hidrojen enerjisi yenilenebilir bir enerjidir.

1.7. Deniz Kökenli Enerji

Dünyanın enerji ihtiyacını karşılamak amacı ile yapılan çalışmalara göre deniz kökenli enerji, yeryüzünün dörtte üçünün sularla kaplı olduğu düşünüldüğünde, çevreyi kirletmeden sürekli kendini yenileyerek tükenmeyecek ve önemli bir potansiyele sahip enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Deniz kökenli yenilenebilir enerjiler; deniz dalga enerjisi, deniz sıcaklık gradyent enerjisi, deniz akıntıları enerjisi ve gel-git (med-cezir) enerjisidir [23].

Dalga enerjisi, ilk yatırım ve bakım giderlerinden başka masrafı olmayan, girdi bedeli gerektirmeyen, doğaya her hangi bir kirletici bırakmayan, ucuz, temiz, çevreci ve büyük potansiyele sahip bir enerji kaynağıdır [24]. Dalgalar, güneş ışınlarının yeryüzündeki değişik yansımaları sonucu ortaya çıkan sıcaklık farklarının rüzgârları meydana getirmesi ve rüzgârların su üzerinde eserken su yüzeyi ile olan sürtünmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Hava hareketlerinin ve ısı değişimlerinin, su kütlelerinde meydana getirmiş olduğu dalga hareketleri, tükenmeyen enerji kaynağıdır. Rüzgârlar güneş ışınımı enerjisinden meydana geldikleri için denizdeki dalgalar rüzgârlardan geçen güneş enerjisinin depolanmış hali olarak düşünülebilir [25].

Deniz dalgalarından enerji elde edebilmek için, kendisine dalgaların uyguladığı güce uygun şekilde karşılık verebilecek bir yapıyla dalgaların önünü kesmek

gerekmektedir. Bu yapılar birer enerji dönüştürücüsü gibi çalışmakta; hareketli ve sabit olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Hareketli dönüştürücülerde sistemin bir kısmı veya tamamı dalga hareketiyle birlikte hareket etmekte ve bunun sonucunda mekanik enerji üretmektedir. Sabit sistemli dönüştürücülerde ise, dalganın itki kuvveti hidrolik (su) yükseltiye dönüştürülmekte ve oluşturulan havuzda elde edilen yüksek su seviyesiyle potansiyel enerji elde edilmektedir [26].

Dalga enerjisi kesiklidir ve depolanması gerekmektedir. Dalga enerjisi potansiyelinin daha açık ve gerçekçi olarak belirlenebilmesi için, dalga enerjisinden yararlanılacak olan bölgede uzun yıllara dayanan ve oldukça pahalı olan ölçümler yapmak gerekmektedir. Bu ölçümlerin yapılamadığı durumlarda ise, daha ekonomik olan rüzgâr ölçümleri yapılmakta, rüzgâr-dalga arasındaki bağıntıyı veren ve bir çok ölçüm sonucundan elde edilmiş yarı ampirik formüllerle dalga enerjisi hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu enerjiden de, ölçüm alınan noktaya yerleştirilen bir veya daha fazla dalga türbini yardımıyla elde edilebilecek olan elektrik enerjisi miktarı saptanabilmektedir [24].

Dalga enerjisi dönüşüm tekniklerinden bazıları; kıyısal rampa, şamadıra, hava camı ve dalga pompası tekniklerdir.

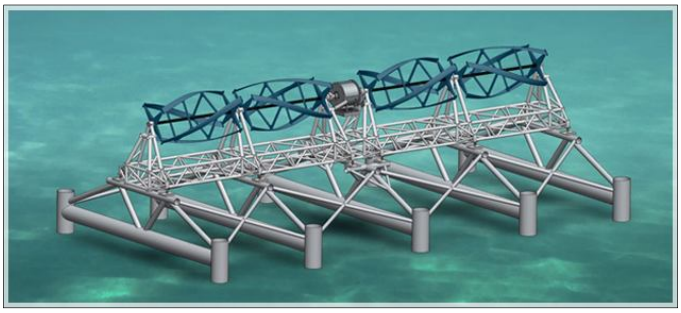
Kıyısal Rampa: Kıyıda, rampadan sonra, oluşturulan havuz okyanusta, dalgaların yükselmesiyle dolar ve rampaya yerleştirilen uygun türbinleri çevirerek elektrik enerjisi sağlar.

Şamandıra: Denizin dibindeki pompaya bağlı şamandıra, dalga haraketi ile inip yükselerek pompayı çalıştırır ve elektrik enerjisi sağlar.

Hava Camı: Deniz yüzeyine ters kapatılmış hava camında, dalgaların yükselmesiyle içindeki basınç artar ve sıkışan hava, cam içindeki türbine verilerek elektrik elde edilir.

Dalga Pompası: Su yüzeyinden belirli bir derinlikte tek yön geçişe izin veren silindirik esnek malzemeden yapılmış pompa içindeki sıvı dalga nedeniyle pompalanır ve bu sıvı, pompa içinde türbinden geçerek elektrik enerjisi elde edilir [23].

Dalga enerjisi sistemi Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Dalga Enerjisi Sistemi

Deniz sıcaklık gradyent enerjisi okyanus ısıl enerji dönüşümü (OTEC) gibi farklı isimlerle de anılmaktadır. Termal enerji değişimi ile deniz suyunda oluşan sıcaklık farklarının meydana getirdiği bir enerji kaynağıdır [27]. Okyanuslar yeryüzünün % 70'ini oluşturan bir güneş kollektörüdür. Okyanus ısısı enerji üretiminde, okyanusların güneşten topladığı ısıdaki enerji elektriğe dönüştürülmektedir. Bu yöntemle elektrik elde etmek için yüzeydeki su sıcaklığı ile derindeki su sıcaklığı arasındaki farkın 20 derece olduğu yerler kullanılmaktadır.

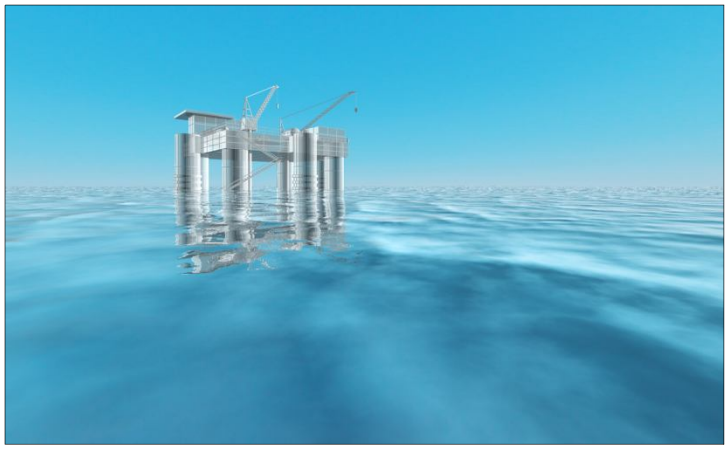
Tropik suların yüzey sıcaklıklarından mekanik enerji üretimi ilk olarak 1881 yılında Jacque d'Arsonval tarafından geliştirilmiştir. Sıcak su, sistemdeki motoru ısıtan sıvının ısınmasını sağlarken soğuk su, bu sıvının soğumasını sağlamaktadır. Büyük miktarlarda sıcak ve soğuk su okyanustan uzun büyük çaplı borulara pompalanırken, bu sular üçüncü bir boru ile tekrar okyanusa dökülmektedir [25].

OTEC çalışmaları Hawaii ve Japonya'da yapılmaktadır. 1979 yılında Hawaii Ulusal Enerji Laboratuarı tarafından 52 kW elektrik üretim kapasitesine sahip ancak net olarak 15 kW elektrik enerjisi üretebilen küçük sistemin denemesi yapılmıştır. 1981 yılında Japonya'da okyanus enerjisinden 100 kW elektrik üretim kapasitesine sahip ve net olarak 31 kW elektrik enerjisi üreten kıyı OTEC sistemi tanıtılmıştır. 1992 yılında Hawaii'de yapılan çalışmalar sonunda OTEC sistemlerinin üretim kapasiteleri 210 kW yükseltilmiştir [25].

Okyanus ısısı enerji üretim tesisleri kurulmasının diğer canlılar için de faydalı olacağı düşünülmektedir. Tesislerde derinlerdeki mineral bakımından zengin okyanus suyu kullanıldığı için kıyıdaki bitkiler de bundan yararlanacaktır. Bunun yanı sıra makineler vasıtasıyla deniz suyu tuzundan arındığı için sanayi ve tarımda kullanılabilecek bol miktarda su üretilecektir. Araştırmacılar çok yakın zamanda bu enerji üretim

yönteminin yavaş yavaş tükenmekte olan fosil kaynakların yerini alacağına inanmaktadırlar [28]. Ancak OTEC sistemlerinin kullanımını engelleyen bazı nedenler vardır. Bunlar boruların okyanusta yaşayan organizmalar ile tıkanması, ısı ileticilerin paslanmasıdır. Üretilen bir birim güce düşen yatırım maliyeti diğer yenilenebilir enerji kaynakları sistemleri ile rekabet edebilmesi için sistemin tüm parçaları ekonomik olarak üretilmelidir [28].

OTEC sistemi Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. OTEC Enerjisi Sistemi

Akıntı, deniz ve okyanuslardaki suların kütle halinde yer değiştirmesi durumudur. Oluşum nedenleri yoğunluk (tuzluluk farkı), seviye farkı ve sürekli rüzgârlardır. Denizlerin beslenme ve buharlaşma özelliklerinin farklı olması tuzluluk (yoğunluk) ve seviyelerinin de farklı olmasına neden olur. Böylece tuzlulukları ve seviyeleri farklı olan denizleri birleştiren boğazlarda ve çevresindeki denizlerde akıntı görülür. Örneğin; diğer komşu denizlere göre Karadeniz'de yağışların fazla olması, Tuna gibi bol su taşıyan ırmakların dökülmesi, buharlaşmanın az olması ve enlem gibi faktörler nedeniyle tuzluluk oranı az, su seviyesi daha yüksektir. Bu nedenle Karadeniz'in az tuzlu su tabakası üstten Ege'ye doğru Ege'nin tuzlu su tabakası ise alttan Karadeniz'e doğru akıntılar oluşturur. Ayrıca her iki yarım kürede sürekli rüzgârların okyanusların yüzey sularını itmesi ile okyanus akıntıları oluşur.

Deniz akıntılarının küresel olarak kaynak potansiyeli büyüktür, daha yüksek enerji yoğunluklarına, yüksek tahmin edilebilirlikte güç çıktılarına sahiptir, aşırı atmosferik dalgalanmalardan bağımsızdır ve görsel etkileri yoktur [29]. Güç üretimi için deniz

akıntı enerjisini kullanarak küçük araştırmalar yapıldığı bilinmektedir. Ancak, işletmede ticari anlamda kullanılan türbinlerin olmaması nedeniyle üretim maliyetlerini değerlendirmek oldukça güçtür.

Deniz akıntısı enerji santrali Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



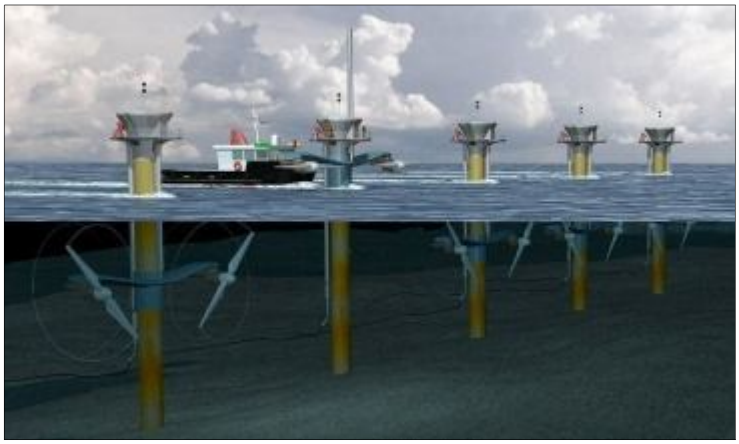
Şekil 1.12. Deniz Akıntısı Enerjisi Santrali

Med-cezir olayı yerin ve ayın çekimi arasında suyun denge sağlamasından ileri gelmektedir. Sadece dünyanın aya bakan yüzünde değil, diğer yüzünde de meydana gelir. Genellikle her 12 saat 25 dakikada bir med-cezir meydana gelir. Her gün bir önceki günden 50 dakika sonra meydana gelir. Yaklaşık 6 saatte yükselme ve takip eden 6 saatte de çekilme süreci meydana gelir [29]. Gelgit hareketlerinden elektrik üretmek için, alçalan ve yükselen gelgit arasındaki farkın en az beş metre olması gerekmektedir. Deniz veya okyanusun sahil şekli ve derinliği önemlidir. Limana yaklaşan gemiler üzerinde çok etkili olduğundan her sahilin med-cezir haritası belirlenmiştir.

Med-cezir enerjisini alabilmek için koy formundaki sahile bir baraj yapılmalıdır. Med esnasında su baraj üzerindeki türbinlerden geçerek baraja dolar. Cezir süresincede barajdan yine türbinler üzerinden geçerek denize döner. Burada med-cezir enerjisinin %8-25 i faydalı hale dönüştürülebilir. Med-cezir santrali mevsim değişikliklerinden etkilenmez. Med-cezir vasıtasıyla enerjinin daha verimli elde edilebilmesi için

sahillerin okyanusa açık olması gerekmektedir. Bu manada Med-cezir enerjisi Türkiye açısından kullanışlı değildir. Okyanusa sahili olan Fransa 18 km uzunluğunda sahilden 6000 MW'lık bir enerji üretim projesi üzerinde çalışmaktadır. Bu enerji yenilenebilir ve temiz bir enerjidir. Son yıllarda özellikle ABD, Japonya, İngiltere ve Norveç kıyılarında çokça kullanılmaktadır.

Med-cezir enerjisi santrali Şekil 1.13'de gösterilmiştir



Şekil 1.13. Med-cezir Enerjisi Santrali

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI RİSKLERİ

İnsanoğlunun hayatını devam ettirebilmesi için gerekli olan enerji kaynakları, dünyada eşit bir dağılım göstermemektedir. Enerji kaynaklarına ulaşma, güvenilirlik, enerjinin yeterli ve devam ettirilebilir olması, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler açısından sürdürülebilir ekonomik büyüme için vazgeçilmezdir. Fosil ya da, yenilenebilir enerji kaynaklarının rezerv, üretim ve ticareti, dünya siyasî ve ekonomik koşullarına ve ilişkilerine yön verecek kadar önemlidir [30].

Dünyada, fosil yakıt ve nükleer güç kullanımıyla üretilen enerji tüketiminin yarattığı sorunlar; doğal çevreye daha az zarar veren, daha verimli teknolojilere doğru yönelimi zorunlu kılmaktadır. Sanayileşmiş ülkeler, enerjinin üretim ve tüketiminde; güvenli ve güvenilir, rekabet edebilir, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerjinin etkin kullanımını sağlayacak teknolojileri desteklemek üzere önlemler almaktadırlar.

Yenilenebilir enerji kaynakları, yüksek teknolojik maliyetleri ve altyapıdaki uyum problemleri nedeniyle, geliştirilmesi gereken enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerjinin, rekabetçi, temiz, güvenli ve güvenilir, sürdürülebilir koşullarda elde edilmesi ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi için iç pazarda, serbest piyasa koşullarının işlemesini sağlayacak hukuki altyapının ve piyasa denetim mekanizmasının tesis edilmesi gereklidir [30].

Enerji yatırımları hem büyük olmaları hem de önemli bir kısmının çoğunlukla doğaya ve insana bağlı olmaları nedeni ile ciddi riskler taşımaktadır. Bu riskler projelendirme safhasında başlar, inşaat yapımında, makine, teknoloji ve kapasite seçiminde ve işletme safhasında devam eder.

Yenilenebilir enerji kaynakları için risklerin kaynakları ekonomik ve finansal riskler, inşaat ve işletme riskleri, sosyal ve çevresel riskler, politik riskler ve teknolojik riskler olarak sınıflandırılmıştır.

2.1. Ekonomik ve Finansal Riskler

Yenilenebilir enerji, piyasa mekanizması içinde ekonomik açıdan ele alınabilecek başta sürdürülebilir ekonomik gelişme olmak üzere ulusal ve global ölçekte pek çok stratejik yönelimin bir parçasıdır. Dolayısıyla pek çok durumda, piyasa dinamiklerinde meydana gelecek kayıplardan etkileneceği açıktır.

Enerji kaynaklarının rezerv büyüklüğü, bir ülkenin hem iç tüketimini karşılaması hem de ihracat geliri sağlaması açısından enerji arzının güvenilirliğini artıran bir unsurdur [30]. Enerji talebini ithalatla karşılayan bir ülke açısından ithalat bağımlılığı, arzı olumsuz etkilemektedir.

Enerjide fiyat, üretici ve tüketici ülkeler açısından farklı anlamlar ifade etmektedir. Arz fiyatının yüksek olması, kısa vadede tüketici/ithalatçı ülkenin gelirinin daha fazlasını ithalata ayırması ve arz endişelerini artırıcı bir sonuç iken; üretici/ihracatçı ülke açısından ihracat gelirinin artmasını ifade etmektedir [31]. Üretici ülkenin yüksek enerji fiyatlarının getireceği geliri elde edebilmesi için öncelikle enerji altyapı yatırımlarını tamamlaması gereklidir. Uzun vadede yüksek enerji fiyatları, tüketici ya da ithalatçı ülke açısından, ülke ekonomisine verimlilik, tasarruf ve Ar&Ge'yi artırarak olumlu katkılar sağlamaktadır.

Enerjiyi üreten ve tüketen ülkeler açısından incelendiğinde; kanıtlanmış veya potansiyel rezerv tahminleri ve üretimi; ithalat bağımlılığı oranı, mevcut/potansiyel ticaret hacmi, gelir, fiyat, talebin fiyat esnekliği ve ikame edilebilirlik, ithalat ve ihracatta sübvansiyon ve vergi indirimi ve teşvikleri, enerji ticaretinde döviz kuru ve nakliye ve depolama imkânı ve maliyeti, atıklar, yatırım eksikliği ve maliyeti, tüketim düzeyinin değişmesi gibi birçok ekonomik faktörün, enerji temininde etkili olduğu görülmektedir [32].

2.1.1. Döviz riski

Enerji yatırımlarında ulusal para-döviz ilişkisi yatırımcı için son derece önemlidir. Yatırım gelirlerinin karşılığı ulusal para olmasına rağmen krediler, yüksek meblağlarda ve uzun vadelerde temin edildiğinden bankaların zarar edebilme riskleri gözönünde bulundurularak döviz üzerinden verilmektedir. Döviz riski, döviz

kurlarında meydana gelen değişimlerden dolayı işletmelerin bilançoları veya yatırım portföyleri üzerinde kar veya zarara neden olmak suretiyle ortaya çıkmaktadır. Döviz kuru değişimlerinin neden olduğu üç risk; işlem riski, çeviri riski ve ekonomik risktir [33].

İşletmelerin yabancı para biriminden mal ve hizmet alım-satımı yapması durumunda, bu işlemlerin tutarı spot parite baz alınarak yerel para birimi ile ifade edilirse, işletmeler kredi riskine maruz kalırlar. İşlem riski, direkt olarak yerli para ile ölçülen ve fiili para değişimine neden olan ödemelerden meydana gelen likidite riski olarak da tanımlanmaktadır. Çeviri riski, işletmenin yabancı bir para biriminden belirlenmiş olan aktif ve pasif kalemlerinin yerel para cinsinden değerlerinin, bir muhasebe dönemine kadar geçen zamanda, döviz kurundaki değişmelerden dolayı ve herhangi bir fiziki işlem olmaksızın değişmesi riskini ifade eder. Çeviri riski, yabancı para birimi ile ifade edilen aktif ve pasif kalemler arasındaki eşitsizliklerden kaynaklanır. Ekonomik risk ise, bir işletmenin anlaşmalara dayalı olsun veya olmasın, nakit akışı üzerindeki toplam döviz kuru riskini ifade etmektedir. Döviz kurunda meydana gelen değişiklikler, kısa dönemde işletmenin likidite durumunda, daha ileride de firmanın tüm işlemlerinde, mali yapısında ve karlılığında kendini gösterir [34].

2.1.2. Kredi riski

Yenilenebilir enerji kaynakları projelerinin en zor aşamasını finansman aşaması oluşturmaktadır. Resmi kurumlarca YEK projeleri onaylanan birçok yatırımcı şirket finansman aşmasına gelmiş durumdadır. YEK projelerinin yüksek yatırım yükünü azaltmak amacıyla yatırımcılar hem yurt içinden hem de yurt dışından kredi bulmaya çalışmaktadır. Bununla beraber, ülkemizdeki sermayenin pahalı ve bankaların uzun dönemli kredi vermeye pek sıcak bakmamaları dolayısı ile yatırımcılar yüzlerini dış proje kredilerine dönmektedirler [35]. Dış proje kredileri, yabancı ülkeler, uluslararası kuruluşlar, yabancı bankalar ve yabancı ülkelerde yerleşik diğer finans kurumlarından sağlanan krediler olarak bilinmektedir [36].

Projelerin finansmanı için yurt içinden veya yurt dışından sağlanan krediler de risk genel olarak borçlunun sorumluluklarını yerine getirememesi durumundan kaynaklanır. Muhtemel olumsuz senaryoların gerçekleşmemesi ve proje sonunda

hedeflenen kar beklentilerinin karşılanması amacıyla projenin mali analiz ve nakit akış tablolarına bakılarak proje ile ilgili karar verilmeli ve kredi miktarı belirlenmelidir.

2.1.3. Enflasyon riski

Enflasyonun sözlük anlamı, paranın değerinin ani, hızlı bir şekilde düşmesi, fiyatlar genel seviyesinin yükselmesi, dolayısıyla dolaşımdaki para miktarının artmasıdır. Enflasyon riski ise enflasyon nedeniyle yatırımcı tarafından arzulanmayan bir reel getiri oranının gerçekleşme olasılığını ifade eder. Enflasyon oranı bir belirsizliktir ve yatırımları olumsuz yönde etkiler.

Enerjiyi tüketici konumundaki ülkeler için enerji fiyatlarındaki artış cari açığın artmasına ve enflasyonun yukarı çekilmesine neden olmaktadır. Enflasyon arttıkça da faiz oranları genelde artar ve borç veren, satın alma gücündeki kayıplarını karşılamak için ilave enflasyon primi talep eder [38].

Enflasyon artışı ile sürekli büyüyen cari açık, yenilenebilir enerji projelerini finanse edecek kaynak sorununu da beraberinde getirmektedir. Yüksek işlem ve yatırım maliyetleri ve uzun vadeli finansman kıtlığı, yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği yatırımlarının arttırılması önünde zorluk teşkil etmektedir. Finansörler açık bir şekilde bu yatırımları yüksek riskli yatırımlar olarak algılamaktadır, dolayısıyla yeterli vade ve koşullara sahip finansmana erişim kısıtlanmaktadır.

2.1.4. Elektrik fiyat riski

Yenilenebilir enerji de yeterli yatırımın yapılmasını teminen piyasa dinamiklerinin çeşitli teşvik mekanizmaları ile desteklenmesi ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan biri olan sabit fiyat garantisi, yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üreten ve sisteme veren üreticilere üretimlerinin belirlenmiş bir sabit fiyattan satın alınmasına ilişkin güvence verilmesini ifade etmektedir. Söz konusu sabit fiyatın, gerçek anlamda bir teşvik olabilmesi için üretici için karlı sayılan bir düzeyde olması gerekmektedir.

Sabit fiyat garantisi belirli bir süre için verilmekte, ülkeden ülkeye değişmekle beraber çoğunlukla yenilenebilir üretim tesisinin faaliyete geçtiği andan itibaren ilk 10-20 yıllık dönemi kapsamaktadır. Sabit fiyat garantisinde kamu tarafından verilen destek tutarı kabaca sabit fiyat düzeyinin toptan elektrik fiyatından farkı ile yenilenebilir

enerjiye dayalı olarak üretilen ve bu garanti altında satılan elektrik miktarının çarpımı olmaktadır.

Yenilenebilir enerji için sabit fiyat garantisi, 40'tan fazla ülkede uygulanmaktadır. Uzun vadeyi kapsamasıyla yatırımcının riskini azaltan ve fiyatın en azından dönemsel olarak sabit olmasıyla yatırımcının verimliliğini geliştirmeye yönelten bir yaklaşım olması, sabit fiyat garantisini büyük miktardaki yenilenebilir enerji yatırımlarını desteklemek için etkili bir araç haline getirmektedir.

Sabit fiyat garantisi avantajlı bir teşvik olarak görünmesine rağmen ekonomisi darboğazlara sahip ülkelerdeki yatırımcılar açısından bir risk oluşturabilmektedir. Örnek olarak ülkemizde Yenilenebilir Enerji Kanunu'nda belirlenen fiyatlarla devlet yatırımcıların ürettiği elektriği satın alma garantisi vermektedir. Döviz bazında belirlenmiş birim fiyatlar, döviz kurlarında ciddi ve kalıcı bir yükseliş yaşanmadığı sürece ortalama piyasa fiyatları altında kalmakta ve devletin alım fiyatını üretici için cazip hale getirememektedir. Dolayısıyla yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretimine yatırım yapan girişimcilerin zarar etmesine sebep olmaktadır.

2.2. Politik Riskler

Dünya tarihinde ülkeler arasındaki anlaşmazlıkların en önemli sebebi olan enerji sorunu, bugün de geçmişte olduğundan daha fazla, ülkelerin ekonomik ve ulusal güvenliklerini temelden etkileyen, uluslararası siyasete yön veren ve böylece tarihin akışını değiştiren bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyada, üretilmekte olan enerjinin %85'ni oluşturan fosil yakıtların kontrolünü eline almak isteyen küresel güçler arasında, enerji kaynakları ve teknolojilerinin paylaşımı için büyük bir mücadele yaşanmaktadır [30].

Fosil yakıtlarda ve özellikle de petrolde azalan rezervler nedeniyle petrol maliyetinin ve fiyatının yükselmesi, doğal afetler, nüfus artışına bağlı artan enerji talebi yanında ülkeler arasında karşılıklı diyalog yoluyla çözülebilecek sorunların karşılıklı güç gösterileri ve çatışmalarla çözülmeye çalışılması, enerji teminin de darboğazlar oluşturmaktadır. Dolayısıyla enerji kaynağı rezervinin mevcudiyeti, bir ülkenin, ekonomik, siyasî, sosyal düzeninin istikrarlı bir şekilde devam etmesine olumlu katkı sağlayabileceği gibi, tersi bir durum da söz konusu olabilir.

Enerjinin arz ve talep durumları açısından üretim ve tüketimde bir ülkenin anahtar konumdaki enerji kaynağına sahip olması veya ona olan bağımlılığı, ülkenin ekonomik, siyasî ve sosyal düzenini ve hatta ülkedeki rejimin güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir.

Dünyada veya yatırımın yapıldığı ülkede oluşan siyasi bunalımlar, ekonomik krizler bir belirsizlik unsurudur ve yatırım kararlarını daima etkilemektedir. Yatırımcı açısından daima yatırımın yapılacağı ülkenin politik bakımdan istikrarlı bir yapıda olması beklenmektedir. Siyasi otoritesinin istikrarsız bir görünümü olan ülkelerde direkt olarak finans piyasaları etkileneceğinden, yatırımcı yatırım kararını gerçekleştirirken aradığı siyasi istikrar kriterini bulamayacaktır [37]. Özel sektör yatırım kararlarında, gelişmekte olan ülke fırsatları değerlendirildiğinde, politik risklerin büyük önem arz ettiği görülmektedir.

2.2.1. Terörizm

Enerji kaynakları, jeopolitik konumu itibariyle, kaynağa sahip olan ülkeyi ve dolayısıyla da bölgeyi, siyasî istikrarsızlığa iterken, askeri ve güvenlik açısından kritik bir konuma mahkûm etmektedir. Terörist faaliyetler ve saldırılar, tüketici ve transit ülkelerdeki enerji teminindeki güvenlik, üretici ülkelerde ise talebe cevap verebilirlik açısından tehdit yaratmaktadır [30].

Tüketici ülkelerde enerji temin güvenliği, özellikle de enerji tüketimi yüksek, ancak yeterli enerji rezervine sahip olmayan sanayileşmiş ülkelerde ayrı bir öneme sahiptir. Enerji arzına müdahale, küresel enerji güvenliği için, özellikle de küresel terörizm çağında, ülkelerin ana damarlarına saldırı ve bir tehdit olarak algılanmaktadır. Örnek olarak Türkiye'de ayrılıkçı terörist faaliyetlerine devam eden PKK, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde yıllardır sürdürdüğü terör faaliyetlerinden dolayı arazinin kontrol sıkıntısından kaynaklı güvenlik zafiyetlerinin oluşması gözönünde bulundurularak yatırımların bölgede yapılmasını engellemiştir ve engellemeye devam etmektedir. 11 Eylül'de DünyaTicaret Merkezi'ne yapılan terörist saldırıları, Irak Savaşı ve Afganistan iç savaşının enerji piyasaları üzerinde çok önemli etkileri bulunmaktadır [38]. En büyük etkinin ise fiyat dalgalanmaları olduğu gözlenmektedir [39].

Enerji temininin güvenliğinde, ulaşılabilirlik açısından nakil güvenliği son derece önem arzetmektedir. Enerji nakil güzergâhı üzerinde olan ülkeler için de benzer koşullar geçerlidir. Enerji ihtiyacının kesintisiz bir şekilde karşılanabilmesi için, ülkeler arası enerji naklinde kullanılan petrol ve doğal gaz boru hatları ve elektrik iletim ağının güvenliği enerji ihtiyacının karşılanabilirliğinin önemli bir boyutunu oluşturmaktadır. Transit ülkelerin maruz kaldığı siyasî istikrarsızlık, terörizm veya bölgesel risk ve çatışmalar, enerji nakil hatları için kapsamlı güvenlik analizlerini zorunlu kılmaktadır [30].

2.2.2. İç karışıklık ve savaş

Enerji sektörü, sadece ulusal politikalar açısından değil küresel politikalar açısından da büyük önem teşkil etmektedir. Batı ülkelerinde kaynakların çok kısıtlı olması, buna karşılık az gelişmiş ya da gelişmekte olan ülkelerdeki kaynak yoğunluğu, enerji kaynaklarına sahip olma, taşıma yollarını ve ticaretini kontrol etme mücadelesi, dünyada yaşanabilecek kimi sıcak ya da soğuk savaşların temelini oluşturmaktadır [40]. Dünyanın enerji odaklı şekillendiği gözönünde bulundurulduğunda 20. yüzyılın ikinci yarısından günümüze kadar süren ve farklı nedenler öne sürülerek yaşanan savaşların da aslında enerji temelli kaynak savaşları olduğu ortaya çıkmaktadır.

En iyi tahminle 30 yıl içerisinde fosil yakıt rezervlerinin tüketimi karşılamayacak ölçüde azalacağı, enerji krizlerinin yaşanacağı bilinmektedir. Enerji krizlerinin hükümet değişiklikleri, ihtilallerin ve savaşların çıkması, ülkelerin istilaya uğraması gibi sonuçlarının herkesçe bilinen bir gerçek olmasının yanısıra ülkelerdeki kamulaştırma ve millileştirme politikaları da yatırımcıları ürkütmektedir. Yatırımcılar politik kargaşa ve çatışmaların olduğu yerlerden daima kaçmaktadır.

Dünyada enerji savaşlarının önüne geçilebilmesinin, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim ile sağlanabileceği tartışmasız bir gerçektir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansları'nda "temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları tüketim payı tüm enerjiler içerisinde en az %25 olmalıdır" sonucu çıkmıştır. Bu hedefe en geç 30 yıl içerisinde ulaşılması aksi takdirde dünyada yaşanılmayacak bölgelerin oluşacağı ve değişen iklim koşullarının kalıcı olacağı belirtilmiştir [41].

Yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça yüksek bir potansiyele sahip olan ülkelerde, kaynakların değerlendirilmesi için uygun hedeflere ve politikalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji ve üretim sistemlerinde yaşanan yavaş gelişmenin nedeni genellikle yerleşik çıkar ilişkileri, mevcut altyapının yetersizliği, ekonomik koşullar, finans bulmakta ve almaktaki zorluklar, bilimsel ve teknik yetersizlikler, yenilenebilir enerji teknolojileri ve kaynakların potansiyelleri ile ilgili bilgi eksikliğine bağlanmaktadır. Ancak bu süreçte en önemli etkenin bu engelleri ortadan kaldırabilecek ya da bunun yerine engelleri daha da güçlendirebilecek politikaların olduğu görülmektedir [42] .

2.2.3. Kanun ve mevzuatların değişmesi

Yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji üretimine yatırım yapanlar açısından kaynakların teknik olarak değerlendirilmesi, potansiyelin incelenmesi, yatırım koşulları ve oluşacak maliyetler kadar, bu kaynaklara ilişkin uygulanan politikalar ve teşvik mekanizmaları da büyük önem arz etmektedir. Ülkelerin yenilenebilir enerji politikaları ile bu çerçevede uygulanan mevzuat ve teşvik mekanizmaları, yenilenebilir enerji sektörünün yönünü çizen önemli unsurların başında gelmektedir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kullanımına yönelik 2005 yılının mayıs ayında çıkarılan Yenilenebilir Enerji Kanunu'nun amacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir.

Yenilenebilir Enerji Kanunu ile yenilenebilir enerji kaynakları tanımlanmış ve bir kısım teşvikler getirilmiş olup, söz konusu teşviklerin zaman içinde piyasada değişen dinamiklerden dolayı yeniden ele alınması ihtiyacıyla Kanunun revizyonu gündeme gelmiştir. 29/12/2010 tarih ve 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun ile revize edilmiş olan Yenilenebilir Enerji Kanunu, teşvikleri kaynak bazında çeşitlendirmek ve yerli teknolojinin gelişimini ön plana çıkarmak suretiyle yeni bir dönem başlatılmıştır.

Yenilenebilir enerji yatırımları için verilen sübvansiyonlar, düşük faizli krediler, yatırım dönemine özel bazı vergi avantajları, yatırım teşvikleri kapsamında değerlendirilmektedir. Bu kanunda da yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin 7 yıllık süreyle teşvikli fiyattan satın alınmasının garanti edilmesi, perakende satış şirketlerine belirli oranda ki elektriği yenilenebilir enerji üreticilerinden alma zorunluluğu gibi yatırım teşvikleri göze çarpmaktadır [43].

Yatırım teşvikleri, özellikle yeni teknolojilere yatırımı özendirmek için anlamlıdır. Burada, yatırıma konu olacak projenin seçim süreci önem taşımaktadır. Pek çok ülkede seçime yönelik karar sürecinin adil, tarafsız ve rasyonel olmasını garanti etmekte ve bu anlamda kamuoyunun desteğinin alınmasında zaman zaman güçlük yaşanabilmektedir.

Yenilenebilir enerjide hedeflenen gelişimi yakalayabilmesinin önündeki potansiyel sıkıntı noktalarına da bu çerçeveden bakıldığında, mali teşviklerin gerçek anlamda uygulanmasını teminen gerekli mevzuatların hazırlanmasındaki gecikmeler, piyasaya yapılan satışlarda gerek yatırımcı, gerekse sistem işletmecisi açısından yenilenebilirlerin dengeleme maliyetlerinin en aza indirilmesine yönelik yaklaşımların geliştirilmemiş olması ve çevre etki değerlendirme konusunda yatırım öncesi ve sonrasında sıkıntı yaşanması gibi konuların ön plana çıktığı görülmektedir.

2.3. Teknolojik Riskler

Günümüzde yenilenebilir enerji sektöründe, yenilik ve yeni teknoloji geliştirme başarılı endüstriyel büyümenin anahtarı olarak görülmektedir. Bu sebeple yenilenebilir enerji politikalarını destekleyen stratejilerin potansiyel statüsünden kaynak statüsüne geçebilmesi için modern teknoloji desteği şarttır [44]. Gerek iç gerekse dış piyasaya yönelik yatırımların veya Ar&Ge çalışmalarının endüstriyel enerji piyasasının güç kazanmasına, sürüdürülebilir enerjnin altyapı alanlarındaki dönüşümüne yardımcı olacağı, ayrıca yeni ihracat alanları yaratacağı ifade edilmektedir [45]. Dolayısıyla yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik eden enerji politikalarının, araştırma ve teknoloji geliştirmeye destek sağlaması, yerli piyasanın iç taleplerini karşılaması ve dünya piyasasında da rekabet gücünü arttırabilecek doğrultuda olması gerekmektedir.

Son 10 yılda dünyada ki mevcut yenilenebilir enerji sektörü potansiyelinin geliştirilmesinde kamu kurumları düzenlemelerinin, teşvik edici mekanizmalar geliştirilmesi, teknoloji üretimi konusunda devletin sunduğu bir altyapıda, araştırmacıların, üniversitelerin ve özel sektörün proje üreterek büyük oranda yatırımlara dönüştürülmesi yönünde oluşturulduğu görülmektedir. Ancak yeni enerji teknolojilerini destekleyen stratejilerin, ülkelerin enerji kaynağı, yenilik sistemi, endüstrinin durumu gibi iç ve dış faktörleri ele alındığında ev sahibi ülkenin iç pazarının büyüklüğünden ziyade dünya pazarındaki payının önemli olduğu dikkat çekmektedir.

Ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynakları mevcut teknoloji düzeyi incelendiğinde, elektrik üretiminde kullanılan elektro-mekanik aksamın yerli üretim hacminin çok yetersiz olması sebebiyle bu kaynaklardan elde edilen elektriğin maliyetinin oldukça yüksek olduğu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının sağladığı avantajlara rağmen, ülkemizde istenen düzeyde olmadığı gerçeğiyle karşılaşmaktayız. Örneğin Danimarka, küçük iç pazarına karşın dünyada en büyük rüzgâr türbinlerini üreten ülkedir [44]. Türkiye'de ise bir rüzgâr türbinini kendi markasıyla ve sertifikasyon sahibi üreticilerden aldığı ekipmanlarla yapan bir üretici bulunmamaktadır. Sadece rüzgâr türbini kanat, kule ya da dişlilerini üreten üreticiler bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi yatırımlarına ağırlık verilebilmesi için, yerli malı rüzgâr türbinleri de üretilmelidir. Yıllar itibariyle dinamik bir şekilde gelişen teknoloji sayesinde Avrupalı ve Amerikalı üreticiler megavat boyutunda güç üretebilme kapasitesine ulaşmışlardır. Küresel dünyada türbin üreticilerinin sınırlı sayıda olması sebebiyle, türbin piyasasında çok ciddi tekel oluşurken, yatırımcılar finansal kaynak sahibi olmalarına rağmen türbinleri temin etmede sıraya girmektedirler. Türkiye'de yedek parça ve mühendislik konularında tecrübeli olan firmaların bu alana yönlendirilmesi durumunda istihdam imkânları oluşması, ithal edilen rüzgâr türbinlerinin yerli üreticiler tarafından karşılanması, sektörün ihtiyacı doğrultusunda yan sanayinin gelişmesi sağlanabilir. Böylece ithalatla kaybedilen gelirlerin ülke sınırlarında kalması da sağlanabilir. Ülkemizde 2010-2014 Enerji Strateji Planı kapsamında "Enerji Sektöründeki Ar-Ge Projelerinin Desteklenmesi" amacıyla Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı EN-AR programını yürürlüğe koymuştur. Bu teşvikler dışında Avrupa Birliği programları kapsamında hibe

programları da alınabilmektedir. Kullanılan enerjiyi, enerji verimliliği yüksek, temiz ve yeni teknolojiler ile yenilenebilir enerji sistemlerinden sağladıkça bu tip projelerin gelişeceği ve daha çok destek bulacağı düşünülmektedir.

2.3.1. Teknik ve mühendislik tasarım hataları

1973 petrol kriziyle ortaya çıkan enerji sorunu, konut ve ticari binalarda ısıtma, soğutma ve aydınlatmada daha az enerji kullanımını sağlayacak ve eşdeğer hizmeti temin edecek teknoloji arayışlarına olan özel ilgiyi arttırmıştır. Geliştirilecek tasarım ve cihazlarda enerji etkinliğinin yanında, güvenlik, düşük bakım maliyetleri, daha sessiz çalışma, daha dayanıklı malzemelerin yaygın kullanımı gibi faydaların sağlanması beklenmektedir [30].

Enerji projelerinin geliştirme aşamasında projeye ilişkin teknik, mali ve yasal tüm unsurların dikkatle planlanması esastır. Örneğin, ekipman tedariği aşamasında ekipmanın kalitesinin garanti altına alınması gerekmektedir. Ekipmanlar sipariş üzerine üretilmekte ve üretim sürecinin teknik uzmanlığı olan üçüncü taraflar tarafından denetlenmesi, tasarım esaslarına uygunluğun izlenmesi gibi önlemler ekipman kalitesinden emin olmak üzere alınabilmektedir. Ekipman kalitesi, doğrudan üretimin düzeyi ve bakım maliyetlerini etkilemekte olduğundan dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Bu konu, kredi sağlayan kurumlar nezdinde de önemlidir.

Günümüzde enerji santralleri tasarımcıları tarafından kullanılan en önemli optimizasyon kriteri "minimum enerji maliyeti"dir. Bu kritere göre yapılacak olan optimizasyon işlemi disiplinler arası bir çalışmayı gerektirmektedir. Disiplinler arası bir çalışmada karşılaşılacak mühendislik ve işçilik hatalarının temelinde tasarım hataları yatmaktadır. Normal şartlarda hataların, projenin bileşen bazında test edilmesi aşamasında tespit edilmesi ve entegrasyon aşamasına gelmeden çözülmesi gerekmektedir. Hataların sistemin devreye alma aşamasında tespit edilmesi durumunda ise şişen maliyet ve süre aşımları ile kontrolden çıkmış bir projenin karşımıza çıkması kaçınılmazdır.

2.3.2. Diğer enerji türlerindeki teknolojinin gelişme riski

İhtiyacı olan enerjiyi kendi öz kaynaklarını kullanarak üretebilen ülkeler, ekonomik açıdan gelişmişler ve uyguladıkları enerji politikalarıyla, dünya siyasetine yön

vermeye başlamışlardır. Dünya siyasetine yön verebilecek kadar güçlü ülkelere bakıldığında, enerji sektörüne yapmış oldukları yatırımların yanısıra bu sektördeki gelişmiş teknolojileri ile de dikkat çekmektedirler. Daha iyi teknoloji geliştiren ya da seçen ülkeler diğer ülkelere karşı önemli bir rekabet silahı elde etmektedir. Burada teknolojik gelişmişliğin seviyesi hem aynı türdeki hem de farklı türdeki enerji üretim santrallerine yapılan yatırımlarla doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla enerji sektöründeki farklı teknolojilere yapılan yatırım, bir risk olarak değerlendirilirken dünya siyasetinde dengeleri her an değiştirebilecek kadar güçlü bir neden olarak kabul edilmektedir. Örneğin rüzgâr enerji santrallerinde daha iyi tasarım, geliştirme, üretim yaparak rüzgâr enerjisinin aşağıdaki gelişmelerini sağlayan ve bu enerji kaynağının kullanılabilirlik yüzdesini arttıran ülkelerin dünya sahnesindeki konumlarının değişeceği de aşikârdır [46].

• Aerodinamik tasarım
• Gelişmiş yük ve dayanım güvenliği
• Yüksek dayanımlı ve sönümlü malzemelerin kullanımı
• Gelişmiş üretim teknolojileri
• Yeni konseptlerin oluşturulması
• Gelişmiş kanat tasarımı ve bakım-onarım masraflarının azaltılması
• Türbülans altında yüklerin durumunu, yapısını ve türbin ömrüne etkisini kavrayabilmek
• Sistem model ve simülasyonlarını geliştirmek
• Entegre jeneratör ve güç elektroniği sayesinde mekanik dişli kutularından kurtulmak
• Verimli ve düşük maliyetli enerji depolamak
• Daha iyi rüzgâr hızı karakter analizi yapmak

Enerji sektöründe farklı teknolojilere yapılan yatırımlar büyük oranda gelişmişlik göstergesi olmakla birlikte, enerji santrallerinin uzun ömürlü yatırımlar olduğu düşünüldüğünde önemli ölçüde belirsizlik ve risk kaynağı olarak da görülmektedir. Ancak yeni teknolojilerin kullanılması ile ortaya çıkabilecek risklere sık rastlanmamaktadır.

2.4. İnşaat ve İşletme Riskleri

Günümüzde, elektrik enerjisinin ilk üretildiği yerden tüketiciye ulaştığı noktaya kadar her aşamada en uygun tasarımın ve tasarımın sonucu olarak ortaya çıkan işletmenin büyük önem taşıdığı artık bilinen bir gerçektir. Mevcut tasarımın gerçeklenebileceği kuruluş yerinin seçimi aşamasında, yatırımcılar tarafından birçok ölçüt değerlendirmeye alınmaktadır. Belirlenecek bir bölge içindeki tüm noktaların, bu bölge dışında kalan noktalar karşısında aynı üstünlüklere sahip oldukları kabul edilmektedir. Dolayısıyla hammadde kaynaklarına yakınlık, enerji ve yakıt kaynaklarındaki yoğunluk, yan sanayi kuruluşları, işgücü maliyeti, pazara yakınlık, nakliye olanakları ve maliyetleri, ulaşım olanakları, yaşantıyı etkileyecek iklim koşulları, devlet teşvikleri ve kısıtlamaları gibi nicel ve nitel veriler birlikte değerlendirilmelidir.

Belirlenen bölge içerisinde son aşama olan arsa seçimi, söz konusu faktörler ve aralarındaki ilişkiler açısından, bölge seçimine göre daha karmaşık yapıda alınacak bir karardır. Bu seçimi yaparken arazi alanı ve arazinin direnci, topoğrafik yapısı, imar durumu gibi faktörler ve diğer işletmelerle bütünleşme olanağı, yan sanayinin durumu da incelenmelidir. Bu veriler değerlendirilerek işletmenin üzerine kurulacağı arsaya karar verilmelidir. Bölge seçiminde yapılan bir hatanın konum yeri seçimiyle düzeltilmesinin mümkün olmayacağı düşünüldüğünde konum yeri seçiminin bir mühendislik sorunu olarak ele alınıp detaylı analizlerle çözülmesi gerekmektedir.

Bir enerji santrali yapımının en zor kısımlarından birisi planlanma ve tasarım aşamasıdır. Konumlandırılacağı yere uygun yüksek verimlilikle çalışması beklenen santral için planlama ve tasarım aşaması tamamlandığında bir sonraki adım olan inşaat aşamasında santral için güvenli montaj beklenmektedir. Santral devreye alındığında ise mevcut girdilerin en yüksek kar getirisi olan çıktılara dönüşmesi beklentisi kaçınılmazdır. Bu sebeple firmalar işletme politikalarında, ürettikleri enerjileri satarken kimlerle hangi sürelerle anlaşacaklarını, satış fiyatlarını zamana ve müşteriye göre nasıl tespit edeceklerini, taahhütlerini yerine getirememe riski karşısında ne yapacaklarını, farklı rakip hareketlerine karşı ne yapacaklarını, nasıl bir pazarlama politika ve stratejileri kullanacaklarını düşünmeli; hatta benzetim modelleri geliştirmelidirler [139].

2.4.1. İşçi hataları ve iş kazaları

5510 sayılı SGK kanununun 13. maddesinde iş kazası tanımı şu şekildedir:

• Sigortalının işyerinde bulunduğu sırada,

• İşveren tarafından yürütülmekte olan iş nedeniyle sigortalı kendi adına ve hesabına bağımsız çalışıyorsa yürütmekte olduğu iş nedeniyle,

• Bir işverene bağlı olarak çalışan sigortalının, görevli olarak işyeri dışında başka bir yere gönderilmesi nedeniyle asıl işini yapmaksızın geçen zamanlarda,

• Bu Kanunun 4 üncü maddesinin birinci fıkrasının (a) bendi kapsamındaki emziren kadın sigortalının, iş mevzuatı gereğince çocuğuna süt vermek için ayrılan zamanlarda,

• Sigortalıların, işverence sağlanan bir taşıtla işin yapıldığı yere gidiş gelişi sırasında, meydana gelen ve sigortalıyı hemen veya sonradan bedenen ya da ruhen özüre uğratan olaydır.

Literatürde araştırmacılar tarafından yapılan iş kazası tanımının ise birçok çeşidinin olduğu görülmektedir. Bu tanımlardan bazıları şu şekildedir: İş kazası, olaylar zincirinde beklenmedik ve hatalı bir davranış ya da teknik bir arıza nedeniyle ortaya çıkan, sonucunda her zaman bir sakatlanma, ölüm ya da tahrip görülmese bile belirli bir faaliyetin tamamlanmasını engelleyen bir olaydır. İş kazası, kişilere ve/veya eşyaya zarar verdiği için işletmedeki faaliyetin durmasına veya kesintiye uğramasına neden olan, istenmeyen ani bir olaydır [47]. İş kazası işçinin yaralanması, sakatlanması, ölmesi veya kişinin işini yaparken hastalanması, binaya, tesise, ekipmanlara veya malzemelere yahut çevreye zarar vermesiyle ilgili kayıplar veya iş kaybı ile sonuçlanan planlanmamış olayların tümüdür.

Hızlı sanayileşme ve teknolojik gelişmenin doğal sonucu olarak köylerden kentlere doğru göç etme ile başlayan kentleşme, geçiş sürecinde insanoğlu için büyük bir risk taşımaktadır. Vasıfsız insanlar için para kazanmanın oldukça yaygın olduğu bir sektör olan inşaat sektöründe bu risklerin çok sayıda kötü örnekleriyle karşılaşılmaktadır.

İnsan kaynaklı kazaların bir kısmı fiziksel kayıplara bir kısmı ise makine\teçhizat ve tesis bünyesinde meydana gelecek hasara neden olduğundan, bu kazaların sonuçları yatırımcı tarafından inşaat süresinin uzaması olarak algılanmakta ve projede istenmeyen maliyet olarak değerlendirilmektedir. İnşaat sektöründe meydana gelen iş

kazalarının oldukça yüksek oranlara sahip olduğu, istatistikî verilerde görülmektedir. Araştırmalar elde edilen kaza maliyetlerinin inşaat sektörüne yatırım yapan bir firmanın proje bedelinin %8'i olduğunu göstermektedir [47].

2.4.2. Plan dışı bakım ve onarım

Sanayi devrimi öncesinde kullanılan makine\teçhizatlarda arızaya neden olan bileşenler veya malzemeler genelde basit yapıda olduklarından değişimleri, tekrar yapılmaları, zaman açısından veya ekonomik açıdan ciddi sorunlara ve kayıplara yol açmamaktaydı. Yapılan bakım çalışmaları "arıza olduktan sonra onar" prensibine dayanmakta ve arıza olana dek sistemin veya bileşenin bakıma sokulması gerekmemekteydi. Söz konusu bakım birinci nesil bakım veya düzeltici bakım yani en düşük düzey bakım sistemi olarak bilinmektedir [48].

Günümüzde ise teknolojinin gelişmesi ve artan üretim faaliyetleri oluşan her hatanın pek çok açıdan ciddi sonuçlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Elektrik enerjisi depolanması zor olan bir enerji kaynağı olması sebebiyle kayıpların en aza indirilmesi, güvenilirliğin arttırılması ve bakım süreçlerinin iyileştirilmesi konuları enerji verimliliği açısından gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır [49]. Planlanmayan arıza süresinin neden olduğu maliyetler, sektörler ve herhangi bir sektördeki yatırımcılar arasında önemli ölçüde farklılık gösterirken, bu maliyet farklılıkları işletme boyutu ve ölçeğindeki farklar, işletme modelleri, geçerli talep düzeyleri, yasal ve kurumsal gereksinimler, coğrafi konum ve çok sayıda başka unsurdan kaynaklanmaktadır.

Enerjinin diğer tüm sektörler için bir girdi ve olmazsa olmaz olduğu düşünüldüğünde, enerji santrallerinde yaşanacak olan arızaların büyüklüğü ve buna bağlı olarak bakım çalışmalarının uzaması diğer tüm sektörlerde yaşanacak bir kayıp olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla enerji de yaşanacak kayıpların minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Beklenmedik arıza durumlarında doğru bakım stratejisinin uygulanabilmesi için arıza nedenleri doğru tanımlanmalı ve kullanılan donanıma ait geçmiş arıza bilgileri ve yapılan güvenilirlik analizleri göz önünde bulundurularak malzemenin gözlem altına alınması sağlanmalıdır.

2.4.3. Periyodik bakım süresinin uzaması

İnsan hayatındaki önemi her geçen gün biraz daha artan elektrik enerjisi, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerindeki yolculuğunu tamamladıktan sonra son kullanıcıya ulaşmaktadır. Büyük ölçülerde depolanamadığı için de arz-talep dengesinde sıkıntı yaşanmaması için ayrıntılı bir planlama gerektirir. Bu planlamanın yanı sıra gerek üretim gerek iletim gerekse dağıtım sistemlerinde arızaların asgariye indirilebilmesi için periyodik bakımların yapılması esastır [50].

Elektrik enerjisi, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin verimli çalıştırılmalarında bakım ve revizyonların önemli bir yeri vardır. Bakımlar kesinlikle tamir etmenin dışında düşünülmelidir. Bakım işlemi tamir işlemine dönüştüğünde makinelerin verimli ve güvenli çalışmaları mümkün olamamaktadır. Ancak bakım, koruyucu işlevini gördüğü durumlarda güvenli bir işletme sağlanır. Koruyucu bakımın düzenli ve programlı yürütüldüğü santrallerde verimli bir işletme sağlandığı gibi, ani arızaların meydana gelmesi olasılığı azalacak ve dolayısıyla tamir bakım masrafları ile arıza nedeniyle üretilemeyen enerji de azalacaktır [51].

Periyodik bakımlarında dikkat edilmesi gereken referans değerler geçici kabul dönemi nihai kontrol değerleridir. Periyodik bakımlarda yapılacak iş, aciliyetine, hattın enerjili veya enerjisiz durumda yapılabilirliğine göre ele alınıp enerji kesilmesini gerektirmeyen işler bir program dâhilinde yapılmalıdır [50]. Enerjinin kesilmesini gerektiren durumlar varsa aciliyet durumu da dikkate alınarak programlanıp, gerekli enerji kesme izni alınarak yapılmalıdır. Bu tür çalışmalarda, işin yapılacağı sürenin iyi tahmin edilerek mümkün olduğunca verilen saatler içinde kalınması gerekmektedir.

2.4.4. İşletme masraflarının tahmin edilenden yüksek çıkması

Bir evrensel olgu olarak karşımıza çıkan ve işletme olarak adlandırılan ekonomik birimler, çeşitli üretim faktörlerini birleştirerek mal veya hizmet olarak adlandırılan toplum gereksinimlerini karşılayan değerleri üretmektedir. Üretim faktörlerinin şekil değiştirmesiyle ortaya çıkan bu mal ve hizmetler her işletmenin faaliyet konusuna göre çok çeşitlilik göstermektedir [52]. İşletmelerde üretilen mamüller, değerler ve amaçlar ne kadar farklı olursa olsun, hepsinde ortak nokta üretim faktörlerinin bir araya getirilmesidir. Her işletmenin, kendi faaliyet konusunu oluşturan mal veya hizmetleri

üretimi sırasında yok ettiği üretim faktörlerinin para ile ifade edilen değerine ise "Maliyet" denmektedir [53].

Enerji sektörüne ekonomik açıdan bakıldığında dünyada daha az maliyetle üretim yapılan petrol ve doğal gaz rezervlerinin azaldığı ve buna paralel olarak yatırımların, yenilenebilir enerji santrallerinin inşa ve idame ettirilmesi yönünde ivme kazandığı görülmektedir. Enerji santrallerinde, santrallerin üretim yapabilmesi için gerekli olan malzeme, işçilik, yönetim maliyetleri ile planlı ve zorunlu bakım için gerekli olan malzeme ve işçilik maliyetleri, işletme ve bakım masrafları olarak adlandırılmaktadır. Santral tipleri arasında farklılık gösteren bu grup maliyetler, birim güç başına değer olarak gösterilmektedir. Santrallere ait birim elektrik işletme ve bakım maliyetlerini hesaplamak için, ömür boyu yapılan tüm yıllık işletme ve bakım maliyetleri, santralin işletmeye alındığı yıla getirilerek, üretilen enerjiye dağıtılmaktadır [54].

Enerji santrallerinde işletme maliyetlerini oluşturan harcamaların alt bölümleri aşağıdaki gibidir [55].

- Ekipman satın alama maliyetleri,
- Satın alınan ekipmanların kurulum maliyetleri,
- Boru döşeme maliyetleri,
- Kontrol sistemleri maliyetleri,
- Elektrikli ekipman maliyetleri,
- Arazi satın alma maliyetleri,
- İnşaat, bina ve mimari çalışmaların maliyetleri,
- Hizmet ve işçilik maliyetleri,
- Mühendislik ve müşavirlik maliyetleri,
- Konstrüksiyon maliyetleri,
- İhtimal maliyetleri,
- Start-up maliyetleri,
- Lisanslama ve araştırma maliyetleri,
- Çalışmaların sürdürülmesi için gerekli maliyetleri.

Birim elektrik üretim maliyeti, santral tipleri arasında maliyet üzerine etki eden faktörlerin değerlerinin ve etkilerinin farklı olması nedeni ile önemli değişiklikler göstermektedir. Bu değişimlerin, santrallerin birim elektrik üretim maliyeti ile

karşılaştırılmalarında, birbirlerine göre avantajlı oldukları durumları göstermesi için yapılan tahminlerden sapmaların minimum düzeyde olması gerekmektedir.

2.4.5. İnşaat süresinin uzaması

İnşaat süresi, ilk betonun atılmasıyla elektrik şebekesine bağlantı arasında geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Enerji sektöründe inşaat sürelerinin, projenin büyüklüğüne, karmaşıklığına, kullanılan teknolojilere ve projenin gerçekleştirildiği arazinin ortam şartlarına bağlı olarak uzaması söz konusudur.

Enerji santrallerinde genellikle inşaat alanının kaynağın bulunduğu yere yakın olması veya inşaat konusunda kolaylık sağlayabilecek alanların seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir. Örneğin, rüzgâr enerji santrallerinde inşaat sürecinde karşılaşılan sorunlardan birisi türbinlerin alana taşınımı için uygun yolların bulunmamasıdır. Ülkemizde yapılan rüzgâr santrallerinde daha inşaat aşamasında yolların uygun genişlik ve taşıma kapasitesinde yapılmamasından dolayı ağır vasıtalar yolu çökertmekte ve nakliyenin aksamasından dolayı inşaat süreleri uzamaktadır [56]. Özellikle dağlık bölgelerdeki santral kurulumlarında yapılacak yol çalışmaları inşaat sürelerinin uzamasına neden olmaktadır.

Her projede farklı oranlarda mevcut bulunabilen risklerin sistematik olarak değerlendirilmesi ile riskler önlenerek ya da sonuca olumsuz etkileri en aza indirgenerek performans, maliyet hedeflerine ulaşmak olasıdır.

2.4.6. Ekipmanların tedariklerinde gecikme

Bir üretim işletmesinde, üretim faaliyetini yerine getirebilmek için gerekli makine ve teçhizat, amortismana tabi maddi duran varlıklar, hammadde malzemeler ve üretim ve yönetime ilişkin her türlü hizmetin tedarik edilmesi gerekir. İşletmenin ihtiyacı olan bu girdilerin tedariki esnasında; sipariş hazırlama, sipariş verme, satın alma, komisyon, sigorta, finansman, seyahat ve konaklama, taşıma, navlun, aktarma, boşaltma, ardiye, sipariş kabul, uygunluk kontrolü, stoğa alma, montaj gibi pek çok gider yapılmaktadır [57].

Üretim faaliyetlerini aksatan her türlü tedarik yetersizliği nedeniyle, üretimin durması veya kesintiye uğramasının neden olduğu kayıplar işletme maliyetlerini

etkilemektedir. Bu sebeple işletmeler kuruluş aşamasından başlayarak her aşamada, işletmeyi meydana getiren ve faaliyetlerini devam ettirebilmek için gerekli olan her türlü girdiyi tedarik etmek zorundadırlar. Rekabetçi baskılar, işletmeleri hammadde temininden ürünün müşteriye teslimine kadar değer zincirinin her aşamasında maliyet ve zaman kullanımını azaltmaya zorlamaktadır. Dolayısıyla işletmelerin zamanında devreye alınması, arıza ve bakım çalışmalarının tahmin edilen sürelerde gerçekleştirilmesinde tedarik zinciri yönetiminin son derece önemli olduğu görülmektedir.

Tedarik zinciri yönetiminde sipariş durumu, stok düzeyleri ve teslim süreleri ile ilgili doğru ve gerçek zamanlı bilginin eksikliği, tedarik zincirinde belirsizlik ve değişkenliği beraberinde getirmektedir [57]. Rekabet güçlerini artırmak isteyen işletmelerin tedarikçileriyle ve müşterileriyle ilişkilerini işbirliği esası çerçevesinde yeniden yapılandırmaları gerekmektedir.

2.4.7. Doğal afetler

En genel tanımla insanlar için fiziksel ekonomik ve sosyal kayıplar doğuran, normal yaşamı ve insan faaliyetlerini durdurarak veya kesintiye uğratarak toplulukları etkileyen doğal, teknolojik veya insan yapısı kökenli olaylara afet denilmektedir [58]. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere doğal, teknolojik veya insan kökenli bir olayın afet sonucunu doğurabilmesi için, insan toplulukları ve insan yerleşim yerleri üzerinde kayıplar meydana getirmesi ve insan faaliyetlerini bozarak veya kesintiye uğratarak bir yerleşim birimini etkilemesi gerekmektedir [59]. Dünyada her yıl yaklaşık 130.000 kişinin doğal afetler sonucu hayatını kaybettiği ve bunun ekonomik maliyetinin 440 milyar dolar civarında olduğu tahmin edilmektedir. Nüfusunun %85'i, sanayi tesislerinin %98'i deprem kuşağında yer alan ülkemiz de, doğal afet riski yüksek bir ülkedir [60].

Doğal afetlerin ülkelerin ekonomilerini, endüstriyel yapılarını büyük ölçüde etkilediği bilinen bir gerçektir. Sanayi sektörü en büyük zararı fiziksel hasardan, hammadde akışının kesilmesinden, işgücü ve müşteri kaybından, can damarı sistemlerinin aksamasından görmektedir [61]. Doğal afetlerin sektörler üzerindeki başlıca olumsuz etkileri, işyerinin kapanması, işgücü ve müşteri kaybı, mülkiyet ve envanter kaybı; iş için gerekli ödemelerin yapılmasında güçlüklerle karşılaşılması, yatırımlara

aktarılabilecek fonların hasar kaybının finanasmanında kullanılması sonucu yatırımların azalması olarak görülmektedir [62].

Doğal afetlerin sektörler üzerindeki etkileri, büyük ölçüde firmaların karakteristiği ile ilişkilendirilerek açıklanmaktadır. Buna göre doğal afetlerin sektörlerin üzerindeki etkisi, firmanın yaşına, firmaların büyüklüğüne, endüstrinin yapısına, firma mülkiyetinin yapısına ve firmanın doğal afet öncesi durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Enerji sektörü için doğal afetlerin etkileri değerlendirildiğinde işletmelerde meydana gelen maddi zararın boyutları büyük ve buna bağlı bakım masrafları oldukça yüksektir. Ancak daha önemlisi enerji kesintileri sebebiyle yaşanan teknolojik aksaklıkların olay yerine zamanında müdahale ihtimalini düşürmesinden dolayı can kayıplarına varan sonuçlar doğurması daha acı bir gerçektir.

2.4.8. Yangın ve patlama

Yanabilir bir malzemenin bir oksitleyici ile birlikte, genellikle duman yayılması ve/veya kızıl parıltılar ve/veya alevlerle birlikte ortaya çıkardığı ekzotermik tepkime olayına yanma adı verilmektedir. Yangın ise kontrolümüz dışında gelişen bir yanma olayıdır. Yanma tepkimesinin şiddeti, yaydığı ısı ile ölçülmektedir. Yanmanın yayılma hızı 10 cm/s'yi geçerse bu yanma olayı "patlama" olarak nitelendirilmektedir [63].

İnsanlar ateşi kullanmaya başladıkları günden bugüne dek yangınlardan etkilenmiştir. Yangınların etkilerine bakıldığında şehirlerin dokularını, malzemelerin kullanımlarını değiştirdiği görülmektedir.

Enerji santralleri yangın ve patlama riski açısından değerlendirildiğinde yüksek tehlike sınıfında yer alan işletmeler sınıfındadır. Bu tür tesislerde yangın riski çok dikkat edilmesi gereken acil durumların başında gelmektedir. Bu tesislerde kapalı alanların, kimyasalların ve yanıcı alanların fazla olduğu mekânlar sıklıkla bulunmaktadır. Her enerji santralinde bir enerji kaynağı, bir motor, bir alternatör ve bir transformatör bulunmakta olup doğru akımın uzun mesafeye taşınabilmesi için çok büyük kablolara ihtiyaç vardır. Bu sebeple hemen hemen bütün akım şebekelerinde alternatif akım kullanılmaktadır. Alternatif akım, üretildiği yerden yüksek gerilim halinde iletilmekte ve böylece uzun mesafelere en az kayıpla nakledilmektedir. Bu durumda elektrik kullanılacak bölgede istenilen gücü elde etmek için akım şiddeti küçük ise gerilimin

yüksek veya gerilim küçük ise akım şiddetinin yüksek olması gerekmektedir. Ancak, akım şiddeti büyüdükçe fazla ısınma olmakta ve buna bağlı olarak yangın ve patlama riskleri artmaktadır. Bu tesislerde olabilecek yangınlara karşı tesisin acil durum organizasyonu ve yangınla mücadele ekiplerinin iyi planlanması gerekmektedir.

2.4.9. Rüzgârın değişkenliği

Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları, rüzgârları oluşturmaktadır. Diğer bir ifadeyle rüzgâr yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı hareketlerdir. Rüzgâr enerjisi de, güneş enerjisinin çevrime uğramış şeklidir [2].

Rüzgâr atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Rüzgârın enerjiye çevrimi sırasında rüzgâr türbinin rotoru hava akımındaki enerjiyi absorbe eder ve bu da rüzgârın hızına bir etkide bulunur. Rotoru terk eden havanın hızı azalır ve teğetsel olarak da yönünde bir sapma olur. Rüzgâr gücünün hesabında kinetik enerji formülü temel alınır. Türbine giren rüzgârın enerjisi ile çıkan rüzgârın enerjisi arasındaki fark elde edilen enerjiyi verir. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgârdan sağlanacak enerjinin miktarı rüzgârın hızına bağlıdır. Rüzgârın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı olarak artar [2]. Sağlayabileceği enerji gücü ise estiği süreye bağlıdır.

Rüzgâr türbinlerinin kurulduğu yerdeki ortalama rüzgâr hızının ekonomik açıdan verimli güç çıkışları oluşturamaması ve elektrik üretmek için beklenen eşik altına düşebileceği riski göz önünde bulundurularak bir rüzgâr türbini tesis etmeden önce seçilen yörenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin ve buna ait teorik hesapların yapılması gerekmektedir.

2.4.10. Seçilen türbinin uygunluğu

İnsanlık yel değirmenlerinden, modern rüzgâr santrallerine doğru uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır [64]. Teknolojinin beraberinde getirdiği yenilikler de gözönünde bulundurulduğunda çok çeşitli alanlarda yararlandığımız rüzgâr enerjisinden verimli bir enerji elde etmek amacıyla mevcut şartlara göre kurulacak rüzgâr türbinleri seçiminin önem arzettiği görülmekmektedir.

Rüzgâr türbinleri rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini başlıca; kule, pervane, gövde, yüksek ve düşük hız şaftları, dişli kutusu, frenleme sistemi, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, yaw mekanizması ve jeneratörden meydana gelmektedir. Her bir rüzgâr türbini farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahip olması sebebiyle türbinler tasarım ve konstrüksiyona göre farklı elemanlardan oluşabilmektedir. Bölgedeki rüzgâr ve maddi imkânlara göre yüksek performansla çalışması beklenen türbinlerin seçiminde, türbinin özellikleri dikkatle incelenmelidir. Rüzgâr türbinlerinin kurulduğu yerde daha önce yapılmış rüzgâr hızı ölçümlerine göre uygun güçte ve yükseklikte türbinler seçilmelidir.

Araştırmalar, yakın geçmişte, yürütülen başarılı çalışmalar sonucu, rüzgârla ve rüzgârdan enerji üretiminde verimin artırılması ile ilgili değişkenler hakkında daha somut bilgilere ulaşıldığını göstermektedir [65]. Yük tahminleri, rüzgârın doğasını ve özellikle de atmosferik türbülans karakteristiklerini hesaba katan tasarım yöntemleri ile değişim harmonizasyon süreçleri hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşılmıştır. Yeni bilgiler, daha etkili ve daha verimli türbinlerin tasarım ve yapısına imkân vermektedir.

2.4.11. Keşif riski

Jeotermal sistemlerin araştırılmasında, üretim potansiyellerinin belirlenmesinde, geliştirilmesinde ve sürdürülebilir işletiminin sağlanmasında temel bilimler, yerbilimleri ve farklı disiplinlerdeki mühendislik bilimlerinin birlikte ve birbirlerini tamamlayıcı şekilde kullanılması esastır. Bir jeotermal sistemin statik/dinamik davranışını, verimli ve sürdürülebilir işletilmesini etkileyen ve belirleyen birçok parametre vardır. Bunlar; sistemin boyutları, sınırları ve sınır koşulları (akışa kapalı veya beslenmeli), jeolojik yapısı, jeolojik yapı içerisindeki ilgili kayaç ve akışkan özellikleri, sistem içerisindeki basınç ve sıcaklık dağılımları, termodinamik denge (basınç-sıcaklık-hacim ilişkileri), ısı ve akışkan akışı iletim ve taşınım mekanizmaları, uygulanan üretim/enjeksiyon yöntemleri, kuyuların üretim/enjeksiyon performansları, üretilen enerjinin veya akışkanın kullanım alanlarıdır. Jeotermal sistemlerin işletilmesinde, söz konusu bu parametrelerin etkilerini de dikkate alan bir üretim stratejisiyle, çevreye saygılı ve verimli işletilmesi amaçlanır [66].

Jeotermal kaynaklar kendi aralarında farklı özelliklere sahip olmaları nedeniyle bu kaynakların aranmasında kullanılan teknikler değişmektedir. Aranılan kaynağın tipi ve bulunduğu bölgenin jeolojik durumu farklılık göstermesine rağmen keşif çalışmalarında izlenilen ortak bir yol bulunmaktadır [67].

Jeotermal kaynakların aranması için yürütülen keşif çalışmalarında amaç ekonomik olarak elde edilebilecek kaynakların bulunmasıdır. Jeotermal kaynak sıcaklığı 150 °C üstü olan (yüksek entalpili) kaynaklar elektrik üretimi için kullanıma uygun olıp kuyudan elde edilecek jeotermal enerji, kuyunun üretim debisine bağlıdır. Bu amaç doğrultusunda arayıcı çalışmaya geniş bir alanda başlayıp, elde ettiği verilerle çalışma alanını aranan kaynak buluncaya kadar küçültmelidir. Jeotermal kaynaklar bulunduktan sonra üretim yapılacak kuyuların açılacağı yerlerin belirlenmesi için derinlerdeki sıcaklık ve geçirgenlik değerleri yaklaşık olarak verilebilmeli ve bunlara bağlı olarak kaynak tipi tahmin edilebilir olmalıdır [68].

2.4.12. Sondaj riski

Jeotermal enerji üretimi, yerin derinliklerinde bulunan sıcak akışkanın sondajlar aracılığı ile üretilerek doğrudan veya dolaylı olarak kullanıma sunulması ile gerçekleşmektedir. Keşif sondajlarının açılması jeotermal kaynak aramalarının son aşamasıdır.

Yeryüzüne ulaşan sıcak suların ve buharın incelenmesi ile elde edilen kimyasal veriler keşif çalışmasının ilerlemesini etkilemektedir. Üzerinde araştırma yapılan alana ilişkin yapısal bilgiler jeolojik, hidrolojik ve jeofiziksel teknikler ile elde edilen verilerin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Yapısal bilgiler ve jeokimyasal teknikler ile üretilen diğer verilerin birleştirilmesiyle ise keşif kuyularının açılacağı yerlerin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Sondaj ile yeryüzüne çıkartılan akışkanların kimyasal analizi ile yeraltındaki akış modeli oluşturulabilmektedir [68].

Yeraltındaki termal anomalilerin boyutlarının belirlenmesinde, rezervuar içerisindeki kırık sistemlerinin geometrilerinin belirlenmesinde, rezervuarın geçirgenliğinin belirlenmesinde ve güç üretiminin sürekliliğinin sağlanması için yapılan üretim testlerinin uygulanmasında bu kuyulardan yararlanılmaktadır [68]. Ancak jeotermal kuyu maliyeti, jeotermal yatırım maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve

kuyu derinliği arttıkça bu maliyette oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Maliyette beklenmeyen bu artış ise yatırımcı tarafından bir risk olarak değerlendirilmektedir.

2.4.13. Güneşin değişkenliği

Dünya güneşten yaklaşık 150 milyon km uzaklıkta bulunmaktadır. Dünya hem kendi çevresinde dönmekte, hemde güneş çevresinde eliptik bir yörüngede dönmektedir. Bu yönüyle, dünyaya güneşten gelen enerji hem günlük olarak değişmekte, hem de yıl boyunca değişmektedir. Dünyanın kendi çevresinde dönüşünden kaynaklanan güneş enerjisi değişimi gece gündüzü oluşturmaktadır. Dünyanın kendi çevresindeki dönüş ekseni, güneş çevresindeki dolanma yörüngesi düzlemiyle 23,50°'lik bir açı yaptığından, yeryüzüne düşen güneş şiddeti yörünge boyunca değişmekte ve mevsimlerde böylece oluşmaktadır. Ayrıca, bu eğrilik, yıl boyunca gündüz gece uzunluğunda da değişimler meydana getirmektedir.

Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %30'u yansıma ve saçılmalarla uzaya geri dönerken, yaklaşık %20'si hava kürede geri kalan %50 ise yeryüzünde soğurulmaktadır. Güneş enerjisi sürekli değişkenlik gösteren bir enerji türü olup güneş enerjisinin ışınım miktarında atmosferik koşullarda etkili olmaktadır. Dolayısıyla bazı güneş enerjisi uygulamaları enerjinin depolanmasını zorunlu kılmaktadır [18].

Dünya'nın kendi ekseni ve güneş etrafındaki dönüşünden kaynaklanan günlük ve mevsimlik ısı değişimlerinden en üst seviyede faydalanabilmek ve güneşten maksimum enerjiyi toplayabilmek için güneş panellerinin gün boyunca en çok güneş gören güneş yönüne bakmaları ve bulunan enleme göre zamana bağlı olarak yatay ile belirli bir açıda olmaları gerekmektedir. Güneş panelleri genel olarak kış aylarında, yaz aylarına nispeten daha dikey konumda olmalıdırlar. Güneş doğmadan önce, güneş battıktan sonra, kapalı ve bulutlu havalar gibi güneş ışığından yoksun alanlarda ve güneşin yetersiz olduğu durumlarda ise toplanan fazla enerjinin akü gruplarına depolanıp kullanıma sunulması gerekmektedir.

2.4.14. Hırsızlık

Hırsızlık suçu çok eski zamanlardan günümüze değin işlenen bir suçtur. Hatta bazı yazarlar hırsızlık suçunun insanlık tarihiyle yaşıt olduğunu düşünmektedirler. Gerçekten, hırsızlık çok eski çağlardan bu yana işlenen ve yaptırıma tabi tutulan bir

fiildir. Buna karşın hırsızlığın toplumsal bir kurala dönüşmesi ve genel bir yaptırıma tabi tutulması mülkiyet düzeninin ortaya çıktığı dönemlere rastlamaktadır [69].

Elektrik enerjisi ilk kez 1991 yılında 3756 sayılı yasa ile 765 sayılı TCK'da yapılan değişiklik sonrasında mal sayılmıştır. 5237 sayılı TCK'da ise bu düzenleme korunmuştur [69]. Elektrik enerjisi hırsızlığı çeşitli şekillerde işlenebilmektedir. Fakat bu tür hırsızlığın genellikle dıştan hat çekilmesi, elektrik sayacına müdahale etmek suretiyle tüketilen enerjinin kayıt dışı kalmasının sağlanması ve enerji santrallerinde ki makine veya ekipmanların çalınması şeklinde işlendiği görülmektedir.

Uzmanlar yenilenebilir enerji santrallerinin yaygınlaşmasıyla makine veya ekipmanların çalınması olaylarının artacağı görüşündedir. Yakın bir geçmişte ülkemizde çevreci ve yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde yer alan güneş enerji panellerinin bataryalarının hırsızlar tarafından çalındığı sonuç olarak ise güneş enerji panelleriyle aydınlanan sur etrafı ve parklar da bulunan aydınlatmaların bir bölümünün bataryalarının çalınması sonucu çalışmaz hale geldiği haberi gazete sayfalarında yeralmıştır.

2.5. Sosyal ve Çevresel Riskler

Küresel iktisadi ve sosyal kalkınmanın önünü açacak olan sürdürülebilir kalkınma politikaları üretmek yirmi birinci yüzyılın önceliklerinden biri haline gelmiştir. Bu tip politikaların izlenebilmesi için ekonomik, sosyal ve çevresel boyutların dâhil edildiği bütünsel bir yaklaşım gerekmektedir. Enerji meselesi, tam bu boyutların kesişme noktasında yer almaktadır [70]. Yakın zamana kadar enerji üretim kararları ekonomik maliyet ve mevcut kapasiteye göre alınıyorken, fosil yakıtlardan kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının küresel iklim değişikliğine neden olduğu gerçeği keşfedildikten sonra, çevresel endişeler, tercihleri değiştirmiştir.

Elektrik üretiminde kömür kullanılması, üretilen birim enerji başına en fazla sera gazı ve diğer zehirli emisyonların açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu çerçevede, düşük karbon emisyon salınım değerleri nedeniyle fosil yakıtlara önemli bir alternatif olarak sunulan yenilenebilir enerjinin, sürdürülebilir enerji geleceğinin tesisi yolunda elektrik üretmesinin ancak sosyal ve çevresel risklerin asgariye indirilmesi ile mümkün olacağı bir gerçektir. Yeni katı emisyon yönetmeliklerinin, gelecekte artan ölçüde elektrik

üretiminde yenilenebilir enerji gibi daha temiz seçeneklerin pazar paylarını artırmasına ve kömür kullanımının azalmasına neden olacağı tahmin edilmektedir [30]. Ancak santraller planlanırken, inşa edilirken ve işletilirken çevre en önemli ölçüt olarak planlarda yer almalı doğal kaynakları, tarihi zenginlikleri ve insan sağlığını hiçbir şekilde riske sokmamalıdır.

Dünya enerji politikalarına yön veren Amerika Birleşik Devletleri'nin enerji politikaları ile özellikle ülkemizin gelecek hedefleri kapsamında yakından ilgilendiği Avrupa Birliği enerji politikalarına bakıldığında ortak bazı söylemlerin olduğu görülmektedir. Özellikle küresel ısınma ve çevresel etki bağlamında bakıldığında, tüm ülkelerin enerji politikalarında en belirgin söylemin "çevreye uyumlu enerji üretimi", "enerji kaynaklarının etkin kullanımı" ile "enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi" olduğu görülmektedir [71]. Avrupa Birliği'nin çevreye duyarlı enerji politikaları kapsamında aldığı tedbirlerin başında çevresel kirlilik faktörü yüksek olan enerji kaynaklarının kullanımını azaltacak vergi politikası değişikliği gelmektedir. Bu tür enerji kaynaklarının yüksek vergilendirilmesi ve aynı zamanda yeni enerji kaynaklarına yönelişi artırmak amacıyla teşvik kapsamında vergi politikasıyla, yeni enerji kaynaklarının üretimi ve tüketimini özendirmeyi amaçlamıştır.

Dünya genelinde sürdürülebilir ve temiz enerji politikalarının mevcut enerjinin kaynağından çıkarılarak; üretimi, iletimi ve tüketimi faaliyetleri kapsamında, yeterli miktarda ve kaliteli olarak, makul maliyet/fiyatlarla, kesintisiz ve çevreye duyarlı biçimde gerçekleştirilmesi, herşeyden önce sosyal ve çevresel risklerin asgariye indirilmesi ile mümkün olmaktadır. Ancak hepsinden daha önemlisi toplumsal sosyal kabulün sağlanması durumunda sürekliliğin sağlanacağı esasına dair bir yaklaşım izlenmesi, göz ardı edilmemesi gereken bir gerçektir.

2.5.1. Üçüncü şahısların zarar görmesi

Günümüzde enerji, Türkiye'de ve dünya genelinde en önemli, en stratejik, en hayati meselelerin başında gelmektedir. Son yıllarda bir yandan enerji ile ilgili tüm meselelerin önemi gittikçe artarken diğer yandan da çevrenin, yeşilin, suyun ve doğanın önemi katlanarak artmaktadır. Çevresel zenginliklerin kaybedilmemesi için sürdürülen mücadelelerin artmasıyla, dünyada sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde yerli ve yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminde mümkün mertebe

yararlanılması planlanmaktadır. Ancak elektrik enerjisi üretimi için tesis edilecek yenilenebilir enerji santrallerinin fayda/zarar hesaplamalarının son derece titizlikle yapılması gerekmektedir. Söz konusu hesaplamalarda santrallerden kaynaklı veya dolaylı olarak meydana gelebilecek yangın ve patlamalar, terörist saldırılar, doğal afetler gibi durumlarda, üçüncü şahısların bedensel olarak yaralanması veya maddi kayıplarla karşılaşması gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır [72].

Yakın bir geçmişte ülkemizde bu kapsamda gündeme gelen İkizdere Hidroelektrik Santrali ile ilgili olarak yapılan fayda/zarar hesaplamaları sonucu risk algılaması, "Vadimi baştan aşağı dolduracak olan bu 20 adet kanal tipi hidroelektrik santral projeleri vadinin can damarı olan derelerin kurumasına sebep olacak ve yemyeşil olan bitki örtüsünü de aşağıdan yukarıya doğru sarartmaya başlatacak, dere yatağındaki su dağların içerisinde yapılacak kanallara alınacağından vadinin atardamarı dereler kuruyacak, kırmızı pullu alabalığımız yok olacak ve diğer sucul yaşam sona erecek, vadimizdeki ekolojik denge alt-üst olacak, balın kalitesi değişecek, yüksek gerilim hatları vadimizi kanser vadisine dönüştürecek, binlerce ağacın kesilmesi ve patlatmalarla erozyon ve sel felaketleri kaçınılmaz hale gelecek ve vadimizdeki turizm hareketi son bulacak", "Uzun dönemde Türkiye'nin enerji talebinin artarak devam edeceğini düşünürsek vadimizdeki enerji üretiminin toplam üretime oranı her yıl giderek azalacak. Dolayısıyla bu vadide üretilecek enerji ülkemizin enerji ihtiyacını gidermeyeceği gibi enerji ihtiyacını da karşılayamayacak. Bu kadar bir enerji için dünyanın en önemli 200 vadisinden birisi olan İkizdere vadimiz feda edilir mi? Elektrik enerjisi üretmenin alternatifleri vardır fakat ikinci bir İkizdere Vadisi yoktur!" [72] şeklinde özetlenmektedir.

Ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde enerji üretimine, üçüncü şahısların karşı olmadığı bir gerçektir. Ancak hayata geçirilecek projelerin bir kısmının bölgenin doğal zenginlikleri üzerinde ve dolaylı olarak üçüncü şahısların yaşam alanlarında meydana getirdiği tehdit ayrıntılarıyla değerlendirilmeden inşaatlarına başlanması gelecek açısından endişe verici bulunmaktadır. Bu bakış açısıyla enerji planlaması ile ilgili olarak kararlara katılım konusunda Sivil Toplum Kuruluşları (STK)'nın anahtar rolü olduğu savunulmaktadır. Özel şirketler tarafından halkın kabulünü bir tarafa bırakarak enerji üretmek üzere kâr amacıyla hareket edilmesi ve karar verme mekanizmalarının yeterince şeffaf olmaması durumunda yerel halkı

temsilen STK'ların harekete geçmesi ve çözüm arayışında katkı sağlaması beklenmektedir.

2.5.2. Gürültü

Fosil kökenli yakıtların sona doğru yaklaşmasından dolayı ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması için gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler alternatif enerji kaynaklarına yönelim göstermektedirler. Alternatif enerji kaynakları doğada bolca bulunması, bedava olması ve kolaylıkla istenilen enerji türlerine dönüştürülebilmesi sebeplerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir [73]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre dostu enerji kaynağı olmaları gibi birçok avantajları buulunmasına rağmen, bazı olumsuz etkileri de vardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, olumsuz çevresel etkilerinin başında gürültü kirliliği gelmektedir. Ses, insan kulağının sezebildiği basınç değişmeleridir. Gürültü ise "istenmeyen ses" olarak tanımlanmaktadır [76]. Yenilenebilir enerji kaynaklarında inşaat aşamasında oluşan ve tesis faaliyete başladıktan sonra yani kullanım sırasında oluşan gürültü olmak üzere 2 çeşit gürültü kaynağı bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgâr enerjisi sistemleri hariç), ilk inşa aşamasında gürültü kirliliği oluştururken kullanım sırasında hiçbir kirlilik belirtisi göstermemektedir.

Rüzgâr enerjisi sistemlerinde ise inşaat aşamasına ilave olarak kullanım aşamasında da gürültü oluşmaktadır. Bu bağlamda rüzgâr türbinleri ve sistemi tarafından üretilen işitilebilir ses ve kulağın işitebileceği sesin altında olan seslerin etkileri ile ilgilenilmektedir. Rüzgâr türbinlerinden yayılan gürültü iki kaynaktan üretilir ve her biri insan kulağını farklı bir şekilde etkiler. Birincisi aerodinamik ya da geniş bant gürültüsü, makinenin kanatları üzerinden hava geçerken oluşur. İkincisi tonal veya tek frekans gürültüsüdür ve dişli kutusu ve jeneratör gibi dönen mekanik ve elektriksel elemanlar tarafından oluşturulur [76]. Mekanik gürültü özel dişliler, dönen parçaların ses emici malzeme ile kaplaması ve akustik kılıflar kullanılması gibi birçok standart tekniklerin kullanılması ile azaltılabilmektedir. Optimum kanat tasarımı ile kanat uç sekli ve kuyruk kenar kalınlığının minimum aerodinamik gürültü üretecek şekilde tasarlanmalarını sağlayabilmek için geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir [74].

Gürültü sorunu bir dereceye kadar kişiye de bağlı bir unsurdur. Endüstriyel bir bölgede kabul edilen sınır kırsal alanda kabul edilmeyebilir. Gündüz kabul edilen sınır, gece kabul edilmeyebilir. Bireyin gürültü kabul etme düzeyi onun rüzgâr türbini çiftliklerine olan genel tavrına da bağlı olacaktır. Rüzgâr santrallerinden kaynaklı gürültünün etkisi topografik ve yerleşim yakınındaki yerlere göre rüzgâr türbinlerinin dikkatli yerleştirilmesi ile kolayca azaltılabilmektedir [76].

2.5.3. Kuş ölümleri

Kuş ölümleri yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi sistemlerini ilgilendiren bir risktir. Kuşlar ve onların bölgeleri, dünyadaki yaşamın çesitliliği, biyolojik değişkenliğin hayati parçasıdır [76]. Yapılan araştırmalar bölgesel seviyede rüzgâr türbinlerinin özellikle kuş yaşamı ve yurtlarının tahribine sebep olduğu konusunda iki farklı görüş olduğunu göstermektedir. Birincisi "Rüzgâr türbinlerinin işletiminden göçmen kuşlar, yarasalar ve yırtıcı kuşlar zarar görmektedir." temeline dayanmaktadır. Bu görüşe göre zarar kule veya kanatlarla çarpışma sonucu kuşların ölmesi veya türbinler çevresindeki kuş dinlenme veya beslenme yerlerinin bozulması olarak iki şekilde ortaya çıkmaktadır.

İkinci görüş ise, otomobillerin kuşlara çarpması, kuşların cam pencerelere çarparak ölmesi gibi insan kaynaklı zararlarla karşılaştırıldığında rüzgâr türbinlerinin çok daha az kuş öldürdüğünü savunmaktadır. Bu savdan yola çıkılarak rüzgâr enerjisi gibi temiz bir enerji kaynağından kısıtlı olarak yararlanılacak olmasının daha büyük bir kayıp olacağı nitelendirilmektedir.

Dünyada rüzgâr türbinlerinin nesli tükenmekte olan bazı türler için olumsuz etkiye sahip olması gerekçesiyle, kuşların ve biyolojik çeşitliliğin korunması için tedbirler alınmakta olup bu konudaki ciddi yaptırımlar ve cezalar dikkat çekmektedir. Yakın bir geçmişte gündeme gelen haberin detayları ve bu konuda gösterilen hassasiyetin boyutları şu şekilde özetlenmektedir: Amerika'da avlarına odaklanan kartalların, rüzgâr türbinlerini son anda farkettikleri için pervanelere çarparak can vermesi ve ayrıca kartalların, hızla dönen pervanelerin yarattığı hava akımına kapılması sebebiyle bir enerji şirketi, 1918 yılında yürürlüğe giren Göçmen Kuşlar Anlaşması Yasası'na dayanarak rüzgâr çiftliklerinde kaya kartallarının ölümüne neden olmaktan bir milyon dolar cezaya çarptırıldı.

Kuş ölümlerinin azaltılması için rüzgâr santralinin inşasına başlamadan önce rüzgâr santralinin tesis edileceği alanda ornitolojik gözlem ve incelemeler yapılması gerekmektedir. Ornitolojik gözlem ve incelemeler, rüzgâr türbinlerinin faaliyete geçirilmesi planlanan kesimler ile bu kesimlere bitişik habitatlarda ki farklı nişlerde, çeşitli gereksinimlerini karşılamak amacıyla bulunmakta olan kuş türlerini; bu türlerin habitat olarak seçtikleri kesimleri, türlerin bu bölgede bulunuş nedenleri ile bu türlerin içerisinde koruma statülerine sahip olanların bulunup bulunmadıkları; eğer bulunuyorsa sahip oldukları ulusal ve uluslararası koruma statülerini ortaya koyabilmek amacıyla yapılmaktadır. Dünyada gelişen rüzgâr türbinleri teknolojisi, kuşların üzerlerine tünemelerini önleyecek şekilde masif boru şeklindeki kuleler halinde tasarlanmaktadır. Ayrıca, daha önceki versiyonlarına göre pervane kanatları daha yavaş dönmekte olan ve kuşların çarpma olasılığını azaltan türbinler üretilmektedir.

2.5.4. Gaz emisyonları riski

Çevreye doğrudan ya da dolaylı zarar vermeden enerjiyi kullanılabilir bir forma dönüştürebilmenin herhangi bir yolu yoktur. Jeotermal enerjinin kullanımı, en az kirlilik yaratan formlardan biri olarak kabul edilmesine rağmen, onun da çevreye bazı olumsuz etkileri bulunmaktadır. Jeotermal akışkanlar, yoğuşmayan gazlar ve miktarı sıcaklıkla artan çözünmüş katı partiküller içermektedir. Yoğuşmayan gazlar, çoğunlukla karbondioksit (CO_2) ve değişen miktarlarda hidrojen sülfür (H_2S), amonyak (NH_3), azot (N_2), hidrojen (H_2), civa (Hg), bor buharı (B), radon (Rn) ve metan (CH_4) gibi hidrokarbonlardan oluşmaktadır [75].

Santralin işletimi sırasında çevresel problemler de artmaktadır. Bir standart buhar çevrim santralinin kullanıldığı jeotermal güç üretimi, yoğuşmayan gazların ve küçük katı parçacıkların atmosfere bırakılması ile sonuçlanmaktadır. Buhar yoğun sahalarda ve tüm atıkların enjekte edildiği sahalarda, buhar içerisindeki gaz, çevresel açıdan en önemli atıktır [75]. En belirgin gaz emisyonu, santralde gaz atım sistemlerinde görülmektedir. Gaz ve katı atıklar; sondaj, sızma, temizleme ve testler dışında vanalardan ve kuyu dozajlaması sırasında ortaya çıkmaktadır. CO_2 gazı sera etkisi nedeniyle küresel etkiye sahip olmasına rağmen H_2S atımının etkisi lokaldir ve topoğrafyaya, rüzgâr yönüne ve toprak kullanımına bağlıdır. Ekipman korozyonu, asit

yağmurları, göz ve solunum yolları tahrişi ve hoş olmayan kokusu nedeniyle rahatsızlık vericidir.

Radon seviyesinin gözlemlenmesi gerekmesine rağmen, jeotermal gaz emisyonları ile hissedilebilir seviyelere çıktığı konusunda kanıt bulunmamaktadır. B, NH_3 ve Hg toprak ve bitki örtüsünü kirletmektedirler. Bu kirleticiler ayrıca yüzey suları ve su canlıları üzerinde de etkili olmaktadırlar [76].

Günümüzde ise gelişen teknoloji ile birlikte modern jeotermal elektrik santralleri (Binary Cycle Sistem) ile jeotermal ısıtma sistemlerinde jeotermal akışkan, bünyesindeki yoğunlaşmayan gazlar ile birlikte rezervuara geri basılmakta, böylece dışarı hiç bir şey atılmamaktadır [77]. Jeotermal elektrik santralleri ve hacim ısıtma sistemleri tamamen kapalı çevrimden oluşsalar bile, küçük problemlere neden olabilmekte fakat bu problemler ihmal edilebilecek düzeydedirler.

2.5.5. Jeotermal atık riski

Jeotermal enerji, yenilenebilir enerji kaynağı olması bakımından çevre dostu olarak nitelendirilmesine rağmen jeotermal santral işletilirken açığa çıkan atık ısı, gazlar ve atık sular çevre kirliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir [78]. Jeotermal atık sularda bulunan kimyasal maddelerin çevre üzerindeki etkisi, jeotermal uygulamalarda açığa çıkan gazlara göre çok daha önemlidir. Jeotermal enerjiden elektrik elde edilen sistemlerde çevreye büyük miktarda atık su bırakılmaktadır. Dolayısıyla jeotermal kirleticiler suyu kaynak olarak kullanarak sıvı ekosistem ve karasal ortamı etkileyerek nehir ya da akarsuların içine karışarak su kimyasını değiştirebilmektedir [82]. Tüm jeotermal akışkanlar, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında mineraller ile uzun süre temas etmeleri nedeni ile yüksek element derişimlerine sahiptirler. Jeotermal sularda bulunan elementlerin derişimi çevre ve insan sağlığı açısından hemen her zaman sınır değerlerin üzerinde olmaktadır.

Jeotermal sular iyi bir çözücüdür. Bu nedenle jeotermal atık sular, normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla miktarda erimiş mineral ve çeşitli tuzlar içermektedir. Jeotermal atık sularda çözünmüş olarak, demir, bor, brom, fosfor, karbon, arsenik, iyot, silisyum, magnezyum, kalsiyum, lityum gibi mineraller ve ayrıca radon gazı da

bulunmaktadır [78]. Ağır metaller suyun pH'ını ve çözünmüş oksijen içeriğini düşürmektedir. Ayrıca toksik etkileri de bulunmaktadır.

Yüzey suları kimyasal atıkların işletme süresince atılması ya da sızma şeklinde kirlenmektedir. Yüzey sularının atık su ya da yoğuşmuş su ile direkt kirlenmesinin önlenmesi genellikle bu sıvıların araziye reenjeksiyonu yoluyla olmaktadır. Ancak bu da yer altı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Yeraltı sularının kirlenmesi yeraltı suyu akiferi boyunca reenjeksiyon kuyularında çelik çekme boru ve biriktirme havuzlarında istenmeyen sızıntıları önlemek için ise kaplama kullanılmaktadır [79].

2.5.6. Atık riski

Güneş enerji teknolojileri konvansiyonel enerji kaynakları ile kıyaslandıklarında çevresel avantajlara sahiptir. Bu avantajlar; hava emisyonlarının yokluğu, işletme sırasında atık ürün yokluğu, düşük sera gazları emisyonları (CO_2, NOx) zehirli gaz emisyonlarının olmaması, bozulmuş toprak iyileştirilmesi, elektrik şebekesi iletim hatlarının azalmasıdır [80]. Diğer bir yandan güneş enerjisi teknolojisi kurulumu da dahil olmak üzere hiçbir insan yapımı proje tamamen çevreye etkisiz olamamaktadır.

Güneş enerjisi sistemlerinin oluşturduğu çevresel sorunlar soğutma ve fotovoltaik pil sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Soğutma sistemindeki bir kaçak yangına sebep olabilmektedir. Güneş ısı sisteminde işletme esnasında soğutucu sıvının her 2-3 yılda bir değişmesi gerekmektedir. Isı taşıyıcı sıvılar glikol, nitratlar, nitritler, kromatlar, sülfitler ve sülfatlar içermektedir. Daha yüksek sıcaklık uygulamalarında aromatik alkoller, yağlar, kloroflorokarbonlar gibi daha kompleks yapılar kullanılmaktadır. Büyük ölçekli güneş enerji sistemlerinde bu maddelerin giderilmesinde kontrol çok önemlidir. Kaza durumunda ısı taşıyıcı sıvı kaçağından dolayı su kirliliği oluşması riski söz konusudur. Böyle bir durumda soğutucu kaybı olmasından dolayı güneş dönüştürücü aşırı ısınmakta ve yangın oluşumuna sebep olabilmektedir. Aynı zamanda panel malzemelerinden kaynaklı gaz çıkışından ek problemler ve ısı taşıyıcı akışkanın gaz halinde yayılması veya takip eden yanma olaylarından dolayı, oluşması muhtemel çevresel risklerde bulunmaktadır [80].

Fotovoltaik pil sistemlerinin normal işletme zamanlarında ne gaz veya sıvı ne de radyoaktif madde yayılımları vardır. İçerisinde az miktarda zehirleyici madde bulunan

fotovoltaik pil uygulamalarında bu kimyasalların az miktarının bile çevreye yayılması sonucu zayıf da olsa yangına sebebiyet verme riski mevcuttur. Büyük ölçekli güneş enerjisi santral tesislerinde bu zararlı malzemenin yayılımı anormal tesis işletilmesinin sonucu olarak ortaya çıkabilmekte ve bu küçük de olsa iş ve halk sağlığı açısından bir risk oluşturmaktadır [81]. Bu tür durumlarda toprak ya da yeraltı suyu kirlenmesi de söz konusu olmaktadır. Sistemde kullanılan zehirli maddelerin kontrol altında tutulmaları, bir kaza (yangın ya da ısıl patlama) anında derhal müdahale edebilecek ekip ve ekipmanın olması gerekmektedir. Zehirli maddeler de kullanıldıktan sonra bertaraf edilirken kanun ve standartlara uygun olarak bertaraf edilmelidir.

2.5.7. Ekilebilir alanların azalması

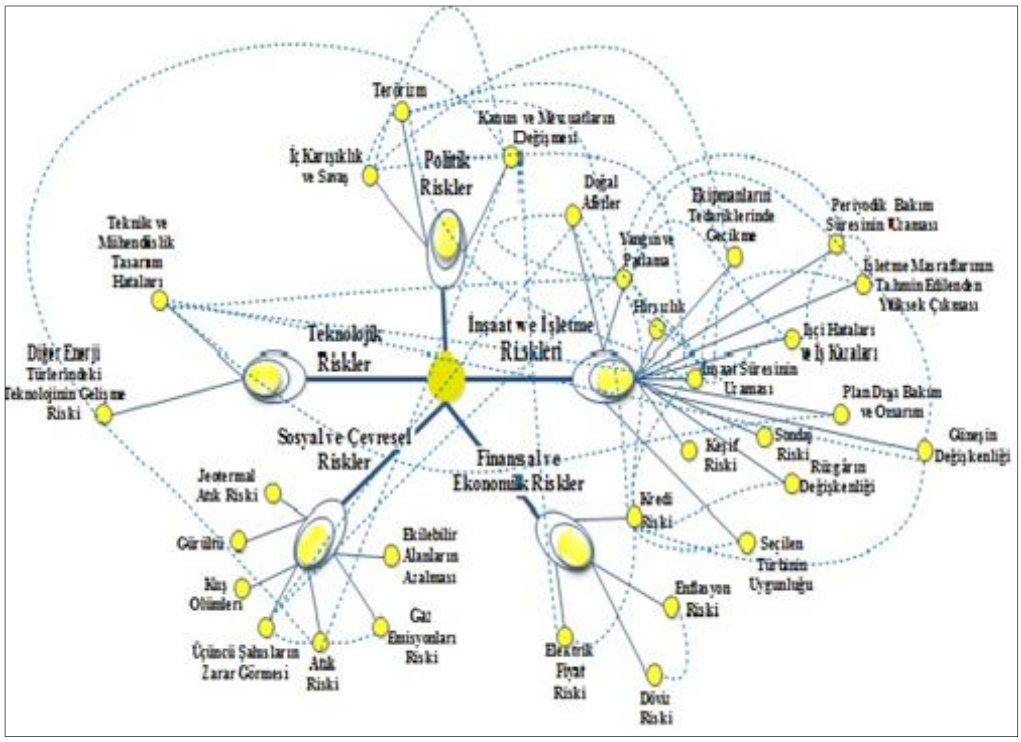
Güneş enerjisinden yararlanmanın önündeki engellerden biri güneş enerjisinin yayınık olmasıdır. Dolayısıyla güneşten gelen enerji miktarı bizim isteğimize bağlı değildir ve kontrol edilememektedir. Enerji ihtiyacının çok olduğu kış aylarında güneş ışığı az ve geceleri de hiç yoktur. Bu nedenle sistem güneş ışığını sürekli alabilmek için geniş yüzeylere ihtiyaç duymaktadır.

Fotovoltaik piller, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışmaktadırlar. Yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşmaktadır. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş pilinde mekanik olarak elektrik üreten cihazların aksine hareketli parçalar olmadığından teorik ömürleri sonsuzdur. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilmektedir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilmektedir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç watt düzeyinden megawattlara kadar sistem oluşturulmaktadır.

Güneş pilleri, hali hazırda elektrik şebekesinin olmadığı yerleşim yerlerinden uzak yerlerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilmektedir. Bu nedenle ve istenen güçte kurulabilmeleri nedeniyle genellikle kırsal kesimin elektrik ihtiyacının

karşılanmasında kullanılmaktadır [82]. Fotovoltaik pillerden elde edilen enerjinin verimliliği düşük olduğundan çok sayıda fotovoltaik pilin birbirine bağlanması gerekmekte ve bu da büyük alanlara olan ihtiyacı arttırmaktadır. Büyük alan kullanım ihtiyacı ise ekilebilir alanların azalması riskini beraberinde getirmektedir.

Şekil 2.1'de ana gruptaki riskler ve bunların alt risklerinin birbirleriyle olan ilişki durumları örümcek ağı tekniği kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Risk İlişki Gösterimi

3. HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ

Bir hizmet veya ürünün tasarımından üretimine ve müşteriye sunuşuna kadar geçen sürede oluşan hatalar istenmemekle beraber, tasarlayan insan olduğunda kaçınılmaz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Asıl sorun, hatadan ders alınmaması, ilerlemesi ve maliyete olan etkisinin artmasına engel olmamakta yatmaktadır. Hataların ciddiyeti sektörden sektöre de fark göstermektedir. Örneğin; herhangi bir otomobilin motorunda üretimden kaynaklanan bir hata, en fazla otomobilin durmasına neden olurken, bir uçağın motorundaki hata yüzlerce insanın hayatına mal olabilmektedir. Sonuçta her iki ürünü üreten şirketin de hata sonucu oluşan mali kayıpları olacaktır. Ancak uçak üreten firmanın belki de iflasına neden olacaktır.

Bu açıdan bakıldığında, hatanın müşteriye yansımadan önce çözümlenmesi firmanın pazar kaybı dolayısı ile göğüslemesi gereken maliyeti azaltacaktır. Diğer taraftan üretim sırasında oluşan hatanın üretimin mümkün olduğunca erken aşamasında ortadan kaldırılmasının, üretim maliyetini minimize edeceği şüphesizdir. Hata Türü ve Etkileri Analizi de bu anlayışla ortaya çıkmış, odak noktası kalitenin güvenilirlik olarak algılandığı roket, uçak ve nükleer santral üretimine dayanan bir metottur [83].

3.1. FMEA'nın Tanımları

Girdi, üretim süreci ve çıktıda, ürün ve hizmet kalitesini etkileyen makina, metot, malzeme ve insan unsurlarından biri veya birkaçında beliren şartların, özelliklerin, standartların dışına çıkma durumuna hata denmektedir. Potansiyel hata, ele alınan ürün üzerinde oluşması muhtemel olan hatalar kümesidir. Uygulamada hatanın oluşabileceği varsayımından hareket edilir, ancak bu hatanın oluşması şart değildir [84]. FMEA; hatanın mümkün olduğunca erken aşamada çözümlenmesi, hata oluşumunun engellenmesi amacı ile kullanılan bir kalite geliştirme yöntemidir. Çeşitli kaynaklarda yer alan FMEA tanımları şu şekildedir:

FMEA, ürün veya süreç geliştirme çalışmalarında doğabilecek potansiyel problemleri belirlemek için kullanılan analitik bir metodolojidir.

Çapraz fonksiyonel takımlar tarafından toplanan bilgilerin en açık dokümantasyonudur [85]. FMEA, oluşabilecek potansiyel hataları yönlenerek kök sebepleri bulup yok etmek için kullanılan bir tekniktir. Ürünün ya da sürecin müşteriye ulaşmadan önceki kısmında uygulanır [86]. Sistem analizi yaparak ve geçmiş verileri toplayarak üretim çevriminin operasyonel performansını geliştirir, risk seviyesini düşürür [87]. FMEA, potansiyel hataları belirlemek adına ürün tasarımının ya da tasarım sonrası süreçlerin analizi için kullanılan bir sistemdir. FMEA süreci hata türlerini, ürün, hizmet ya da süreç yollarını belirlemek ile başlar. Proje takımı girdilerden müşteriye ulaşan çıktıya kadar her elementi inceler ve her adımda "burada nasıl bir hata oluşabilir?" sorusunu sorar.

FMEA, süreçlerin ve ürünlerin incelenip hatalar oluşmadan önce önlenmesi için kullanılan bir proaktif araç, teknik ve kalite metodudur. Altı sigma metodolojisi içinde FMEA, bir süreç geliştirmeden ya da yeni bir hizmet sunmadan önce endişeleri yok etmeye yardımcı olur. Sürece hataların oluşabileceği şekilde bakıp, değerlendirerek, tespit edilen tüm hataları yok etmek ve süreci tekrar yapılandırmak için sistematik bir yoldur. Müşteri memnuniyetini ve güvenlik seviyelerini destekler. Hata Türü ve Etkileri Analizi, yüzlerce hata türü için iyileştirme yapılmasının planlanması yerine, sistemin bütünü üzerinde en büyük katkıyı sağlayacak hata türlerini önceliklendiren bir yöntemdir. Ancak yüzlerce hata türü için, veri derleme ve analizi de büyük zaman ve işgücü gerektirmektedir. FMEA'nın başlangıcında ön eleme yapmak ve sadece önemli olarak belirlenen parçalar için veri derlemek, FMEA'nın etkinliğini arttıracaktır. Tasarım aşamasında pek çok parça için FMEA yapılmasına ihtiyaç duyulabileceğinden önerilen model, ürün planlama ve planlama süresini de kısaltmış olacaktır [88].

Hata Türü ve Etki Analizi, riskleri tahmin ederek hataları önlemeye yönelik bir analiz tekniğidir. Hatanın ortaya çıkması ile doğacak problemin müşteri gibi algılanması ilkesine dayanmaktadır. FMEA çalışmasında belirlenen bütün hatalar için olasılık, şiddet ve saptanabilirlik tahmini yapılmaktadır [89]. 1980 yılında bu konuda yayınlanmış ilk standartlardan biri olan MIL-STD 1629A (Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi Uygulaması için Prosedür)'da FMEA'nın genel tanımı "Sistemdeki her bir olası hata türünün, sistemdeki sonuçlarını veya etkilerini belirlemek ve

önemlerine göre her bir hata türünü sınıflandırmak için analiz edildiği bir prosedürdür." şeklinde verilmektedir. Stamatis ise FMEA tanımını genişletmekte ve "FMEA tasarım, proses, sistem ve hizmet ile ilgili bilinen ve/veya olası hataları, yanlışları ve problemleri kullanıcıya ulaşmadan belirlemeyi, tanımlamayı ve ortadan kaldırmayı hedefleyen mühendislik tekniğidir." şeklinde tanımlamaktadır [90].

3.2. FMEA'nın Tarihi ve Günümüz Endüstrisindeki Yeri

FMEA, Amerikan Ordusu tarafından geliştirilmiş bir teknik olup tarihi İkinci Dünya Savaşı yıllarına kadar dayanmaktadır. Bu konuda hazırlanmış ilk prosedür "Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis" başlığıyla basılan 9 Kasım 1949 tarihli MIL-P-1629 (Military Procedure)'dur [91]. İlk olarak sistem ve donanım hatalarının değerlendirilmesi için kullanılmış bir güvenilirlik saptama tekniği olmakla birlikte hatalar üstlenilen projenin başarısı ile personel ve ekipman güvenliği açısından sınıflandırılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri silahlı kuvvetlerinin MIL-STD 1629 A kodlu askeri standardı olarak halen kullanılmaktadır. Bu standarda göz atıldığında tekniğin tanımı, kullanılan terimlerin açıklamaları ve uygulamada kullanılacak gerekliliklerin yer aldığı görülmektedir [84].

1960'lı yıllarda sistem ve donatım hatalarının etkilerinin belirlenmesindeki güçlü yanları sayesinde NASA tarafından Apollo Projesi'nin geliştirilmesinde kullanılmıştır [92]. Uzun bir süre gizli tutulan teknik 1970'li yıllarda Ford Motor Company tarafından otomotiv endüstrisinde, 1975 yılında bilgisayar üretiminde ve Japon NEC firmasında ilk endüstriyel uygulamalarını bulmuştur [83]. Ford Motor Company, tedarikçilerin kalite kontrol planlarının geliştirilmesini amaçlayarak ISO 9000 standart sistemine FMEA uygulamalarının eklenmesi ile oluşturduğu QS9000 sistemini kullanmıştır. Sistemin başarısının görülmesi ile FMEA, Otomotiv Mühendisleri Birliği tarafından SAE J-1739 standardı altında tüm otomotiv endüstrisine yayılmıştır. Otomotiv Endüstrisi Eylem Grubu (Automotive Industry Action Group) ve Amerikan Kalite Kontrol Topluluğu (American Society for Quality Control) tarafından 1993'te endüstri geneli için FMEA standardı yayınlamıştır [93]. Ayrıca Uluslararası Elektroteknik Komisyonu tarafından yine FMEA teknikleri kullanılarak geliştirilen IEC 60812 standardı yayınlamıştır [94]. Günümüzde FMEA, QS 9000, ISO/TS 16949,

ISO 9001:2000 ve diğer Kalite Yönetim Sistemleri dâhilinde zorunluluk haline gelmiştir [91].

1950'lerde yaratılan ve geliştirilerek günümüze kadar gelen bu teknik, uygulanabilirliği bakımından otomotiv, gıda, gemi ve yazılım gibi birçok sektörde kullanılabilir hale gelmiştir. Bu tekniğin popüler olmasındaki başlıca sebep kullanımının kolay olması ve geniş teorik bilgi gerektirmemesidir. Orta düzeyde deneyimi olan bir risk değerlendirme takımı tarafından rahatlıkla uygulanabilmektedir.

3.3. FMEA'de Kullanılan Kavramlar

Müşteri: Ürün veya hizmetin ulaştığı son kişi ya da ara departmanlardır. Müşteri, nihai ürünün ulaştığı son yer olabileceği gibi yarı mamülün ulaştığı ara duraklar da olabilmektedir. Bir işletmeden çıkan mamulün piyasada ulaştığı nokta dış müşteri olarak tanımlanırken işletmeye bağlı birimler arasında dolaştığı süreçte, her birim bir önceki birimin müşterisi olmakta ve bu noktadaki müşteri de iç müşteri olarak tanımlamaktadır. FMEA çalışması içinde müşteri, oluşabilecek herhangi bir hatadan etkilenen kişi ya da birimler olarak görülmektedir [84].

Fonksiyon: Bir ürün ya da sürecin gerçekleştirmesi istenilen özellikleridir. Oluşabilecek bir hata, ürünün ya da sürecin bazı özelliklerinin çalışmasını önleyeceği gibi tüm özelliklerinin çalışmamasına da yol açabilmektedir. Bu noktada müşteri beklentilerine cevap verilememekte ve işletme için rekabet gücü azalımı, kar kaybı gibi ciddi sıkıntılar meydana gelmektedir [91].

Hata ve Hata Türü: Hata, "Bir ürün ya da sürecin, bu ürün ya da süreçten beklenen fonksiyonları yerine getirememesi [95]" olarak tanımlanmaktadır. İç ve dış müşterinin ihtiyaç, istek ve beklentileri ile örtüşmeyen; bir ürün veya sürecin arzulanan fonksiyonunun gereği gibi veya hiç yerine getirilmemesi durumunda hataların sınıflandırılması ile hata türleri belirlenmektedir. Hata kategorisi olarak da ifade edilmektedir.

Hata Nedeni: Tasarım veya sürecin belli bir elemanının hata oluşumunu tetikleyen ve hata türü ile sonuçlanmasına yol açan unsurdur. Bir hataya birden çok unsur neden

olabilmektedir. FMEA çalışması içinde hata nedenleri incelenirken kök sebeplere inilmesi gerekmektedir [84].

Hata Etkisi: Hata türü önlenmediğinde veya düzeltilmediğinde, hatanın son ürün halindeki etkisi/sonucunun belirlenmesi aşamasıdır. Müşterinin neyi fark edebileceği veya müşterinin başına ne gelebileceğinin tanımlanmasıdır. Gerçekleşmesi olası hatalar üzerinde çalışarak, hata veya hataların üretim, servis veya diğer parçalara yansıması ve tümünün performansı üzerindeki etkisi belirlenir. Etki belirlenirken, benzer özellik taşıyan ürünlerin sonuçları ve geçmişteki hata türleri dikkate alınmalıdır [96].

Mevcut Kontroller: Nihai ürünün ya da yarı mamülün fonksiyonlarının istenildiği şekilde çalışıp çalışmadığını belirlemek için yapılan işlemlerdir. Burada amaç müşteriye hatasız ürün teslim etmektir. Dolaysıyla bu kontroller son adımda üründeki hatayı tespit etmek amaçlı yapılan çalışmalar değil, başta oluşan hatanın giderilmesi amacıyla yapılan ya da hata oluşumunu önleyecek nitelikteki çalışmalardır [91].

FMEA Elemanı: FMEA kapsamında incelenecek, uygulanacak, değerlendirilecek unsurlar, adımlar, verilerdir. Hata türleri, etkileri, kontroller, gerçekleştirilen faaliyetler örnek olarak gösterilebilir.

Şiddet (Severity): Hata oluştuktan sonra, ürünün müşteri üzerindeki etkilerinin değeridir [97]. Şiddet sadece tasarımdaki değişiklik ile azaltılabilmektedir. Hata etkisinin müşteriye yansıyan sonuçları değerlendirildikten sonra tasarımda değişiklik sağlanabilirse, hatanın yok edilebilirliği söz konusu olabilmektedir.

Saptama (Detectability): Mevcut kontrollerin hata oluşmadan önce tespit edilerek, müşteriye ulaşmasını engelleme derecesidir.

Ortaya Çıkma (Occurance): Hata nedeninin oluşması ve ürünün beklenen ömrü içinde kullanımı sırasında hata türüne yol açmasının ihtimalidir.

Risk Öncelik Sayısı (RÖS): Hatanın risk değerini belirten bir ölçümdür. Uygulanacak düzeltici faaliyetlerin sıralamasında kullanılır [98]. Şiddet, saptama ve ortaya çıkma değerlerinin çarpılmasıyla bulunmaktadır. RÖS değeri en yüksekten en düşüğe doğru

olacak şekilde hatalar sıralanmakta ve en yüksek RÖS değerine sahip hata için düzeltici-önleyici faaliyet ilk sırada uygulanmaktadır.

Kritiklik: Hatanın ortaya çıkma ve müşteriye ulaşmadan bu hatanın saptanabilmesi ihtimallerinin çarpımıdır. Ek kalite planlaması gerektiren hataların önceliklerini belirlemede kullanılmaktadır.

Kritik Karakteristikler: Yasal düzenleme veya ürün/hizmet emniyetini etkileyebilen karakteristiklerdir. Genel olarak, kritik karakteristikler aşağıdaki faktörler tarafından belirlenmektedir [90]:

• Mahkemeler, ürün sorumluluğu açısından
• Düzenleyici kurumlar, biçimsel düzenlemeler ve/veya düzenlemeler açısından
• Endüstriyel standartlar, genel kabul görmüş endüstriyel uygulamalar açısından
• Müşteri talepleri, müşterilerin istekleri, ihtiyaçları ve beklentileri açısından
• Dâhili mühendislik ihtiyaçları, geçmiş veriler, yeni teknoloji veya ürün/hizmet tecrübesi açısından

Önemli Karakteristikler: Proses, ürün veya hizmet kalite özelliklerinin toplanması gereken verileridir. Bu karakteristikler, müşteri-tedarikçi konsensüsü ile tanımlanmaktadır [91]. Tedarikçinin özel tasarımı kullanılırken, müşteri karakteristiklerini ve kalite gereksinimlerini etkileyecek dâhili karakteristiklerin belirlenmesinde müşteri ve tedarikçi kalite planlama takımlarının katılımı zorunludur. Bütün önemli karakteristikler fizibilite aşamasında tayin edilmelidir [99].

Anahtar Karakteristikler: Prosese hızlı geri bildirim sağlayan ölçü göstergeleridir, kalite sorunlarının hızlı bir şekilde düzeltilmesine kaynağında olanak sağlarlar [99].

FMEA'da üç tip anahtar karakteristik vardır.

• Rehber Karakteristik: Ürün veya servisin müşteriye ulaşmadan önce değerlendirilip analiz edilebilecek kalite ölçütüdür.
• Ara Karakteristik: Sevkiyat veya dağıtım sonrası fakat ürün veya hizmet müşterinin eline geçmeden önce değerlendirilip analiz edilebilecek kalite ölçütüdür.
• Sabıkalı Karakteristik: Ürün veya hizmet müşterinin eline geçtikten sonra müşteri memnuniyetini ölçmek için kalite ölçütünün değerlendirilip analiz edilmesidir.

Özel Proses Karakteristikleri: İmalat ve montaj sırasında değişkenliği belirli bir hedef değerde tutulması gereken proses karakteristikleridir [91].

Özel Ürün Karakteristikleri: Ürün güvenliğini etkileyebilecek, yasalara aykırı sonuçlara yol açabilecek veya müşteri memnuniyetinde önemli düşüşlere yol açabilecek ürün karakteristikleridir [83].

3.4. FMEA'nın Amaçları ve Faydaları

FMEA, doğru uygulanması halinde firmalara pek çok yarar getirecek etkileyici bir kalite tekniği olarak ön plana çıkmaktadır. Yöntemin uygulaması sırasındaki temel hedef, olası hatanın sebebinin dolayısı ile hatanın etkisinin minimuma indirilmesidir [100].

Tasarım ve üretimde FMEA kullanımı için yapılan yatırım, tüm sistem maliyetlerinin düşmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Güvenli bir süreç kontrolü ve ürün/süreç tasarımı için gerekli bilgilerin oluşturulması adına kapsamlı bir sistem inşa edilmesini sağlamaktadır. FMEA uygulamasının, maliyete olan etkisinin yanı sıra iş gücü üzerinde de etkili kazanımları bulunmaktadır. Yapılacak olan bir FMEA uygulaması aşağıda özetlenmiş olan fonksiyonların gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır [101]:

• Ürün, proses ya da hizmette hataların oluşturacağı en küçük bir zararın bile oluşumunun engellenmesini sağlamak için hata türlerini sistematik olarak gözden geçirir.

• Ürün, proses ya da hizmeti ya da bunların fonksiyonelliğini etkileyebilecek her türlü hatayı ve bu hatanın etkilerini tanımlar.

• Tanımlanan bu hatalardan hangilerinin ürün, proses ya da hizmet operasyonlarında daha kritik etkilerinin olduğunu belirleme ve bu yüzden meydana gelebilecek en büyük hasarı ve hangi hata türünün bu hasarı üretebileceğini tanımlar.

• Montajda, montaj öncesinde, üründe ve proseste hataların oluşum olasılığını ve bunun nereden kaynaklanabileceğini (tasarım, operasyon, vb.) belirler.

• Diğer kaynaklardan elde edilmesi mümkün olmayan hata oranlarını ve türlerini tanımlayarak gerekli muayene programlarının kurulmasını sağlar.

• Güvenilirliğin deneysel olarak test edilebilmesi için gerekli muayene programlarının kurulmasını sağlar.

• Bir ürün için değişikliklerin olabilecek etkilerini tanımlar.
• Yüksek riskli bileşenlerin nasıl güvenilir hale getirilebileceğini tanımlar.
• Montaj hatalarının olabilecek kötü etkisinin nasıl giderilebileceğini tanımlar.

Yukarıda sağlanması amaçlanan fonksiyonların gerçekleştirilmesi ile FMEA'nın sağladığı faydaları şu şekilde sıralayabiliriz [102]:

• Ürünün, tasarım, güvenilirlik, imalat teknolojisi ve emniyet alanlarındaki eksik, zayıf ve yetersiz noktalarını belirler.
• Olası değişiklik maliyetlerini azaltır. Kâğıt üzerinde yapılan bir değişiklik üretim aşamasında değişiklik yapılmasından çok daha ucuza mal olmaktadır.
• Ürünün pazara sunulma zamanını kısaltır. Kâğıt üzerinde değişiklik yapmak, üretim aşamasında değişiklik yapmaktan çok daha az zaman alır.
• İç ıskartaları azaltır.
• Ürün sorumluluğu konusunda riski azaltır.
• Müşteri memnuniyetinin artmasını sağlar.

Ayrıca FMEA kullanmanın getirdiği genel anlamdaki avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

• Hizmet veya ürünlerin kalitesini ve güvenilirliğini arttırır.
• Şirket imajını arttırır.
• Rekabet avantajını arttırır.
• Müşteri tatminini arttırır.
• Ürün geliştirme zaman ve maliyetini azaltır.
• Tasarım geliştirme faaliyetlerinde bir öncelik sağlar.
• En uygun sistem tasarımını seçmekte kolaylık sağlar.
• Gelişim isteği doğurur.
• Organizasyon kültürünü arttırır.

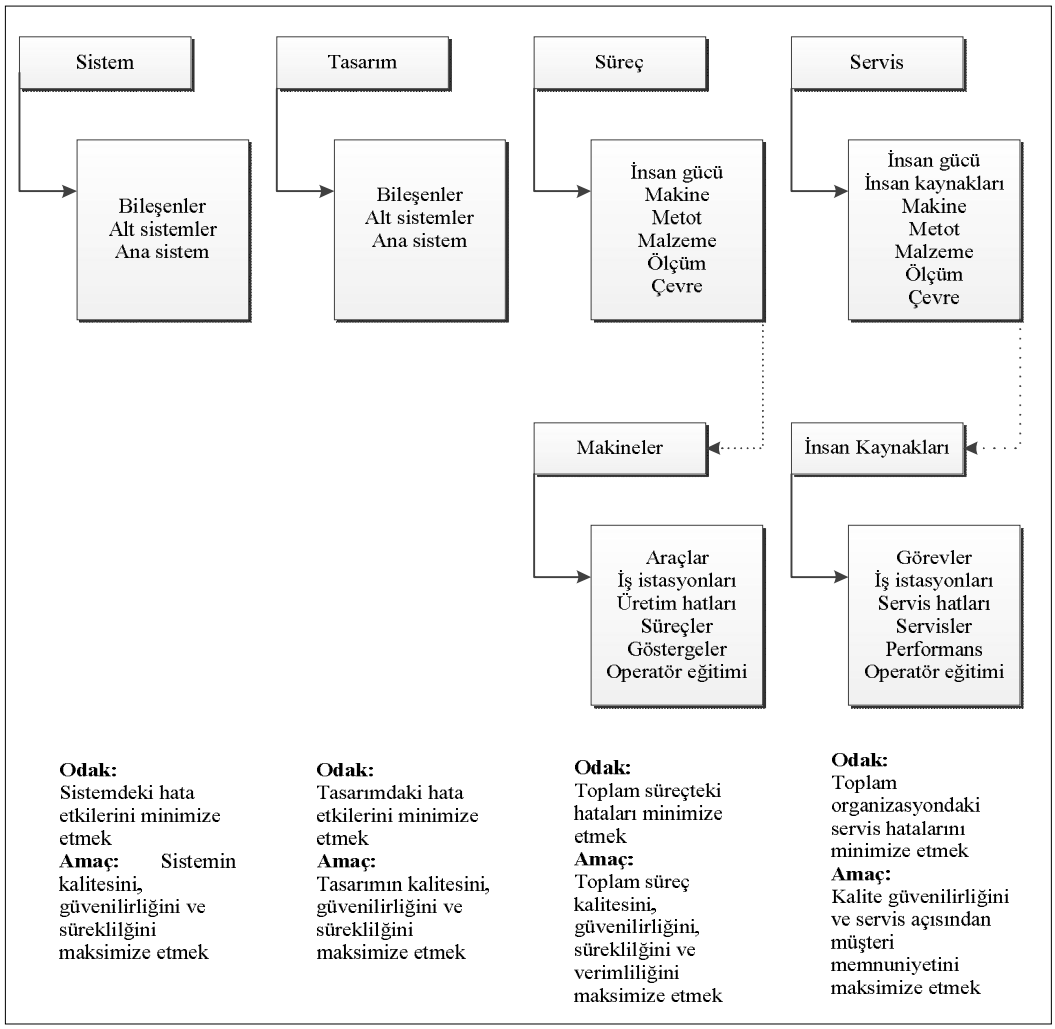
Hata Türü ve Etki Analizi'nin sağladığı avantajlar incelendiğinde bu tekniğin, firmaların pazarda yüksek güvenilirliğe sahip, kaliteli ürünleri düşük maliyet ile tasarlamasını ve üretmesini sağladığı ve kötüye giden operasyon maliyetlerini kontrol altına alarak hataların müşteriye yansımadan en erken biçimde önlenmesine yardımcı olduğu görülmektedir.

Bu teknik, geliştirdiği belgelendirme yapısıyla sürekli olarak güncelleştirilebildiğinden, uygulayan firmalara sonsuz bir kalite gelişimi ve müşteri memnuniyeti kazandırmaktadır [101].

3.5. FMEA Çeşitleri

FMEA, bir sistem içerisinde o sistemi oluşturan birçok süreç için kullanılabilmektedir. İlk FMEA uygulamaları ürün tasarımı sürecinde yer alan mekanik aksamlarda oluşabilecek sorunların önceden belirlenmesi için kullanılmış olup, teknik zamanla gelişerek daha geniş kullanım alanları bulmuştur. Sistemdeki tüm süreçlerde meydana gelecek potansiyel hataların belirlenip yok edilmesine yönelik uygulamalar sayesinde çesitlendirilmiştir. FMEA'nın çeşitli türleri vardır. Bunlardan bazıları yoğun olarak kullanılırken; bazılarının kullanımı da, sektörel bazda ve/veya firma bazında sınırlı kalmaktadır [92]. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere FMEA genel olarak dört gruba ayrılmaktadır.

- Sistem FMEA
- Tasarım FMEA
- Süreç FMEA
- Servis FMEA



Şekil 3.1. FMEA Çeşitleri

3.5.1. Sistem FMEA

Sistem FMEA bütün donanımların ve tasarımın tamamlanmasının sonrasında üretim, kalite güvence gibi sistemlerin akışını en elverişli hale getirmek için kullanılan bir yöntemdir. Sistem ve alt sistemleri analiz ederek, sistemin eksikliklerinden doğan sistem fonksiyonları arasındaki potansiyel hata türlerini belirlemeye odaklanır. Sistemler arası ilişkileri ve sistemin elemanlarını da kapsamaktadır. Sistem FMEA'da hedef; operasyonel (etkinlik ve performans) faktörler ile ekonomik faktörler arasında uygun bir denge tanımlamak ve oluşturmak, sistemin kalitesini, güvenirliğini ve korunabilirliğini artırmaktır. Bu hedefe ulaşmak için sistem FMEA; müşterinin belirlenmiş ihtiyaç, istek ve beklentileri dikkate alınarak yapılmalıdır. Sistem FMEA'nın faydaları şunlardır [103]:

• Sistemi etkileyen potansiyel problemlerin bulunabileceği alanlar daralır.

• Sistem içerisinde uygulanacak prosedürler için bir temel oluşturulmasına yardımcı olur.
• Sistem içerisindeki fazlalıkların tespit edilmesine yardım eder.
• Optimum sistem tasarım alternatiflerinin seçilmesinde yol gösterir.

Sistem FMEA etkin bir şekilde uygulandığında; hata türü ile güvenlik konularını ortadan kaldıracak ve hataları azaltacak potansiyel tasarım faaliyetlerinin listesi, potansiyel hata türlerinin RÖS tarafından ağırlıklandırılmış listesi ve aynı zamanda potansiyel hata türlerini tespit edebilecek potansiyel sistem fonksiyonlarının bir listesi elde edilebilmektedir [91].

3.5.2. Tasarım FMEA

Tasarım FMEA, üretim aşamasına geçmeden önce ürünün tasarımının analiz edilmesi için kullanılmaktadır. Üründen beklenen fonksiyonlar ile birlikte tasarım yetersizliklerine odaklanarak oluşabilecek potansiyel hataların belirlenmesinde kullanılan bir kalite geliştirme aracıdır [104]. Tasarımdaki hatalardan dolayı hizmet veya imalat aşamalarında ortaya çıkabilecek olası ürün hata şekillerini ele almaktadır. Tasarım bütünlüğünü sürekli kılmak amacı doğrultusunda, tasarım aşaması dışında imalatta, montajda, donanımda ve müşterinin kötü kullanımından dolayı üründe oluşacak tasarımla ilgili sorunları tanımlamaktadır. Bu teknik ile sistem veya bileşenlerin güvenilirlik riskleri yazılı hale getirilir, her hata türünün etkisi analiz edilir ve düzeltici faaliyetler yani tasarım değişiklikleri tanımlanır [83]. Kısacası tasarımda mümkün olan tüm hataların belirlenmesi ve fiziksel olarak tanımlanması aşamasıdır [105]. Tasarım FMEA, hataları azaltmada ve önlemede şu hedefler izlenerek uygulanmaktadır [85]:
• Fonksiyonel gereklilikleri ve tasarım alternatiflerini içeren objektif tasarım değerlendirmesine yardımcı olarak
• Üretim, montaj, servis ve geridönüşüm gereklilikleri için tasarımı değerlendirerek
• Tasarım aşamasında düşünülmüş, sistem ve operasyon üzerinde etkili olacak olası hataların ve etkilerinin varlığını azaltarak
• Etkili tasarım, geliştirme ve doğrulama programlarının planlamasına yardımcı olacak ekstra bilgileri sağlayarak

• Tasarım geliştirme ve doğrulama testleri için öncelikli sistem kurulumunda etkili olacak potansiyel hataları ve bunların müşteri üzerine etkilerini içeren düzenli listeler oluşturarak
• Risk azaltma adımlarının izlenmesinde bir format oluşturma sağlanarak
• Tasarım değişikliklerini değerlendirme ve daha iyi tasarımlar geliştirmeye yardımcı olacak alanlar sağlayarak

Tasarım FMEA tekniğinde iki yaklaşım söz konusudur. Birinci yaklaşımda, sistem ya da ürün bir bütün olarak ele alınarak başlanır ve en alt birime kadar analiz edilir. İkincisinde ise, parça, bileşen gibi sistemlerin en alt düzeyindeki birimlerinden başlanır, alt montaj, alt sistem gibi aşamaları geçerek sistemin ya da ürünün en son düzeyine kadar ilerlenir. Bu yaklaşımlardan birinin seçimi, sistemin ve sorunun büyüklüğüne bağlı olacaktır. Uygulamada kabul gören ikinci yaklaşımdır [99].

Tasarım FMEA'nın faydaları şunlardır [103]:
• Tasarım geliştirme faaliyetleriyle ilgili önceliklerin belirlenmesi
• Potansiyel hataların tasarım aşamasında iken belirlenmesinin sağlanması
• Potansiyel güvenlik sorunlarının belirlenerek ortadan kaldırılmasına yardım etmesi ve değişiklik için açıklamaların kaydedilmesinin sağlanması
• Önemli ve kritik özelliklerin belirlenmesine yardım etmesi

3.5.3. Süreç FMEA

Süreç FMEA, imalat ve montaj süreçlerini analiz etmede kullanılmaktadır. Kusursuz ürünler üretmek için analizcilere montaj ve imalat proseslerinde kullandıkları makineleri, aletleri, prosesleri ve insan gücünün etkilerini analiz ederek, imalat proseslerini değerlendirebilme yani zayıf noktalarını belirleme olanağı vermektedir [99]. Üretim süreci ve montaj yetersizliklerinden kaynaklanan hata türleri üzerine odaklanmakla birlikte teknik özellikle ürünün ilk üretiminde önem kazanmaktadır. Süreç FMEA, çalışanı, makineyi, metodu, materyali, ölçümü ve çevreyi içine alan adımları içeren bir yöntem olup üretimden önce olası hataları belirleyip yok etmede etkili olmaktadır. Burada her bir bileşen kendi içinde alt bileşenleri sahiptir ve diğer bileşenler ile de etkileşim içindedirler. Bu etkileşimler hataya neden olabilmektedir. Bu nedenle süreç FMEA, tasarım ve sistem FMEA'ya göre daha zor uygulanmakta ve daha çok zaman gerektirmektedir. Etkili bir süreç FMEA, tasarım özelliklerinin iyi

tanımlanıp anlaşılması ve üretimin bu özelliklerin üzerinde neler yapabileceğinin belirlenmesi ile gerçekleşmektedir [90]. Bir süreç FMEA uygulamasında dikkat edilecek nokta üretim sürecinin başlangıç noktasından bitişine kadar tüm operasyonları, alt süreçleri dikkate almaktır. Üretim sürecinin diğer süreçlerle bağlantıları da incelenmelidir.

Süreç FMEA, üretim süreç gelişimini şu hedefleri sağlayarak destekler [85]:
• Üretim süreci fonksiyonlarını ve gerekliliklerini tanımlamak ve değerlendirmek
• Oluşacak olan ürünü, üretim süreci ile ilgili hata türlerini, süreç ve müşteri üzerinde oluşabilecek olası hataların etkilerini tanımlamak ve değerlendirmek
• Potansiyel üretim ya da montaj süreci hedeflerini tanımlamak
• Hata durumlarının belirlenebilirliğini arttırmak ve oluşumunu azaltmak için üretim sürecinde kontrole odaklanan süreç değerlerini tanımlamak
• Önleyici ve düzeltici faaliyetler ve kontroller için öncelikli bir sistem kurulumunu mümkün kılmak

Süreç FMEA'nın yararları olarak şunlar sıralanabilir [83]:
• Proses yetersizliklerini belirler ve düzeltici ve önleyici faaliyetler planı önerir.
• Kritik ve/veya önemli karakteristikleri saptar ve kontrol planları geliştirmede yardımcı olur.
• Düzeltici ve önleyici faaliyetler için öncelik sırasını verir.
• İmalat veya montaj süreçlerinin analizinde yardımcıdır.
• Değişiklerin ne amaçla yapıldığını dokümante eder.

Süreç FMEA'nın çıktıları şunlardır [91]:
• Risk Öncelik Sayısına göre sıralanmış potansiyel hata türleri listesi
• Kritik ve/veya önemli hata karakteristiklerinin potansiyel listesi
• Kritik ve önemli karakteristikler için önerilen potansiyel önlemlerin listesi
• Hata türlerinin nedenlerini ortadan kaldıracak, ortaya çıkmalarını azaltacak ve saptanma düzeylerini iyileştirecek potansiyel önlemler listesi

Süreç FMEA tasarlanan ürünün istenildiği gibi üretilmesi için uygulanan önemli bir araçtır. Süreç FMEA, üretim teçhizatının tanımının yapıldığı fakat henüz bunların imalatının yapılmadığı anda yapılmalıdır ki; böylece ürün özelliklerinin yerine getirilmesinde daha iyi bir güvenilirlik sağlansın. Buradaki amaç tasarımın

yetersizliğinden kaynaklanacak üretim aşamasında olası hataların önüne geçebilmektir. Bu nedenle süreç FMEA'nın, tasarım FMEA ile birlikte uygulanması daha uygun olacaktır [84].

3.5.4. Servis FMEA

Servis FMEA, fiili (ilk) servis gerçekleşmeden önce potansiyel veya bilinen hata türlerinin tanımlandığı, takip ve düzeltici faaliyetlerin sağlandığı disiplinli bir analiz/metodudur. Servis FMEA, kusursuz hizmet beklentisiyle etkin bir süreç çıktısı üretmek için çeşitli teknoloji ve metotların uygulanmasını içeren evrimsel bir süreçtir (statiğin aksine dinamiktir) [106]. Bütün donanımın ve tasarımın tamamlanmasından sonra üretim, kalite güvence gibi sistemlerin akışını en elverişli hale getirmek için kullanılan bir yöntem olan servis FMEA sistem veya proses yetersizliklerinden kaynaklanan hata türlerinin analiz edilmesinde yardımcı olmaktadır. Bu analizle organizasyon faaliyetleri arasında önceliklendirme yapılması ve değişiklik için açıklamaların kaydedilmesi sağlanmaktadır.

Bir ilk servis icrası, günlük operasyonun bir parçası olarak spesifik bir müşteri için gerçekleştirilen bir faaliyet (hizmet) olarak görülmektedir. Servis FMEA'nın görevi müşteri ve tasarım spesifikasyonları tarafından tanımlanan kalite, güvenilirlik ve süreklilik, maliyet düzgünlüğü ve üretilebilirlik değerlerini maksimuma çıkartacak mühendislik çözümlerini tanımlamak, ispat etmek ve artırmaktır. Bu görevi gerçekleştirmek için servis FMEA müşteri beklentilerini, isteklerini ve ihtiyaçlarını temel alan aşağıdaki önerileri dikkate almalıdır [107]:

• Operasyonel bir ihtiyacı, servis performans parametrelerinin tanımlanmasına ve fonksiyonel analiz, sentez, optimizasyon, tanımlama, test ve gelişimin etkin proseslerinin kullanımı boyunca uygun servis konfigürasyonuna taşımak.

• İlişkili teknik parametreler ve tüm servis tanımını ve o servisin taşınmasını optimize eden bir haldeki tüm fiziksel, fonksiyonel ve program bağlantılarının kalite güvence uygunluğunu oluşturmak ve tamamlamak.

• Güvenilirlik, süreklilik, mühendislik yardımcı elemanları, insan faktörleri, emniyet, yapısal entegrelik, üretebilirlik ve diğer benzer özellikleri toplam servis gücüne entegre etmek.

Servis FMEA müşteriye servis henüz ulaşmadan analiz edilmesinde yardımcı olmaktadır. İş akışının, sistem ve proses analizinin etkin bir şekilde yapılmasında, işteki hataların ve kritik önemli işlerin belirlenmesinde ve kontrol planlarının oluşturulmasında yol göstermesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Analizin uygulanmasıyla sistem ve prosesi takip etmek için liste oluşturularak, potansiyel kritik veya önemli iş ve proseslerin RÖS ile ağırlıklandırılmış listesi yardımıyla sınırdaki potansiyel servis ile ilgili hataların yok edilmesinin sağlanması mümkün olmaktadır. Tasarım FMEA'nın tamamlanmış olarak kabul edilebilmesi, ancak üretim için onay ve bir başlangıç tarihinin verilmesi ile olabilmektedir. Süreç FMEA'nın tamamlanmış olarak kabul edilebilmesi için ise bütün operasyonların belirlenerek değerlendirilmesi ve kontrol planlarında kritik olan bazı önemli özelliklerin oluşturulması gerekmektedir [91].

FMEA bir defa başladıktan sonra yaşayan bir doküman olmakta ve tasarım ile proseste önemli sayılabilecek değişiklikler olduğunda ise bu değişikliklerle uyum sağlanarak aktüel duruma tekrar uyarlanmaktadır. Bu sözü edilen değişikliklerin ürün üzerindeki etkileri de sürekli değerlendirilerek üretim ile montaj prosesi yetersizliklerin tespitine çalışılmaktadır [91].

Servis FMEA'nın sağladığı faydalar şöyle sıralanılabilir [83]:
• İş akışının analiz edilmesinde yardımcıdır.
• Sistem ve/veya proseslerin analiz edilmesinde yardımcıdır.
• İşlem yetersizliklerini belirler.
• Kritik veya önemli işlemleri belirler ve kontrol planlarının geliştirilmesinde yardımcı olur.
• İyileştirme çalışmaları için öncelikleri ortaya koyar.
• Değişiklerin ne amaçla yapıldığını dokümante eder.

Servis FMEA'nın çıktıları şunlardır [83]
• Risk Öncelik Sayısına göre sıralanmış potansiyel hata türleri listesi,
• Kritik veya önemli proses veya işlemlerin potansiyel listesi,
• Darboğaz yaşanan proses veya işlemlerin potansiyel listesi,
• Hataları ortadan kaldıracak potansiyel önlemler listesi,
• Gözlenecek sistem veya proses fonksiyonlarının potansiyel listesi.

3.6. FMEA Takımı

FMEA projelerinin farklı alanlarda uygulanması takım ihtiyacı gerektirmektedir. Dolayısıyla FMEA sürecini koordine etmeden bir kişi sorumlu olsa da bir takım tarafından gerçekleştirilmektedir. Takımın amacı, farklı bakış açılarını ve deneyimleri bir araya getirerek projenin tüm yanlarını bir bütün içinde ilerletmektir. Bu amaç doğrultusunda farklı alanlar, farklı uzmanlıklar, yeni bakış açıları doğurmakta ve proje içinde bilgi akışı sağlanarak yeni atılımlar meydana getirmektedir [108].

3.6.1. Takım büyüklüğü

FMEA projeleri için ideal takım oluşturmak için kişi sayısı dört ile altı arasında olmalıdır. Takım eğer dört kişiden daha az olursa, alt sistemlerde önemli alanların unutulması riski doğabilmektedir. Ayrıca kişi yetersizliğinden dolayı uygulanması gereken bazı adımlar sağlıklı yürütülemeyebilmektedir. Kişi sayısı altı kişiden fazla olması durumunda ise her üye takıma tam olarak adapte olamayabilmektedir. Fikir paylaşımında, tartışmalarda ve karar alma anlarında sorunlar yaşanabilmekte, FMEA projesi için yapılan buluşmalar verimsizlikle sonuçlanabilmektedir [109].

3.6.2. Takım üyeliği

FMEA çalışması genellikle firmaların belirli bir alanında ve özel bir durum üzerinde uygulandığı için çalışma yapacak ekiplerin çok yaygın bir yelpazeden kişilerce oluşturulması tercih edilmeyen bir durumdur. Ekiplerin, söz konusu özel konu veya durumla doğrudan ilgili kişilerce oluşturulması daha makul bir yaklaşım olacaktır. Ancak ekibin sadece tek bir fonksiyonla ilgilenen kişilerin biraraya getirilmesi ile yapılanamayacağı da açıktır. Bunun sebebi aynı birimden seçilen kişilerin, çalışmaya daha geniş bir bakış açısı kazandırmada yetersiz kalabilmesidir. Bu nedenle takıma, FMEA uygulanacak sürecin bağlantılı olduğu diğer süreçlerden de kişilerin dâhil edilmesi ve değişik fonksiyonlarda multi disipliner ekipler kurulması tercih edilmelidir [100].

3.6.3. Takım liderliği

Takım lideri yönetici tarafından atandığı gibi takım üyeleri tarafından da seçilebilmektedir. Takım lideri aşağıda yer alan unsurları sağlayarak FMEA sürecinin koordinasyonundan sorumludur [108]:

• Buluşmaları ayarlama ve yardımcı olma
• Gerekli kaynakları sağlama
• FMEA proje süresi boyunca takımın gelişimini sağlama

Takım lideri takım üzerinde baskın olmamalıdır. Takım liderinin rolü karar vericilik değil, süreci kolaylaştırıcılıktır. Buluşma zamanı, süresi ve FMEA kayıtlarının saklanması bir kişinin sorumluluğunda olmalıdır. Toplantılarda kayıt tutucu kişi, lider hariç olmak üzere, üyeler arasında değişmelidir [108].

3.7. FMEA Uygulama Adımları

Hata Türü ve Etkileri Analizi, bir takım oluşturularak ürün, üretim süreci veya hizmette hatanın bulunması, hatanın risk önceliğinin saptanması, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin gerçekleştirilmesi, hatanın müşteriye ulaşmadan engellenmesine odaklanmaktadır [101]. Genel olarak bakıldığında FMEA yönteminde olası hatalar tanımlanır; her bir olası hatanın nedenleri belirlenir, müşteri üzerindeki etkileri değerlendirilir, uygulanan kontroller gözden geçirilir, düzenleyici faaliyetler önerilir ve bunların uygulanması izlenir. FMEA'nın amacı, bilinen ve potansiyel problemleri müşteriye ulaşmadan önce belirlemek ve önlemektir. Problemlerin farklı öncelikleri bulunmaktadır. Bu sebeple önceliklerin belirlenmesi FMEA metodolojisi için önemli bir uğraşı alanı oluşturmaktadır [110].

Hata önceliklerini belirlemede yardımcı üç bileşen vardır [91]:

• Ortaya çıkma (O)
• Şiddet (S)
• Saptama (D)

Bu bileşenlerin değerlerini belirlemede pek çok yöntem vardır. Alışılmış yöntem, nümerik skalaların (risk ölçüt tablosu) kullanımıdır. Bu aşamada bir FMEA projesine ne zaman ve hangi şartlar altında başlanılması gerektiği sorusu akla gelebilmektedir.

FMEA bilinen veya potansiyel problemlerin ortadan kaldırılması ile müşteri memnuniyetini arttırmayı amaçlayan bir metodolojidir. Bunu gerçekleştirmek için FMEA mümkün olduğunca erken, hatta bütün gerçekler ve bilgiler mevcut değilken başlatılmalıdır. FMEA'yı uygulayan kişiler bütün bilgilerin toplanmasını beklememelidir. Çünkü bütün veri ve bilgilere hiçbir zaman sahip olunamamaktadır [99].

FMEA uygulamasına başlanabilecek bazı durumlar aşağıda sayılmıştır [90]:

• Yeni sistemler, tasarımlar, ürünler, prosesler veya servisler oluşturulurken

• Mevcut sistem, tasarım, ürün, proses veya servisler sebeplerine bakılmaksızın değiştirilirken

• Mevcut koşullardaki sistem, sistem, tasarım, ürün, proses veya servisler için yeni uygulamalar bulunurken

• Mevcut sistem, tasarım, ürün, proses veya servislerin geliştirilmesi düşünüldüğü zaman

Bu noktada akla gelen bir başka soruda bir FMEA çalışmasının ne zaman sona erdirileceğidir. Normal olarak FMEA yapılan sistem, tasarım, proses veya hizmet var oldukça FMEA devam eder. Sadece sistem, tasarım, ürün, proses veya servisin sona erdirilmesi veya sürdürülmesi kararı verildiğinde FMEA son bulur.

FMEA uygulamasının sonlandırılacağı bazı durumlar aşağıda sayılmıştır [90]:

• Sistem FMEA, bütün donanımın belirlendiği ve tasarımın son şeklini aldığı noktada

• Tasarım FMEA, üretime geçişin kesin tarihi saptandığında,

• Süreç FMEA, bütün proseslerin belirlendiği, değerlendirildiği ve bütün kritik ve anlamlı karakteristiklerin kontrol planlarına taşındığı anda

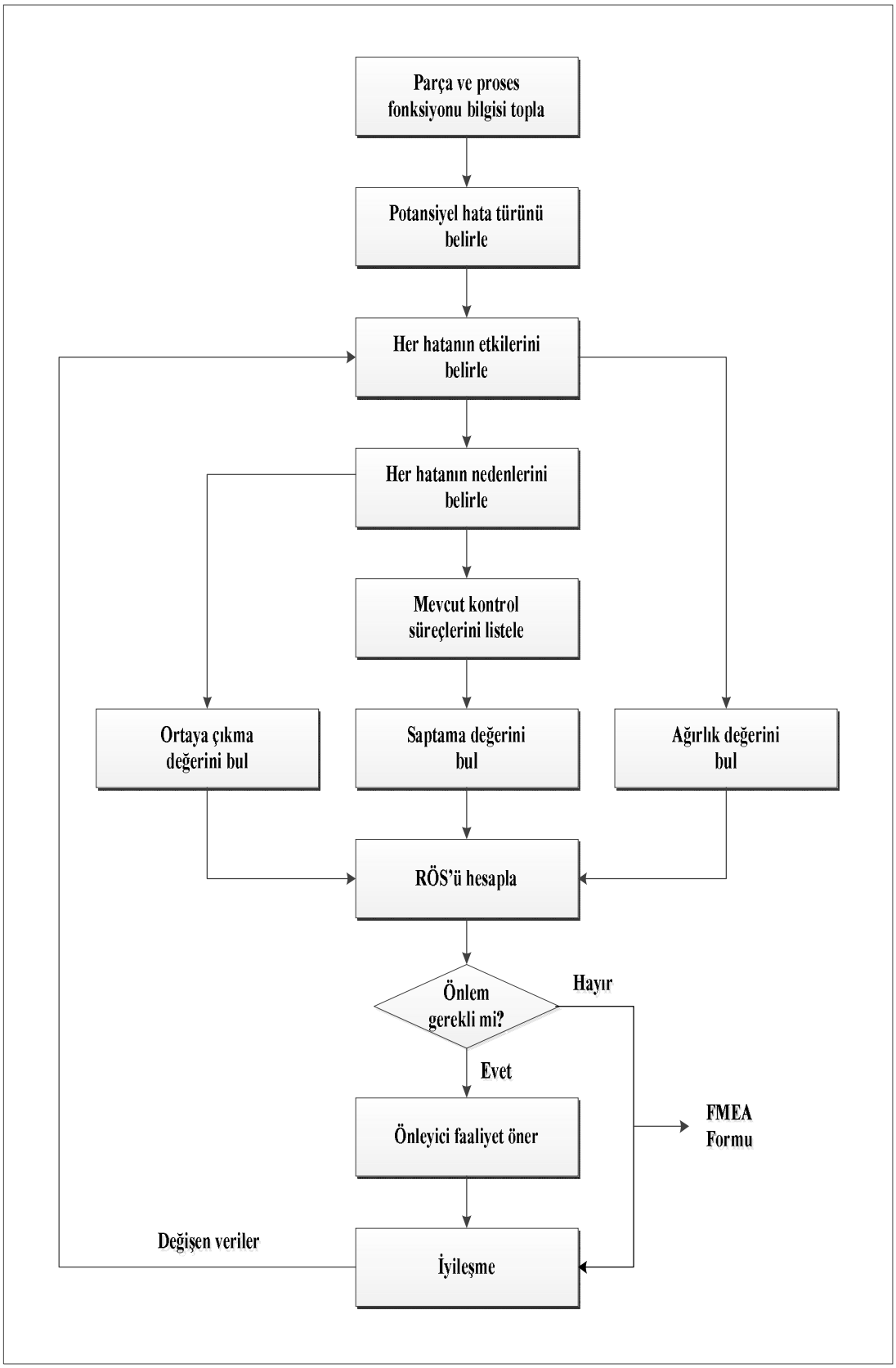
• Servis FMEA, sistem tasarımı ve bireysel görevlerin tanımlandığı, değerlendirildiği ve bütün kritik ve anlamlı karakteristiklerin kontrol planlarında adreslendiği zaman sona erdirilmesi düşünülebilir.

Hata Türü ve Etkileri Analizi uygulamasında standart bir uygulama süreci henüz yoktur. Her işletme kendi organizasyon yapısına ve isteklerine göre bir uygulama süreci oluşturmuş ve bunu izlemektedir [90].

Uygulama süreçlerindeki farklılıklara rağmen genel FMEA adımları şu şekilde sıralanır [84]:

1. FMEA kapsamının belirlenmesi
2. FMEA takımının kurulması
3. FMEA uygulanacak sürecin (Sistem, Tasarım, Süreç ya da Servis) incelenmesi
4. Beyin fırtınası ve olası hata türlerinin belirlenmesi
5. Olası hata nedenlerinin belirlenmesi
6. Olası hata etkilerinin belirlenmesi
7. Mevcut kontrollerin belirlenmesi
8. Ortaya çıkma değerinin belirlenmesi
9. Şiddet değerinin belirlenmesi
10. Saptama değerinin belirlenmesi
11. Risk öncelik sayısının hesaplanması ve değerlendirilmesi
12. Alınacak önlemlerin belirlenmesi ve uygulanması
13. FMEA uygulamasından sonra yeni RÖS değerinin hesaplanması

Şekil 3.2'de FMEA yöntemi süreç akışı verilmektedir.



Şekil 3.2. FMEA Süreci

3.7.1. FMEA kapsamının belirlenmesi

FMEA çalışmasının başında çalışmanın sınırlarının belirlenmesi, çalışma esnasında gerekli olmayan alanlarda zaman kaybını önleme açısından ve çalışmanın optimum düzeyde etkili olabilmesi bakımından önemlidir [111]. Örneğin FMEA bir ürünün tasarımında uygulanacaksa, tasarım fonksiyonları başlıklar halinde belirlenmelidir. Eğer süreç FMEA uygulanacaksa, üretim ya da üretim-mühendislik fonksiyonları başlıklar halinde belirlenmelidir. FMEA çalışması için yazılı bir doküman hazırlanıp, yapılacak tanımlamalar kayıt altına alınmalı ve herkes tarafından ulaşılabilir olmalıdır. Bu doküman, takımın FMEA çalışması boyunca yanlış alanlara yönlenmesini de engellemektedir. Kapsam belirlenirken ayrıca FMEA takımının sorumlulukları da ortaya konmalıdır. FMEA takımı oluşturulduktan sonra da FMEA kapsamı ile ilgili değişikliklere gidilebilir [115].

FMEA çalışmasında kapsam iki şekilde belirlenir [83]:

• İlk yöntemde tasarım veya üretim sürecinin bütün adımları ele alınır ve çalışmalar ilerlemeye bağlı olarak zaman içinde gerçekleştirilir.

• İkinci olarak, tasarım veya üretim sürecinin kritik olarak kabul edilen bazı adımları ele alınır. Tasarımda kritik olarak kabul edilen birim, bir parça veya bir alt montaj olabilirken üretim süreci için ise kritik alan fonksiyonlardan oluşacaktır.

FMEA çalışmalarında dikkat edilmesi gereken önemli bir husus uygulama alanını çok büyük tutmak yerine küçük birkaç parçaya bölmektir. Böylece özel gruplar bu alt süreçler üzerinde rahatlıkla çalışabilecektir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise mevcut durumun ve ulaşılmak istenen hedef değerin sayısal olarak tanımlanmasıdır. FMEA'ya başlamadan önce Tablo 3.1'de gösterildiği gibi bir çalışma kağıdı hazırlamak üyelerin rollerinin, sorumluluklarının ve yapılacak FMEA çalışmasının amacının daha iyi anlaşılması için oldukça yararlı olacaktır [108].

Tablo 3.1. FMEA başlangıç formu

FMEA BAŞLANGIÇ FORMU		
FMEA Numarası:	Başlama Tarihi:	
Takım Numarası:	Bitiş Tarihi:	
Lider:		
Devam süresini ve bitiş süresinin kayıtlarını kim tutacak?		
FMEA'nın kapsamı nedir?		
Etkilenecek tüm alanlar belirlendi mi? (bir tanesini işaretleyin)		
EVET	HAYIR	Uygulama:
Takıma farklı seviyelerden ve türden bilgiler sunuldu mu? (bir tanesini işaretleyin)		
EVET	HAYIR	Uygulama:
Müşteriler ve tedarikçiler belirlendi mi? (bir tanesini işaretleyin)		
EVET	HAYIR	Uygulama:
FMEA takımı hangi amaç için sorumluluk taşımaktadır? (bir tanesini işaretleyin)		
FMEA analizi	İyileştirme için öneriler sunma	İyileştirmeleri uygulama
FMEA için ayrılan bütçe ne kadardır?		
Proje son teslim tarihine sahip mi?		
Takım zaman için özel kısıtlamalara sahip mi?		

3.7.2. FMEA takımının kurulması

FMEA geliştirme süreci tek başına gerçekleştirilmemesi gereken bir süreç olup bir takım çalışması sorumluluğu gerektirmektedir. Yöntemin grup yerine tek bir kişi tarafından uygulanması durumunda, analizin tamamlanarak bilgilerin FMEA tablolarında yer alması sağlanabilmesine rağmen değerlendirmelerde yanlılık ortaya çıkabileceğinden istenmemektedir [115]. Bu nedenle takım, FMEA uygulanacak süreç hakkında bilgi sahibi olan ve bu konuda uzmanlaşmış kişilerden oluşturulmalıdır. Takım yaklaşımı, FMEA sürecinden etkilenecek tüm alanlar için girdilerin ve işbirliğinin sağlıklı olması için gereklidir.

Her FMEA çalışması için takımlar özel olarak belirlenmelidir. Takımlar çapraz fonksiyonlu ve çok disiplinli olmalıdır. FMEA takımı oluşturulurken çok çeşitli bakış açıları ve tecrübelerin bir araya getirilmesi amaçlanır [115].

FMEA çalışmasında [99];

• FMEA konusunda uzman, takımı koordine etmekten sorumlu bir takım lideri olmalıdır.

• Takım elemanları incelenen süreci en iyi bilenlerden seçilmelidir.

• Takım elemanlarına tam zamanında eğitim verilmelidir.

• Grubu oluşturan üye sayısı yeteri kadar fikir üretebilecek ve konunun dağılmasına fırsat vermeyecek büyüklükte olmalıdır.

• Olumlu sonuçların alınabilmesi için üst yönetimden kişilerin de grupta yer alması sağlanmalıdır.

3.7.3. FMEA uygulanacak sürecin incelenmesi

FMEA projelerinin başarıya ulaşılabimesi için FMEA uygulamasından önce, incelenecek ürün veya sistemin mevcut sürecinin tüm adımlarının takip edilmesi ve ayrıntılı incelenmesi gerekmektedir. Bu aşamada ilk olarak ürün veya sistemin fonksiyonları, çalışma ve üretim şekli belirlenir. Tüm önemli fonksiyon ve işletim şartları, müşteri teknik şartnameleri ve tasarım unsurları dikkate alınarak tanımlanır. Ürün ömrü ve ürünün yeniden değerlendirilmesine kadar ki tüm safhalar göz önünde bulundurulur [105]. Ürünün fonksiyonu ve özellikleri ne kadar iyi tanımlanırsa, hata türleri de o kadar iyi belirlenebilir veya tanımlanabilir. Kolaylık sağlamak amacıyla,

bilgilerin gösteriminde diyagramlardan (akış diyagramları vb.) yararlanılabilir. Test ve değerlendirme, kalite güvencesi, bütünleşik lojistik destek, sistem emniyeti, tasarım ve geliştirme alanlarında yapılan çalışmalar da FMEA'da yararlanılabilecek önemli kaynaklardır [90]. Sürecin incelenmesi aşamasında takımın her üyesi kendi süreci dışında kalan diğer süreçleri takip etmeli, bu süreçler hakkındaki bilgileri incelemelidir.

3.7.4. Olası hata türlerinin belirlenmesi

Olası hata, sistemde meydana gelmesi muhtemel olan fonksiyon yetersizlikleridir. Mevcut durumda oluşmamış fakat oluşabilecek potansiyele sahip hatalar için kullanılır. Sistem incelenirken önceden meydana gelmiş, hali hazırda devam eden ve ileride oluşabilecek hataların hepsi göz önünde bulundurulmalıdır. Olası hata türleri belirlenirken cevap aranan sorulardan bazıları şunlardır [99]:

• Sistem, tasarım proses veya servis ile ilgili olası sorunlar nelerdir?
• Parçanın belirlenen şartları karşılayamadığı durumlar nelerdir?
• Öngörülen mühendislik özelliklerini hiç göz önüne almadan, müşterinin itiraz edebileceği düşünülen herhangi bir unsur var mıdır?
• Bir sonraki veya daha sonraki operatör neyi kötü olarak değerlendirecektir?
• Son kullanıcı (müşteri) neyi kabul edilmez olarak tanımlayacaktır?

FMEA takımının olası hata türlerini belirlemek için kullanabilecekleri diğer bir yaklaşım, ürün veya sistemin performans, bütünlük, istenildiği zaman kullanıma hazır olma, güvenilirlik, dayanıklılık, faydalı ömür, estetik gibi özelliklerin birkaçına veya hepsine sahip olma durumu önceden belirlendiğinde bunun gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek olabilir. Olması istenen ancak gerçekleşmeyen özellik hatayı gösterecektir. İnceleme sırasında veri olarak garanti verileri, test raporları, müşteri şikayet raporları, benzer ürün ve sistem verileri, benzer ürünler için önceden yapılmış FMEA çalışmaları, simülasyon çalışmaları sonuçları gibi kaynaklardan sağlanan bilgilerden yararlanılır [111].

Genel olarak dört hata türü arasında ayrım yapılabilmektedir. Birinci ve ikinci tip hatalar ile daha çok karşılaşılmaktadır. Üçüncü ve dördüncü tipler birçok FMEA çalışmasında atlanılmaktadır [91]:

1.Tip Hata Fonksiyon Yok: Sistem veya tasarım hiç çalışmıyor, devre dışı veya hiç beklenmedik bir olay meydana geliyor

2.Tip Hata Düzensiz Fonksiyon: Tatmin etmeyen fonksiyon performansı söz konusudur. Spesifikasyonların bazıları veya belirli bir adedini karşılıyor, ancak tüm talep edilen özellikler veya sıfatları karşılamıyor. Bu kategoriye düzensiz (çok kuvvetli) fonksiyonlar ile zaman içerisinde düşen fonksiyon performansı da dâhildir.

3.Tip Hata Belirli Bir Süre Devre Dışı Kalan Fonksiyon: Talepleri karşılıyor ancak çevresel (sıcaklık, nem v.s) faktörler nedeni ile zamanla fonksiyonların belirli bir kısmının veya tümden kaybedilmesi söz konusudur. Mümkün olan bu tür hatalarda fonksiyonun tekrar tekrar devre dışı kalması söz konusudur. Sistem veya tasarım belirli bir süre eksiksiz çalışıyor, sonra çalışmıyor daha sonra tekrar çalışıyor.

4.Tip Hata İstenilmeyen/Ön Görülmeyen Fonksiyon: Birçok elemanlar arasında etkileşim söz konusudur. Elemanlar ayrı ayrı incelendiğinde doğru ve tam olarak çalışmakta, ancak ürünün veya prosesin toplam performansına, istenmeyen etkilere neden olmaktadır. Elemanlara ait performansların kombinasyonu toplam performansın tatmin olmamasına ve dolayısıyla istenilmeyen bir fonksiyona neden olur.

Hata türleri bulunurken sistemin her bileşenine odaklanmak FMEA takımının işini çok zorlaştıracaktır. Böyle bir durumdan kaçınmak için değişik araçlar kullanılabilir [115]:
• Hata türlerini çeşitli kategorilere ayırıp organize etmek için ilişki diyagramlarından yararlanılabilir.
• Balık kılçığı diyagramı ise hataları kategorilere ayırmada ve her kategorideki hataların nedenlerini doğru olarak saptamada yardımcıdır.

Olası hata türlerine örnek olarak
• Kırılma
• Açık devre (elektrik)
• Kısa devre (elektrik)
• Yeterli güç sağlanamaması
• Gürültü
• Deforme olma
• Korozyona uğrama

• Açılmama
• Kapanmama
• Renk uyumsuzluğu
• İşlememe
• Titreme
• Kesintili işleme
• Düşük düzeyde işleme
• Aşınma
• Delinme
• Sıkışma
• Hızın ayarlanamaması
verilebilir [105].

3.7.5. Olası hata nedenlerinin belirlenmesi

Hatanın nedeni, sonuçta bir hata türüne neden olacak, tasarım zayıflığının bir göstergesi şeklinde tanımlanır [112]. Potansiyel hata nedeni, hatanın nelerden nasıl oluşabileceğini belirtir. Hata ile nedeni arasında direkt bir bağlantı vardır ve "eğer … olursa, … olur" kalıbı kullanılarak potansiyel hata nedenleri belirlenmektedir.

FMEA takımının uygulama içerisinde en önemli görevi hata sebeplerinin analiz edilerek, kök nedenlerin tespit edilmesidir. Tecrübeye dayalı ve özellikle de yeni hata sebeplerinin eksiksiz bir şekilde belirlenmesi ve listelenmesi FMEA tekniğinin önleyici olması yönünden önemlidir. Olası hataların yok edilmesinde uygun kontrollerin ve hareket planlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu sebeple atılacak adımlar için kök nedenler oldukça önemli rol oynar.

Olası hata nedenlerini belirlemek için "Olası hata türüne yol açabilecek nedenler nelerdir?" sorusuna yanıt aranır. Olası hata nedenleri belirlenirken şu hususlar dikkate alınmalıdır [90]:
• Bir hata nedeni bir veya birden fazla hata türüne yol açabilir.
• Birden fazla hata nedeni tek bir hata türüne yol açabilir.
• Bir hata nedeni bir veya birden çok faktörün bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkabilir.

Bir hata birden çok nedenden meydana gelebilir ya da bir neden birden çok hataya neden olabilir. Bu sebeple neden-sonuç ilişkisinin iyi kurulması gerekmektedir [85]. Hata nedenlerinin belirlenmesinde, balık kılçığı diyagramı ve 3M + 1İ (Makine, malzeme, metot ve insan) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin dışında, geçmiş dönem kayıtlarının yer aldığı veri bankaları, hata ağacı analiz tekniği, global 8D raporları, blok diyagramları, yaratıcılık yöntemleri de hata nedenlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [105].

Hata nedenlerine örnekler aşağıdaki gibidir [91]:

- Aşırı yüklenme
- Kötü çevre koşulları
- Yanlış malzeme seçimi
- Uygun olmayan tasarım ömür kabulü
- Makine ayarsızlıkları
- Operatör hatası
- Aşırı zorlanma
- Dengesizlik
- Uygun olmayan bakım talimatları
- Yanlış tanımlanmış malzeme kalınlıkları
- İşgücünün eğitim yetersizliği

3.7.6. Olası hata etkilerinin belirlenmesi

Hatanın olası etkisi, müşterinin bu hata sonucunda oluşan düşüncelerini yani müşterinin yaşayabileceği hoşnutsuzluk ve tehlike oluşturabilecek durumları belirtmektedir. Olası hata etkisi, hatanın ortaya çıkması durumunda müşterinin neyin farkında olacağı ile ilgilenir. Kısacası, hata ile karşılaşan müşterinin tepkisini, yani olası hatayla karşılaştığında oluşan sonuçları tanımlar. Buradaki müşteri, bir sonraki bölüm, işlem yapacak kişi ya da son kullanıcıdır [111].

Olası hata etkisi, "Bu hata türü ortaya çıkarsa ne tür sonuçlara yol açar?" sorusuna cevap aranarak saptanır. Etkiler bir hatadan dolayı ortaya çıkan olaylar zincirleridir. Aşağıda hata etkilerinden kimin veya nelerin etkilenebilecekleri kısaca sıralanmıştır [91]:

- Konsept ve tasarım

• Sistem veya parça
• Bir üst sistem veya parça
• Nihai ürün
• Müşteri
• Yasal talimatlar ve güvenlik

Hata etkileri tanımlanırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [105]:
• Bütün hata etkilerinin mümkün olduğunca tam ve doğru bir şekilde belirlenmesi
• Fonksiyonun en üst seviyeye (sistem, araç, çevre) olan etkilerinin tanımlanması
• Hata etkilerinin müşterinin fark edebileceği (tatmin olmama/rahatsız olma) şekilde tanımlanması
• Etkiler zincirinin sonradan anlaşılabilecek şekilde tanımlanması

Parça, alt sistem ve sistemin aralarında hiyerarşik bir yapı olduğuna dikkat edilmelidir. Örneğin, bir parça kırılabilir, bu ise montaj parçalarında vibrasyona neden olabilir ve sonuç olarak da sistem fonksiyonlarının belirli bir süre devre dışı kalmasına neden olabilir. Belirli bir süre devre dışı kalan fonksiyon ise aracın performansının düşmesine, sonuç olarak da müşteri tatminsizliğine neden olur. Amaç, ekibin bilgi ve tecrübe birikimine uygun olarak hatalara ait etkileri, önceden görebilmesidir [105].

Olası hata etkilerini saptamada kullanılan kaynaklardan bazıları söyle sıralanabilir [90]:
• Müşteri şikâyetleri,
• Garanti verileri,
• Benzer ürün için yapılmakta olan veya yapılmış FMEA sonuçları,
• Güvenilirlik verileri,
• İlgili deney çalışmalarının sonuçlarından elde edilen veriler.

Olası hata etkilerine örnekler aşağıdaki gibidir [91]:
•Gürültü
• Aşırı çaba isteme
• İmaj kaybı
• Yaralanma veya ölüm
• Arızalanmaya yatkınlık
• Tekrar kullanılamama

• Kazaya yatkınlık
• Yanlış işlem
• Kesintili işlem
• Tamir edilemeyen işlem
• Düşük performans
• Müşteri memnuniyetsizliği
• Fonsiyonun yerine getirilememesi
• Kötü görünüş
• Uyumsuzluk
• Yasalara aykırı durum

3.7.7. Mevcut kontrollerin belirlenmesi

Süreçte mevcut durumda uygulanan kontrol işlemleri, bazı hataların çalışma sırasında ortaya çıkmasını, oluşmuş olan hataların düzeltilmesini ve müşteriye ulaşmadan önce önlenmesini sağlamaktadır. FMEA uygulanacak süreci incelerken kontrol amaçlı uygulanan işlemleri belirlemek gerekmektedir. Bu işlemler üretimde hat kontrolü, ürün üzerinde kalite kontrol işlemleri, yarımamül üzerinde uygulanacak ara kalite kontroller, giriş kalite kontrol işlemleri gibi uygulamalardan oluşur. Kontrol işlemleri yapılırken ya da yapılması gereken işlemler planlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, hatayı henüz oluşmadan yok etmeye yönelik olan önleme işlemlerine ağırlık vermek olacaktır. Böylece hata oluştuktan sonra düzeltme işlemleri ile kaybedilecek zaman, iş gücü ve malzeme kaybı önlenmiş olacaktır. Ayrıca FMEA uygulaması içinde "olasılık" değerinin düşürülmesi de sağlanmış olur. Final kalite kontrole ağırlık vermek, yeniden değerlendirme maliyetlerini arttıracak, verimliliğin de azalmasına neden olacaktır.

Mevcut kontroller bulunurken "Bu hata türü nasıl saptanmaktadır?" ve "Bu hata türü nasıl fark edilmektedir?" sorularına cevap aranmaktadır. Bazı durumlarda bir hata türünü saptamak için mevcut kontrol yöntemi bulunmayabilir. Böyle bir durum da belirtilmelidir [83].

3.7.8. Ortaya çıkma değerinin belirlenmesi

Ortaya çıkma, hatanın oluşma olasılığıdır [93]. Diğer bir deyişle olası hata nedeninin oluşması ve ürünün beklenen ömrü içinde kullanımı sırasında hata türüne yol açmasının ihtimalidir. Bu değere hatanın frekansı da denmektedir [113].

Ortaya çıkma değerini belirlemek için iki farklı yaklaşım vardır [90].

• Birinci yaklaşımda, bir hata türü (veya hata nedeni) için ortaya çıkma değerini belirlemektir.

• İkincisinde ise ortaya çıkma değeri hata nedeni ile onun sonucunda ortaya çıkan hata türünün ilişkilendirilmesi ile bulunur. Neden oluşursa, hata türünün de oluşacağı esas alınır. Bu değer sözü edilen iki olasılık değerinin çarpımından bulunur.

MIL-STD 1629A'da hatalar ortaya çıkma ihtimallerine göre sınıflandırılırken değerlendirme kriterleri aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

A Düzeyi, Ortaya Çıkma Olasılığı Çok Yüksek Olan Hatalar: Birim işleme zaman aralığında hataların ortaya çıkma olasılıkları çok yüksektir. Tek bir hata türü için bu olasılık 0.20'den büyüktür.

B Düzeyi, Ortaya Çıkma Olasılığı Oldukça Yüksek Olan Hatalar: Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları ortadadır. Tek bir hata türü için bu olasılık 0.10 - 0.20 aralığındadır.

C Düzeyi, Ara sıra Gözüken Hatalar: Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları küçüktür. Tek bir hata türü için bu olasılık 0.01 - 0.10 aralığındadır.

D Düzeyi, Oldukça Az Gözüken Hatalar: Birim işleme aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları çok küçüktür. Tek bir hata türü için bu olasılık 0.001 - 0.01 aralığındadır.

E Düzeyi, Son Derece Az Ortaya Çıkan Hatalar: Hataların ortaya çıkma olasılıkları birim işleme zaman aralığında sıfıra yakındır. Tek bir hata türü için bu olasılık 0.001'den küçüktür.

Bu sınıflandırma göz önüne alınarak hatanın ne sıklıkla oluşabileceği düşünülür ve Tablo 3.2'deki 1-10 arası puanlama sistemi kullanılarak bir skala oluşturulur.

Tablo 3.2. Ortaya çıkma derecelendirme tablosu

HATA OLASILIĞI	OLASI HATA ORANLARI	DERECE
Oldukça yüksek: hata neredeyse kaçınılmaz	1/2'den fazla	10
Çok yüksek	1/3	9
Yüksek	1/8	8
Kısmen yüksek	1/20	7
Kısmen orta	1/80	6
Orta	1/400	5
Kısmen düşük	1/2000	4
Düşük	1/15000	3
Çok düşük	1/150000	2
Hemen hemen olanaksız	1/500000'den düşük	1

Olasılık değerlendirme tabloları sektörel olarak değişikiklik gösterebilmektedir. Yukarıda gösterilen 10'luk skala yerine derecelendirmede 5'lik skala da kullanılabilmektedir.

Hata nedeninin ortaya çıkma değerleri istatiksel yöntemlerden ve benzer ürünlerden yararlanarak belirlenmektedir. Her bir hata nedeninin, hata türünün oluşmasındaki katkısı ise varyans analizi, Taguchi teknikleri, Bayes analizi gibi istatiksel yöntemlerle veya benzer ürünlerin verilerinden yararlanılarak belirlenebilmektedir. Somut verilerin olmaması durumunda grup üyelerinin deneyimlerinden faydalanılır ve ortaya çıkma değerlerini kestirmeleri istenir [90]. Sonuç olarak bu aşamanın sonunda her bir hata için kullanılan skalaya göre bir ortaya çıkma değeri saptanması beklenir.

Ortaya çıkma ihtimali değerlendirilmesinde, ekipte birliğin sağlanması için, hep aynı değerlendirme kriterleri kullanılmalıdır. Ürün ömrü boyunca mümkün hata oranı

öngörülen parçanın, alt sistemin veya sistemin ürün ömrü boyunca beklenen hata sayısı esas alınır. Belirlenen ortaya çıkma ihtimali değeri sadece değerlendirme ölçeği ile birlikte değerlendirilebilir ve bu değer ortaya çıkma ihtimali hakkında direkt olarak nümerik bir açıklama vermez [105].

3.7.9. Şiddet değerinin belirlenmesi

Şiddet değeri, potansiyel hatanın diğer bileşene, alt sisteme, sisteme ya da müşteriye olan etkisini belirten değerdir [98]. Hatanın şiddet değeri etkiye karşılık gelir ve aralarında doğrusal bir ilişki vardır. Hatanın etki düzeyi arttıkça şiddet değeri de artar. Şiddet derecesini belirlemek için kullanılan veri kaynakları hata etkisini belirlemede kullanılanlarla aynıdır [99].

Yapılan çalışmanın amacı hata türlerinin doğurabileceği sonuçları, niteliksel bir ölçü ile değerlendirebilmektir. Sonuç olarak her bir hata türü doğurabileceği kayıplara göre sınıflandırılmış olmaktadır. Kayıplar sistemin hasar görmesi, fonksiyonunu yitirmesi, can kaybı, yaralanma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Kayıp miktar ve çeşitleri, hata etkisinin derecesini belirler. Etki derecelerini belirlemek için aynı zamanda sistemin girdi ve çıktılarındaki kayıpları esas alan tanımlar da kullanılabilmektedir [90].

Şiddet değeri belirlenirken takımın tecrübelerinden ve geçmiş kayıtlardan yararlanılmaktadır. Geçmişte oluşmuş ve yeni oluşabilecek benzer hatalar incelenerek karar verilir. Çalışma içinde belirlenen bir hata geçmişte yaşanan hatalarla benzerlik göstermiyorsa takımın tecrübelerine göre değerlendirme yapılır. Birçok durumda bir hata birden fazla etkiye sebep olabilmektedir. Burada önemli olan hatanın değil, hata etkisinin değerlendirilmesidir. Bu nedenle her bir etki ayrı ayrı değerlendirilir ve ona göre şiddet değeri belirlenir [108].

MIL-STD 1629A'da şiddet değeri şu şekilde sınıflandırılmıştır:

1. Sınıf - Felaket Getirici Hata:
- Can kaybına neden olan,
- Birimin fonksiyonel çıktısında ciddi ölçüde azalmaya yol açan,
- Sistem veya ürün düzeyinde etkisi gözlenen hatalar.

2. Sınıf - Kritik Hata:
- Çalışanların yaralanmasına neden olan,

• Birimin fonksiyonel çıktısında ciddi ölçüde azalmaya neden olacak şekilde sistem hasarına yol açan,
• Bakım görevlileri tarafından tamir edilemeyen hatalar.

3. Sınıf - Küçük Hata:
• Birimin fonksiyonel çıktısında küçük etkilere, çalışanlarda küçük yaralanmalara neden olan,
• Sistemde küçük hasara yol açan,
• Duruşlara veya çıktıda çok az azalmaya yol açacak hatalar.

4. Sınıf - Çok Küçük Hata:
• Çalışanların yaralanmasına, sistemin bozulmasına yol açacak kadar ciddi olmayan, planlanmamış bakım veya tamirle giderilebilecek hatalar.
Bu sınıflandırma göz önüne alınarak hata etkisi veya etkileri değerlendirilir ve Tablo 3.3'deki gibi 1-10 arası puanlama sistemi kullanılarak bir skala oluşturulur.

Tablo 3.3. Şiddet derecelendirme tablosu

SINIF	ETKİ	KRİTER	DERECE
1.sınıf	Tehlikeli	Emniyetle ilgili arıza, yasalarla uyumsuz bir arıza. Hata herhangi bir ikaz olmadan meydana gelir.	10
	Ciddi	Emniyetle ilgili arıza, yasalarla uyumsuz bir arıza. Hata bir ikazla meydana gelir.	9
	Çok büyük	Üründe temel fonksiyonların kaybı. Ürünün tamamı hurdaya çıkar.	8
2.sınıf	Büyük	Ürün/süreç üzerinde büyük etki. Ürün kullanılamaz. Üretimin ayıklanması ve bir bölümünün (%100'den az) hurdaya ayrılması gerekir.	7
	Önemli	Parçanın yeniden işlenmesine neden olur. Ürün performansının derecesi düşmüştür. Ürün çalışmaktadır fakat kolaylık/rahatlık sağlayan bazı parçalar çalışmaz.	6

Tablo 3.3. (Devam) Şiddet derecelendirme tablosu

SINIF	ETKİ	KRİTER	DERECE
3.sınıf	Orta	Ürün performansı veya süreç üzerinde orta şiddette etki. Müşteri bazı rahatsızlıklar duyar. Kolaylık/rahatlık sağlayan bazı parçalar düşük performansla çalışırlar.	5
	Küçük	Ürün performansı veya proses üzerinde küçük şiddette etki. Hata müşteri tarafından fark edilir ve ürün kullanımında bazı rahatsızlıklar yaşanır.	4
4.sınıf	Önemsiz	Ürün performansı veya proses üzerinde önemsiz etki. Hata müşteriler tarafından fark edilir.	3
	Çok önemsiz	Ürün performansı veya proses üzerinde çok önemsiz etki. Hata müşteriler tarafından fark edilmez.	2
	Etkisi yok	Ürün performansı veya proses üzerinde hiç etkisi yok.	1

Yukarıda bir örneği verilen tablo sektörel olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bazen derecelendirmede 1 - 10 skalası yerine 1 - 5 skalası veya başka skalalar da kullanılmaktadır. Bu aşamanın sonunda her bir hata türü etkisine göre bir şiddet değeri ile eşleştirilmiş olur.

3.7.10. Saptama değerinin belirlenmesi

Saptama değeri, işletmenin uyguladığı kontrol işlemlerine bağlı olarak hatayı yakalayarak müşteriye ulaşmasını engelleme yeteneğidir. Olası hata türünün, bir sonraki aşamada veya son müşterinin kullanımı esnasında ortaya çıkacağı varsayıldığından, öngörülen saptama önlemlerinden geçmiş olması gerekir. Bu nedenle, saptama ile ilgili olasılık değeri, ortaya çıktığı varsayılan hata nedeninin ya da şeklinin müşteriye ulaşabilme olasılığı olarak tanımlanır [99]. Bir başka deyişle kontrol yöntemlerinin uygunluk ve etkinlik açısından değerlendirilmesidir. Keşfedilebilirlik yeterince sağlanabiliyorsa bile fazla miktarda kontrol etmenin maliyet ve zaman açısından yük getirdiği düşüldüğünde hatanın ortaya çıkma olasılığını azaltıcı çalışmalar yaparak, kontrol sayısını azaltmak en etkin yoldur [96]. Kontrollerin listelenip etkinliğinin değerlendirilmesi de gerekmektedir.

Hataların saptanmasında, hata türlerinin veya sebeplerinin ortaya çıkacağı ve hatalı parça veya ürünlerin bir sonraki birime iletilmesi veya sevk edilmesinin ancak hata keşfedici önlemlerle azaltılabileceği varsayılır [105].

Saptama değeri,

• Analiz edilen birimlerin benzerlerinden,

• Geçmiş dönem verilerinden,

• Ürün iç denetlemelerinden,

• Somut veri olmayan durumlarda grup üyelerinin deneyimlerinden yararlanılarak bulunur.

Burada hata, sanki oluşmuş gibi varsayılmakta ve mevcut kontrol olanaklarıyla hata türüne sahip olan parçanın sevkini önleme olanağı derecelendirilmektedir. Tablo 3.4'de gösterildiği gibi 1 - 10 arası puanlama sistemi ile hatanın tespit edilme derecesi belirtilir.

Tablo 3.4. Tespit edilebilirlik tablosu

TESPİT ETME	**KRİTER**	**DERECE**
Hemen hemen imkânsız	Tespit etme imkânı yok	10
Çok zor	Kontrollerin hata türünü belirlemesi çok zor.	9
Zor	Kontrollerin hata türünü belirlemesi zor.	8
Çok Az	Kontrollerin hata türünü belirlemesi çok azdır.	7
Az	Kontrollerin hata türünü belirlemesi azdır.	6
Orta	Kontrollerin hata türünü belirlemesi ortadır.	5
Ortanın üstü	Kontrollerin hata türünü belirlemesi ortanın üstündedir.	4
Yüksek	Kontrollerin hata türünü belirlemesi yüksektir.	3

Tablo 3.4. (Devam) Tespit edilebilirlik tablosu

TESPİT ETME	KRİTER	DERECE
Çok yüksek	Kontrollerin hata türünü belirlemesi çok yüksektir.	2
Hemen hemen kesin	Kontrollerin hata türünü belirlemesi hemen hemen kesindir.	1

Yukarıda bir örneği verilen tablo sektörel olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bazen derecelendirmede 1 - 10 skalası yerine 1 - 5 skalası veya başka skalalar da kullanılmaktadır. Bu aşama sonunda her bir hata türünün saptanabilirlik derecesi belirlenmiş olur.

3.7.11. Risk öncelik sayısının hesaplanması ve değerlendirilmesi

Risk Öncelik Sayısı, belirlenen ortaya çıkma, şiddet ve saptama değerleri kullanılarak elde edilen bir değerdir. Bu değer, iyileştirme faaliyetlerinin başlangıcında sistem ya da servis kullanıcılarına hata seçme konusunda bir kriter oluşturur [109]. Risk öncelik sayısı en yüksek olandan en düşük olana kadar FMEA çalışması boyunca belirlenen tüm potansiyel hatalar sıraya konur.

Risk Öncelik Sayısı (RÖS) = Ortaya Çıkma (O) × Şiddet (S) × Saptama (D)

Sıralanmış hatalar içinde bir öncekinden daha yüksek RÖS değerine sahip hata türleri, en fazla risk teşkil eden ve dolayısı ile daha öncelikli iyilestirme faaliyeti gerektiren hataları ifade eder [113]. Bu nedenle en yüksek RÖS değeri olan hata türünden başlanarak sırası ile diğer hata türleri için tek tek iyileştirme adımları uygulanır. Burada önemli olan RÖS değeri için bir eşik değeri belirlemektir.

RÖS değeri, FMEA takımı tarafından belirlenecek olan bu eşik değerinin üstünde kalan hata türlerinin hepsi için iyileştirme adımları uygulanırken, eşik değerinin altında kalan hata türleri için bir aksiyon alınmaz. Bu hata türlerinin izleme altında tutulması, risk oluşturma durumlarının yükselmesi ihtimaline karşı faydalı bir adım olacaktır. Takım eşik değerini belirlerken şu kriterleri kullanabilir [100]:

• Firmanın ve ürünün pazardaki yeri ve konumu

• Ürünün kullanım yerinin kritikliği
• Problemlerin giderilme kolaylığı ve zorunluluğu
• Ürünün fiyat ve rekabet seviyesi

Risk öncelik sayısı için bir eşik değeri belirlenmesinin yanı sıra RÖS değerleri ile pareto diagramı çizilerek de değerlendirme yapılabilir. 80/20 kuralı ile hangi potansiyel hatalar için iyileştirme uygulanacağı kararlaştırılabilir. Daha açık bir ifade ile toplam RÖS değerlerinin %80'i, geri kalan %20'den kaynaklanmaktadır. Bu %20'lik kısımda yer alan potansiyel hatalar öncelikle iyileştirme uygulanarak RÖS değeri düşürülmesi gereken kısmı oluşturmaktadır [108].

Uygulamalarda RÖS ile ilgili rastlanan durumlardan biri de farklı hataların aynı RÖS değerine sahip olması durumudur. Aynı RÖS değerine sahip iki veya daha fazla hata varsa, öncelikle şiddeti ve sonra da saptama değeri yüksek olan hata ele alınmalıdır. Şiddeti yüksek olan hata önceliklidir, çünkü bu değer hatanın etkisini göstermektedir. Saptama, ortaya çıkma değerinden daha önemlidir çünkü burada söz konusu olan hatanın müşteriye ulaşması durumunun söz konusu olmasıdır. Müşteriye ulaşan hatalara, sık ulaşan hatalardan daha öncelikli olarak yaklaşılmalıdır [90].

3.7.12. Alınacak önlemlerin belirlenmesi ve uygulanması

Düzeltici faaliyetler, RÖS değeri daha önceden belirlenmiş olan eşik değerini aşan hatalar için uygulanır. Bu iyileştirme çalışmaları ile RÖS değerleri aşağıya çekilmeye çalışılır. Ortaya çıkma, saptama ve şiddet değerleri küçültülerek RÖS değeri asağıya çekilmiş olur. Tüm bu bileşenlerin değerlerlerinin azaltılmasında şu noktalara dikkat edilmelidir [111]:

Şiddet Değerinin Azaltılması: Sadece tasarım ya da üretim süreci revizyonu ile mümkün olabilir. Ürün ya da üretim süreci değişikliği, şiddet değerinin azalmasına neden olacak anlamına gelmez. Herhangi bir değişiklikte takım bu deeğişikliği yeniden gözden geçirmeli ve ürün ya da proses üzerine nasıl bir etkide bulanacağını değerlendirmelidir. Burada en iyi yöntem değişikliklerin süreç geliştirmeden önce uygulanmasıdır [85].

Saptama Değerinin Azaltılması: Zaman aralıkları belirli kontroller ile veriler toplanır, baskın hatalar belirlenir ve bunlara göre kalıcı önlemler alınır. Kontrol yöntemleri değiştirilebilir ya da iyileştirilebilir.

Saptama faktörü için belirlenen dereceyi küçültmek için şunlar yapılabilir [90]:
• Kontrol sıklıkları arttırılır,
• Kontrol yönteminin güvenilirliği artırılır,
• Uygun olmayan parçaların bir sonraki müşteriye ulaşmasını önleyecek fiziksel olanaklar sağlanır.

Kontrol sıklılığını arttırmak kalıcı bir çözüm değildir. Bazı durumlarda tasarım ya da proses değişiklğine gidilebilir [85].

Ortaya Çıkma Değerinin Azaltılması: Ortaya çıkma hata nedenleriyle ilgilidir, hata nedenleri üzerinde uygulanacak herhangi bir kontrol ya da yok etme yöntemi ortaya çıkma değerini azaltacaktır. Bu durum tasarım ya da proses revizyonu ile sağlanabilir [85].

Ortaya çıkma derecesini küçültecek önlemler [90]:
• Planlar, şartnameler,
• Üretim yöntemleri, üretim akış yöntemleri,
• Organizasyon,
• Tasarımlar,
• Çevre ve koruma koşullarında değişiklikler yapmak sayılabilir.

RÖS değerini düşürmede hangi faktörün değerinin düşürüleceği faktörün aldığı değer ve yapılacak iyileştirmenin maliyeti düşünülerek seçilir. İyileştirme adımları tasarım değişikliği, deney tasarımı, toleransların değiştirilmesi, test yöntemlerinin iyileştirilmesi, test faaliyet planı, süreç akış diyagramları, yerleşim planı, iş planı ya da bakım planlarının iyileştirilmesi, ekipman, donanım ve makine spesifikasyonlarının gözden geçirilmesi ile sağlanabilir [96]. İyileştirme adımları FMEA takımı tarafından uygulanabileceği gibi her konu ile ilgili görev verilen kişi veya farklı gruplarca da ele alınabilir. Belirli bir termin çerçevesinde çalışmaların tamamlanması istenir. Uygulanmaların takibi ve değerlendirilmelerinin takım tarafından yapılması daha uygun olur [100]. Sonuçlar raporlanarak üst yönetime sunulur.

3.7.13. Yeni RÖS değerinin hesaplanması

Belirlenen önemlerin uygulanmasından sonra FMEA başında belirlenen potansiyel hatalar için yeni bir RÖS değeri hesaplanır. Aynı hatalar için yeni değerin, öncekinin ne kadar altında olduğu belirlenir. Yeni değer istenilen seviyeye inmiş ise uygulanan önemler başarı ile sonuçlanmış demektir. İstenilen seviye için belirli bir limit yoktur. Bu tamamen takımın kararına bağlıdır. Eğer önemler sonucu istenilen değere ulaşılamadıysa ortaya çıkma, şiddet ve saptama adımları tekrar gözden geçirilmeli, yeni önemler kararlaştırılmalıdır. Gerekli ise yeni bir FMEA uygulaması başlatılmalıdır [84].

4. BULANIK MANTIK

4.1. Bulanık Mantık Kavramı ve Tanımı

Geçmişte karşılaşılan birçok belirsizlik ve bilinmeyen, olasılık teorisi yardımı ile çözülmüştür. Matematik, istatistik, fizik ve mühendislikte ise bu belirsizlik istatistiksel yöntemlerle çözülmektedir. Bu sebeple günlük hayatta karşılaşılan bütün belirsizliklerin rastgele karakterde olduğu düşünülmektedir. Rastgele karakterde olan olaylar genelde şans faktörüne endeksli olarak yorumlanmaktadır. Ancak karşılaşılan belirsizliklerin hepsi rastgele karakterde olmamaktadır. Rastgele karakterde olmayan bu tip sözel belirsizliklerin incelenip çözümlenmesi, istatistik veya olasılık teorisi gibi yöntemler kullanılarak yapılamamaktadır [114].

İnsanoğlu, günlük hayatını sürdürürken karşılaştığı sorunlara geçmişte edindiği kişisel değer yargıları doğrultusundaki bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak çözümler üretmektedir. Bu sorunların bir kısmı tamamen belirli olduğu ve kolayca tanımlanabildiği için çözümlenmesi de kolay olmaktadır. Bunun yanı sıra, belirsizlikler içeren veya tam olarak tanımlanamayan sorunların çözümü ise, nispeten zor olmakta ve görelilik arz etmektedir. Belirsizliğin bu önemli rolünün anlaşılması, klâsik anlayıştan, belirsizliği temel alan modern anlayışa geçişi sağlayan dönüşümü başlatmıştır. Bu anlayış, literatüre ilk girdiği anda, deterministik anlayıştaki klâsik görüşe ters düşmesinden dolayı sıcak karşılanmamıştır. Bu alandaki gelişme sürecinde, olasılık teorisinden farklı olarak, belirsizlikle ilgili birçok teorinin ortaya çıktığı görülmüştür [115].

Belirsizliği tanımlama ve modellemenin önemini ünlü fizikçi Einstein şu şekilde ifade etmiştir: “Matematiğin kavramları kesin oldukları sürece gerçeği yansıtmaz, gerçeği yansıttıkları sürece de kesin değildir.” 1930’larda ünlü filozof Max Black belirsizliği açıklayıcı öncü kavramlar geliştirmiş olsa bile, bugün Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında “Information and Control” dergisinde yayınlanan “Bulanık Kümeler” adlı makale, modern anlamda belirsizlik kavramının değerlendirilmesinde önemli bir nokta olarak kabul edilmektedir [116].

Bu makalede bulanık kümelerin tanımı, temel işlemleri, kavramları ve özellikleri verilmiştir. Zadeh, gerçek hayat sorunları ne kadar yakından incelenmeye alınırsa, çözümün daha da bulanık hale geleceğini ifade etmiştir. Yani bir sistemdeki karmaşıklık arttıkça, sistemi tanımlayan ifadelerin anlamı azalmakta ve anlamlı ifadeler de belirsizliğe doğru gitmektedir. Çünkü insan, bilgi kaynaklarının tümünü aynı anda ve etkileşimli olarak kavrayamamakta ve bunlardan kesin sonuçlar çıkaramamaktadır. Burada bilgi kaynaklarının temel ve kesin bilgilere ilave olarak, özellikle, sözel olan bilgileri de içerdiği vurgulanmalıdır. Genellikle insan sözel düşünebildiği ve bildiklerini başkalarına sözel ifadelerle aktarabildiği için bu ifadelerin kesin olması beklenemez [117].

Bulanık mantık, klasik ikili mantığın tamamen doğru ve tamamen yanlış doğruluk değerleri arasında yer alan "kısmen doğru" kavramını da kapsayacak şekilde genişletilmesi sonucunda ulaşılan bir üst kümedir. Çok net olmayan mantığa dayalı önermelerin, mantık süzgecinden geçirilerek incelenmesinin yapıldığı bir yöntem olarak da tanımlanabilmektedir [118].

Bulanık mantığın bir başka tanımı her olayın farklı bir doğruluk derecesine sahip olduğu bir küme üyeliğidir. Burada birbiriyle ilişkili olayların oluşturduğu kümelerden bahsedilmektir. Örnek olarak uzunluk kavramı oluşturan bir küme (çok uzun, uzun, orta, kısa, çok kısa) şeklinde verilebilmektedir [119].

Bir mantık sisteminin temel amacı, verilen önermelerden yeni önermeler elde etmek ve bu önermelerin doğruluk değerlerini belirlemektir. Bulanık mantığın temel amacı da, insanların tam ve kesin olmayan bilgiler ışığında, tutarlı ve doğru kararlar vermelerini sağlayan, düşünme ve karar verme mekanizmalarını modellemektir. Kesin olmayan bilginin üstesinden gelmek için güçlü bir araç olan bulanık mantık, bilimsel terminolojide ve teknolojide “Fuzzy Logic” kelimelerinin karşılığı olarak kullanılmakta olup temelleri Aristo mantığına dayanan klâsik mantık sistemine karşı geliştirilen belirsizlik altında akıl yürütme ile çok değerli mantığın birleştirildiği mantıksal bir sistemdir [120]. Bulanık mantık olayların oluşum olasılığından çok oluşum derecesiyle ilgilenmektedir. Bundan dolayı bazı bilim adamları bulanık mantığı olasılığın devamı olarak düşünmüşlerdir. Fakat ikisi de oldukça farklı

kavramlardır. Olasılık bir şeyin olup olamayacağını ölçerken, bulanıklık ise bir olayın ne dereceye kadar olduğunu ölçmektedir [121].

Klâsik mantık (iki değerli mantık) ile çok değerli mantığın birbirinden ayrıldığı tek nokta, oluşturulan önermelere atanan doğruluk değerlerinin sayısıdır. Oluşturulan önermelerin klâsik mantıkta sadece 1 ve 0 ile eşleştirilebilen doğruluk değerleri, çok değerli mantıkta genişletilmiştir. Sonuç olarak, klâsik mantığın oluşturulan bazı önermelerin doğruluk değerlerinin belirlenmesindeki yetersizliği ile "çok, oldukça, hemen hemen" gibi belirsizlik içeren kavramların insan düşünce biçimine yaklaşabilmek için kullanılma gerekliliği, bulanık mantığın gelişmesine yol açmıştır [122]. Böylece, belirsiz kavramlar içeren insan bilgisini açıklamak kolaylaşmış ve gerçek hayattaki problemlere daha etkin çözümler getirilebilmiştir.

Bulanık mantık yaklaşımının Zadeh'e göre genel özellikleri aşağıdaki şekildedir [123]:
1. Bulanık mantıkta kesin nedenlere dayalı düşünme yerine yaklaşık değerlere dayanan düşünme kullanılır.
2. Bulanık mantıkta her şey [0, 1] aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
3. Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok, az gibi sözel ifadeler şeklindedir.
4. Bulanık çıkarım işlemi sözel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
5. Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
6. Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur.

Bulanık mantık, ortaya atıldığı tarihten bu yana, başta yöneylem araştırması, yönetim bilimi, kontrol teorisi, yapay zekâ/akıllı sistemler, insan davranışları olmak üzere pek çok uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde yıkanacak çamaşırı değerlendirip gerekli olan deterjanı, su sıcaklığını ve yıkama şeklini ayarlayan çamaşır makineleri; elin titremesini çekilen nesnenin hareketinden ayıran ve mercekleri otomatik olarak ayarlayıp net görüntü üreten video kameralar ve kontrastı, parlaklığı, rengi ve netliği otomatik olarak ayarlayan televizyonlar piyasaya hâkim olmuştur. Günlük hayatta her noktada karşılaşılan bulanık mantık uygulamaları, ona olan ticari ve akademik ilgiyi daha da arttırmaktadır [120].

4.2. Bulanık Mantığın Tarihsel Gelişimi

Çok değerli mantığın tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Heraklitus ve Anaksimender gibi eski Yunan Filozofları, iki değerli mantığın kurucusu olan Aristo'dan 200 yıl evvel çok durumlu mantıksal sistemler geliştirmişlerdi [124].

1920'li yıllarda Polonya'lı mantıkçı Jan Lukasiewicz, önermelerin sadece bir veya sıfır doğruluk değeri alabildiği klasik mantıktan farklı olarak, önermelerin bir ve sıfır arasında da kesirli doğruluk değeri alabildiği "çok değerli" mantık ilkelerini oluşturmuştur. 1937'de ise kuantum felsefecisi Max Black yayımlanan bir makalesinde liste ya da nesnelerden oluşan kümelere "çok değerli mantığı" uygulayarak ilk bulanık küme eğrilerini çizmiştir [124].

"Fuzzy Logic – Bulanık Mantık" kuramı ilk kez, 1965 yılında Azerbaycan'lı bilim adamı Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından yazılan makaleyle ortaya atılmıştır [125]. 1973'te ise bulanık küme değişkenleri olarak tanımladığı dilbilimsel değişkenleri, detaylı olarak anlattığı bir makale daha yayınlamıştır [126].

Bulanık mantığın ilk uygulaması 1974 yılında, Londra'da Queen Mary College'da profesör olan Ebrahim H. Mamdani tarafından bir buhar makinasının sabit hız ve basınç kontrolünü sağlamak amacıyla yapılmıştır [127]. Ticari olarak ise, ilk defa 1975 yılında Danimarka'daki bir çimento fabrikasının fırınını kontrol etmede kullanılmıştır. Bulanık mantık ile hazırlanan bir sistem, bilgisayar desteğinde, sensörlerden ısı ve maddelere ait bilgileri alarak ve "feed-back" (geri besleme) metoduyla değişkenleri kontrol ederek, bu ayarlama işini çok hassas ölçümlerle gerçekleştirmiş ve büyük oranda enerji tasarrufu sağlamıştır. Bulanık mantık konusundaki çalışmaları teşvik eden diğer bir çalışma da 1985 yılında Sendai metrosuna uygulanmış ve 1987 yılında kullanıma başlanmıştır [128]. Bu sayede metronun daha az enerji harcayarak daha iyi şekilde yol alması sağlanmıştır. Daha sonra Takeshi Yamakawa isimli bilim adamı ters sarkaç şeklindeki cismin, ileri geri hareket eden bir araç üzerinde sabit durabilmesi problemine bulanık kontrol uygulamış ve bulanık kontrole yeni bir bakış açısı kazandırmıştır [129].

1987'de, Uluslararası Bulanık Sistemler Derneği'nin Tokyo'da düzenlediği bir konferansta bir mühendis, bulanık mantıkla programladığı bir robota, bir çiçeği ince

bir çubuğun üzerinde düşmeyecek şekilde bıraktırmayı başarmıştır. Bundan daha fazla ilgi çeken gerçek ise, robotun bunu yaptığını gören bir seyircinin mühendise, sistemden bir devreyi çıkarmasını teklif etmesinden sonra görülmüştür. Mühendis önce, devreyi çıkarırsam çiçek düşer diye bunu kabul etmemiş, fakat seyircinin çiçeğin ne tarafa doğru düştüğünü görmek istediğini söylemesi üzerine devreyi çıkarmıştır ve robot beklenmedik bir şekilde yine aynı hassaslıkla çiçeği düşürmeden çubuğun üzerine bırakmıştır. Kısacası bulanık mantık sistemleri, yetersiz bilgi temin edilse bile tıpkı insanların yaptığı gibi bir tür "sağduyu" kullanarak (yani mevcut bilgiler yardımıyla neticeye götürücü akıl yürütmeler yaparak) işlemleri gerçekleştirebilmektedir.

Bu kadar başarılı uygulamanın ardından bulanık mantığa olan ilgi artmış, uluslararası bir çalışma platformu oluşturabilmek amacıyla 1989 yılında aralarında SGS-Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsushita gibi dev firmalarında içinde bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur.

Bulanık mantığın havacılık alanındaki ilk çalışmasını ise 1984 yılında Lawrance İ. Larkin isimli bilim adamı gerçekleştirmiştir [130]. Yaptığı çalışmanın amacı bir pilotun uçağı kontrol stratejisini bir takım kurallar yardımıyla modellemekti. Elevator açısı ve motor hızı komutlarını, iniş açısı ve hava hızındaki değişimlerin bir fonksiyonu olarak bulanık kurallar yardımıyla formüle etti ve böylece ilk bulanık kontrolör tasarlandı.

Larkin'den sonra 1993 yılında aynı konuda daha gelişmiş bir sistem tasarlayan Steinberg, F/A-18 Hornet askeri uçağının güvenli bir iniş gerçekleştirmesi için uçağın her 3 eksendeki hareketlerini göz önünde bulundurdu. Tasarladığı sistemi simüle ederek başarılı oldu [131].

2003 yılında insansız hava araçları, 2004 yılında ise bulanık kontrolün insansız hava araçlarının uçuş problemine uygulanması üzerine çalışmalar bulunmaktadır [132]. Mevcut çalışmalar insansız hava araçlarının tasarımında bulanık mantığın vazgeçilmez olduğunu göstermektedir.

Bulanık mantık kullanılarak üretilen fotoğraf makineleri, otomatik odaklama yapanlardan bile daha net bir görüntü vermektedir. Fotokopi makineleri ise bulanık mantıkla çok daha kaliteli kopyalar çıkarmaktadırlar. Zira odanın sıcaklığı, nemi ve orijinal kâğıttaki karakter yoğunluğuna göre değişen resim kalitesi, bu üç temel unsur hesaplanarak mükemmele yakın hale getirilmektedir [133].

Kameralardaki bulanık mantık devreleri ise sarsıntılardan doğan görüntü bozukluklarını asgariye indirmektedir. Bilindiği gibi elde taşınan kameralar, ne kadar dikkat edilirse edilsin net bir görüntü vermemektedir. Bulanık mantık programları bu görüntüleri netleştirmek için şöyle bir metot kullanır: Eğer görüntüdeki bütün şekiller, aynı anda, bir tarafa doğru kayıyorsa bu, insan hatasından kaynaklanan bir durumdur; kayma göz önüne alınmadan kayıt yapılır. Bunun dışındaki şekiller ve hareketler ise normal çekim durumunda gerçekleştiği için müdahale edilmez.

Birkaç bulanık mantık sistemi ise, mekanik cihazlardan çok daha verimli bir şekilde bilgi değerlendirmesi yapmaktadır. Japon Omron Grubu, büyük firmalara sağlık hizmeti veren bir sisteme ait beş tıp veri tabanını, bulanık mantık teorileri ile kontrol etmektedir. Bu bulanık sistem, 10.000 kadar hastanın sağlık durumlarını öğrenmek ve hastalıklardan korunmalarına, sağlıklı kalmalarına ve stresten kurtulmalarına yardımcı olmak üzere kişiye özel planlar çizebilen yaklaşık 500 kural kullanmaktadır. Pilav pişirme aletlerinden asansörlere, arabaların motor ve süspansiyon sistemlerinden nükleer reaktörlerdeki soğutma ünitelerine, klimalardan elektrikli süpürgelere kadar bulanık mantığın uygulandıgı birçok alan bulunmaktadır. Bulanık mantık by alanlarda sağladığı enerji, iş gücü ve zaman tasarrufu ile "iktisat" açısından da önem kazanmaktadır [124].

Bulanık mantığın gelecekteki uygulama sahaları, daha da genişleyecek gibi gözükmektedir. Şeker hastaları için vücuttaki insülin miktarını ayarlayarak yapay pankreas görevi yapan minik yapıların üretiminde, prematüre doğumlarda bebeğin ihtiyaç duyduğu ortamı devam ettiren sistemlerin hazırlanmasında, suların klorlanmasında, kalp pillerinin üretiminde, oda içindeki ışığın miktarının ayarlanmasında ve bilgisayar sistemlerinin soğutulmasında bulanık mantık gelecek vaadetmektedir.

4.3. Bulanık Küme Teorisi

Matematik ve mantık kavramlarının esaslarını teşkil eden kümeler insan düşüncesinin en temel öğelerini meydana getirmektedir. Düşünce sisteminde mantığın ve matematiğin kullanılmasıyla küme kavramı gündeme gelmektedir. Küme kavramı klasik kümeler ve bulanık kümeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık mantığın temelini oluşturan bulanık küme teorisi, esas olarak, insan düşünce ve algılarındaki belirsizlikle ve bu belirsizliğin sayısallaştırılması ile ilgilenmektedir. Başka bir ifade ile tam ve kesin olmayan bilgiler ışığında, insanların tutarlı ve doğru karar vermelerini sağlayan düşünme ve karar verme mekanizmalarının modellenmesi ile ilgilenmektedir [134].

Klasik kümeler üye olma ve üye olmama ilişkisi çerçevesinde geliştirilmişlerdir. Bu yaklaşıma göre istediğimiz özelliğe sahip olan bir birey, eleman veya çalışma alanı içerisindeki ölçümler, tanımlanmış olan bir kümeye ya aittir ya da değildir. Bu tür kümeleri ifade etmekte ise karakteristik fonksiyonlardan yararlanılmaktadır. Karakteristik fonksiyon her bir elemana 1 ve 0 değerlerinden birini üyelik durumuna göre atayarak evrensel küme üzerinde tanımlanan ve bizim ilgilendiğimiz özelliğe sahip elemanların oluşturduğu kümeyi belirlemektedir. Klasik küme kavramında, bir X kümesindeki A alt kümesi kendisine ait karakteristik fonksiyon olan X_A ile ifade edilmektedir. Buradaki karakteristik fonksiyon X'in elemanlarını {0,1} kümesine dönüştürmektedir. Denklem (4.1) klasik bir A kümesinin karakteristiğini ifade etmektedir [135]:

$$X_A : X \to \{0,1\} \qquad \forall x \in X, X_A(x) = \begin{cases} 1, x \in A \\ 0, x \notin A \end{cases} \tag{4.1}$$

Fonksiyonda görüldüğü üzere A kümesine ait elemanlar 1 değerini alırken, ait olmayan elemanlar ise 0 değerini almaktadır. Klasik kümelerde bir eleman birden fazla kümeye ait olabilmekte ve ait olduğu kümelere de aynı üyelik derecesi ile yani üyelik derecesi 1 ile bağlı olabilmektedir. Örneğin 30 °C ve üzerinin sıcak olduğu kabul edilirse, 29,5 °C bu kümeye dâhil edilememektedir. Burada 1 değerini alan elemanlar, oluşturulan kümeyi belirlemekte ve klasik kümelerde bir eleman için üyelikten üye olmamaya geçişin çok kesin olduğu görülmektedir [135]. Oysa gerçek hayatta her kümenin sınırları ve bu kümelere ait üyelik derecelerindeki geçiş bu kadar kesin olmamaktadır.

Buradan yola çıkılarak klasik küme anlayışının gerçek hayatta karşılaşılan bazı durumlarda yetersiz olduğu görülebilmektedir.

Klasik küme teorisine karşın, bulanık küme teorisi ise bize gerçek hayatta belirsizliklerin ölçülmesinde güçlü ve anlamlı araçlar sunmakta ve doğal dildeki belirsiz kavramların anlamlı bir şekilde ifade edilmesini sağlamaktadır [136].

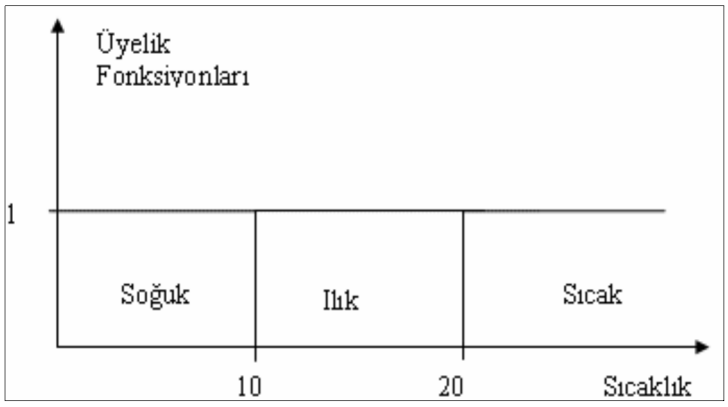
Bulanık küme teorisinde, bulanık kümeleri içeren bir evrensel küme içerisindeki elemanların üyelik geçişi dereceli olmaktadır. Eğer bir eleman herhangi bir kümeye ait olacaksa, o elemanın o kümeye ait olma derecesi de söz konusu olmaktadır. Bu derecelendirme bulanık kümelerin sınırlarına belirsizlik özelliğini katmaktadır. Bu sebeple bir elemanın bu kümeye aitliği, belirsizliğini ölçmeye yarayan bir fonksiyonla tanımlanabilmektedir. Söz konusu fonksiyon evrensel kümenin elemanlarını belirli bir aralıktaki reel sayılara karşılık getirerek elemanlar arasındaki derecelendirmeyi gerçekleştirmektedir. Küme içerisinde değişkenlerin aldığı yüksek değerler de üyelik derecesinin yüksekliğini göstermektedir. Buradaki fonksiyon üyelik fonksiyonu ve bu fonksiyonun oluşturduğu küme de "Bulanık Küme" olarak ifade edilebilmektedir. Denklem (4.2) bulanık bir A kümesini ifade etmektedir [137]:

$$\forall x \in X \text{ için} \quad \mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \tag{4.2}$$

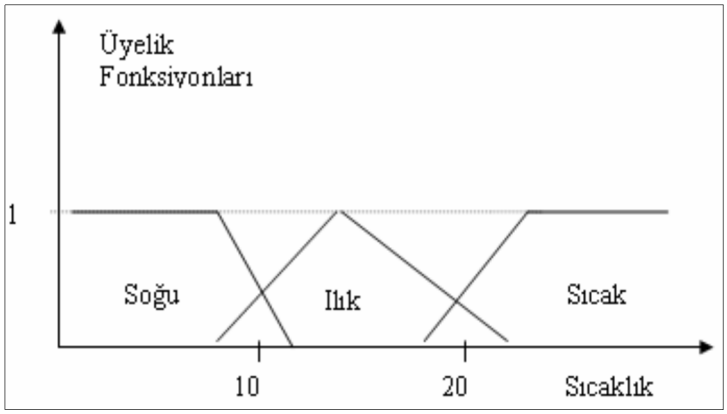
Burada $\mu_A(x)$'e, bulanık kümeye karşılık gelen üyelik fonksiyonu adı verilmektedir. $\mu_A(x)$; A'nın elemanlarının istenilen özelliği hangi ölçüde sağladığını ifade etmektedir.

Bulanık küme teorisinde bir eleman bir kümeye 0 ve 1 dâhil olmak üzere, 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleri ile ait olabilmektedir. Başka bir deyişle bulanık kümelerde bir bulanık küme elemanı bir kümeye biraz aittir veya biraz değildir denilebilmektedir. Bununla beraber bir bulanık küme elemanı aynı veya faklı üyelik dereceleri ile aynı anda iki kümeye de ait olabilmektedir. Klasik küme anlayışında olduğu gibi ya hep ya hiç anlayışı bulanık kümelerde geçerli olmamaktadır. Bulanık mantıkta kümenin sınırları ve elemanlarının sıfatları kesin olmadığından, bulanık küme anlayışının gerçek hayatın ruhuna daha yakın olduğu söylenebilmektedir [137].

Bulanık kümeler daha önce de ifade edildiği gibi doğal dildeki belirsiz ve bulanık kavramları temsil etmeyi ve onları matematiksel olarak ifade etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu temsil işlemi sadece kavramın kendisine değil aynı zamanda kavramın kullanıldığı alana da bağlı olmaktadır. Bulanık küme teorisine göre bir küme elemanının o kümenin elemanı olduğunun bilinmesi, o elemanın tanımlanması için yeterli olmamaktadır. Söz konusu elemanın hangi üyelik derecesi ile ilgili kümeye ait olduğunun da bilinmesi gerekmektedir. Bu durumu bir örnek ile açıklamak gerekirse, bir yerleşim yeri için 10 derecenin altı soğuk, 10-20 aralığı ılık ve 20 derecenin üzeri sıcak olarak sınıflandırılırsın. Sınıflandırma klasik küme yaklaşımı ile yapıldığında üyelik fonksiyonu Şekil 4.1'deki gibi olmaktadır. Bu şekil incelendiğinde sıcaklık kümeleri arasındaki kesin geçişler fark edilmektedir. Örneğin 10 derece ılık kabul edilirken 9 derece soğuk kabul edilmektedir. Sınıflandırmanın Şekil 4.2'de olduğu gibi bulanık küme mantığı ile yapılması halinde ise 9 derece hem soğuk hem de ılık kabul edilebilmektedir.



Şekil 4.1. Klasik Küme Üyelik Fonksiyonu



Şekil 4.2. Bulanık Küme Üyelik Fonksiyonu

Böylece değerlerin bir bulanık kümeye aitlik ölçüsünü gösteren "üyelik dereceleri" her zaman her yerde aynı olamayabilmektedir. Buradan da açıkça görülmektedir ki bulanık kümelerin kullanışlılığı büyük oranda farklı kavramlara uygun üyelik derecesinin oluşturulabilmesine bağlı olmaktadır [135].

Günlük yaşamda kullanılan düşük, orta seviye, yüksek, sıcak, çok sıcak ve bunun gibi kavramları temsil eden çeşitli bulanık kümeler bir değişkenin durumlarını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu değişkenlere bulanık değişkenler ve bu değişkenlerin alt durumlarına da bulanık terimler denilmektedir. Bulanık kümeye ait olacak bulanık değişkenler, belirsizlikleri deneysel verilerin bir parçası olarak ele aldıklarından gerçeğe daha uygundurlar ve bilgiler hakkında klasik değişkenlere dayanan bilgilerden daha doğru bilgiler verebilmektedirler [137].

4.4. Bulanık Kümelerin Temel Özellikleri

Bulanık kümelerin temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

Yükseklik: Bulanık bir kümenin üyelik fonksiyonunun en büyük üyelik derecesi, bu kümenin yüksekliğini belirlemektedir. Denklem (4.3) de matematiksel olarak yükseklik tanımlanmaktadır:

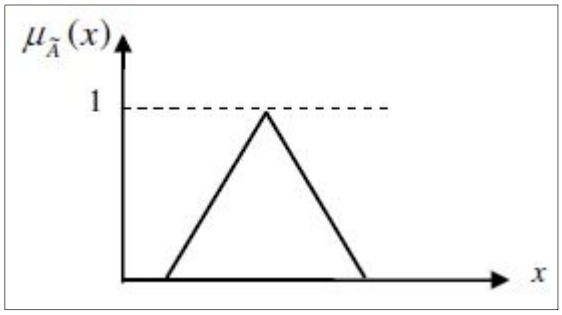
$$\text{yükseklik}(\tilde{A}) = \sup[\mu_{\tilde{A}}(x)]; \forall x \in E \tag{4.3}$$

Burada, $\tilde{A}$ kümesi sonlu bir evrensel kümede tanımlı ise, en küçük üst sınırı gösteren sup (supremum) terimi yerine maksimum terimi kullanılmaktadır.

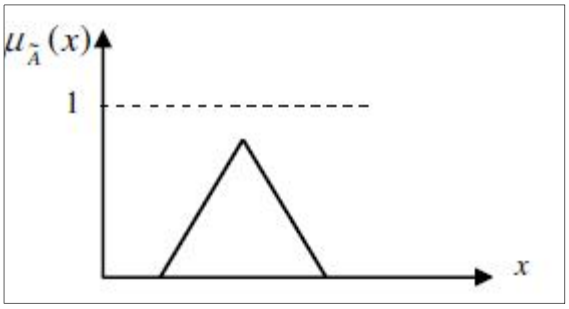
Normallik: Yüksekliği 1'e eşit olan bulanık kümeler, normallik özelliğine sahiptir. Bu özellik matematiksel olarak, Denklem (4.4) şeklinde gösterilmektedir:

$$\text{yükseklik}(\tilde{A}) = \sup[\mu_{\tilde{A}}(x)] = 1; \exists x \in E \tag{4.4}$$

Yüksekliği 1'den küçük olan bulanık kümeler ise, normal altı bulanık kümeler olarak tanımlanmaktadır [122].



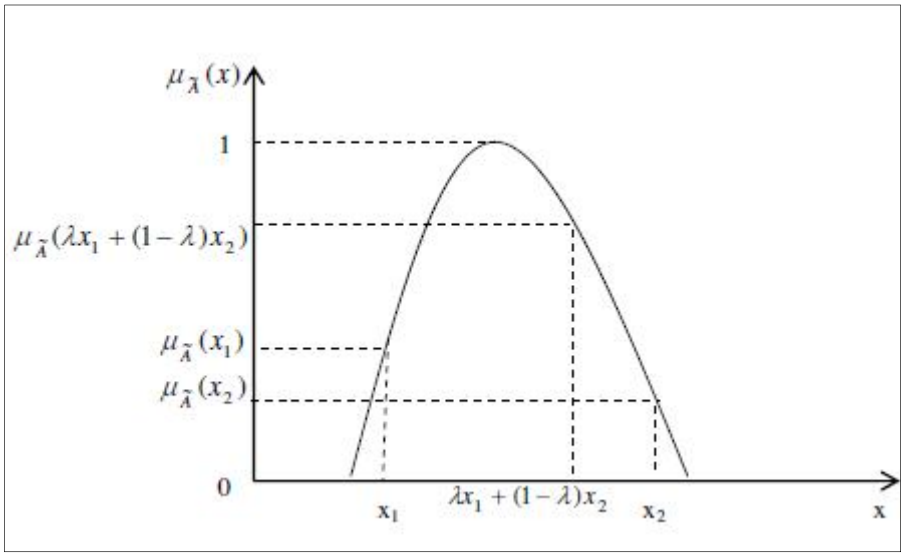
Şekil 4.3. Normal Bulanık Küme



Şekil 4.4. Normal Altı Bulanık Küme

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırasıyla normal ve normal altı bulanık kümeler gösterilmektedir. Normal olmayan bulanık kümeleri, normal hale dönüştürmek için (dış bükey olmaları şartı ile) kümenin üyelik derecesinin, en büyük üyelik derecesine bölünmesi gerekmektedir [138].

Dışbükeylik (Konvekslik): Dışbükey olan bulanık kümelerde üyelik fonksiyonu, kümenin dayanağı üzerinde sürekli artmakta, sürekli azalmakta veya üçgensel üyelik fonksiyonunda olduğu gibi önce sürekli olarak, üyelik derecesi 1'e eşit oluncaya kadar artmakta ve ondan sonraki dayanağa düşen elemanlar için sürekli azalmaktadır. Diğer bir deyişle, bir kümedeki herhangi iki noktayı birleştiren çizgideki her nokta, bu kümenin elemanı ise, küme dışbükeydir. Dışbükey bulanık küme, Şekil 4 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4 5. Dışbükey Bulanık Küme

Simetriklik: Simetriklik, üyelik derecesi 1'e eşit olan elemandan sağa ve sola eşit mesafede hareket edildiği zaman elemanların üyelik derecelerinin birbirine eşit olması anlamına gelmektedir. Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecelerinin 0,5'e eşit olması durumundaki noktaya ise geçiş noktası adı verilmektedir [120].

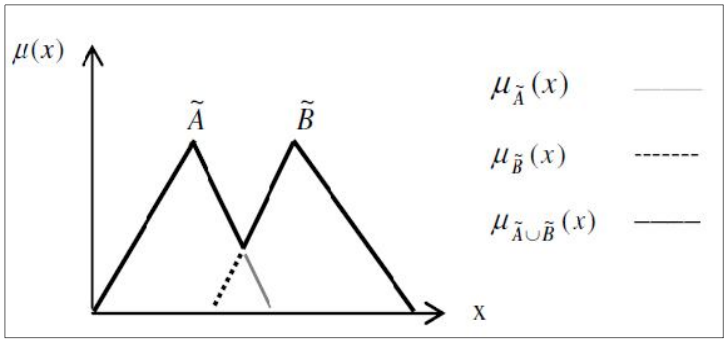
4.5. Bulanık Küme İşlemleri

Klâsik kümelerde tanımlanan birçok işlem, bulanık kümelerde de tanımlanabilmektedir. Klasik kümeler ve bulanık kümeler üzerine kurulan matematiksel yapı ve her iki küme teorisinde gerçekleşen işlemler bu iki küme teorisinin karşılaştırılarak bilinmesi açısından önem taşımaktadır. Gerek bulanık küme ve klasik küme işlemleri, gerekse klasik küme ve bulanık küme özelliklerinin tanımlanması için bazı notasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. E, evrensel kümeyi göstermek üzere, söz konusu kümelerin hangi notasyonlarla ifade edildiği Tablo 4.1'de özetlenmiştir [137].

Tablo 4.1. Klasik küme ve bulanık küme notasyonları

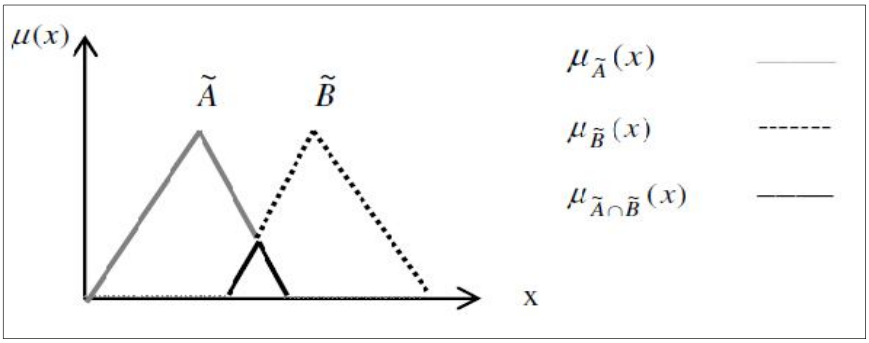
Klasik Kümeler	Bulanık Kümeler
• $x \in X \Rightarrow x$, X uzay kümesine ait bir elemandır. • $x \in A \Rightarrow x$, A kümesine ait bir elemandır. • $x \notin A \Rightarrow x$, A kümesine ait bir eleman değildir. • $A \subset B \Rightarrow B$ kümesi A kümesinin tümünü içerir. (Eğer $x \in A$ ise $x \in B$'dir.) • $A \subseteq B \Rightarrow B$ kümesi A kümesinin tümünü içerir veya A kümesi B kümesine denktir. • $A = B \Rightarrow A \subseteq B$ ve $B \subseteq A$ • $A \neq \varnothing \Rightarrow$ A kümesinin hiç bir elemanı yoktur. A kümesi boş kümedir. • $X = \{a,b,c\}$ ise X kardinali $P(x) = \left\{ \begin{matrix} \varnothing, \{a\}, \{b\}, \{c\} \\ \{a,b\}, \{a,c\}, \{b,c\}, \{a,b,c\} \end{matrix} \right\}$ kümesi olur ki bu küme, X kümesinin olabilecek tüm alt kümelerinin kümesidir.	• $x \in X \Rightarrow x$, X uzay kümesine ait bir elemandır. • $x \in \tilde{A} \Rightarrow x$, $\tilde{A}$ kümesine ait bir elemandır. • $x \in \tilde{A} \Rightarrow x$, $\tilde{A}$ kümesine ait bir eleman değildir. • $\tilde{A} \subset \tilde{B} \Rightarrow$ kümesi $\tilde{A}$ kümesinin tümünü içerir. (Eğer $x \in \tilde{A}$ ise $x \in \tilde{B}$'dir.) • $\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Rightarrow \tilde{B}$ kümesi $\tilde{A}$ kümesinin tümünü içerir veya $\tilde{A}$ kümesi $\tilde{B}$ kümesine denktir. • $\tilde{A} = \tilde{B} \Rightarrow \tilde{A} \subseteq \tilde{B}$ ve $\tilde{B} \subseteq \tilde{A}$ • $\tilde{A} \neq \varnothing \Rightarrow \tilde{A}$ kümesinin hiç bir elemanı yoktur. $\tilde{A}$ kümesi boş kümedir.

Birleşim: Bulanık birleşim kümesi, sözel olarak, hem $\tilde{A}$ hem de $\tilde{B}$ kümesini kapsayan en küçük üyelik dereceli bulanık küme olarak ifade edilebilmektedir. Burada $\vee$ bir maksimum işaretidir ve mantıksal olarak "veya" şeklinde düşünülmektedir [141]. Şekil 4.6'da iki bulanık kümenin birleşimi gösterilmektedir.



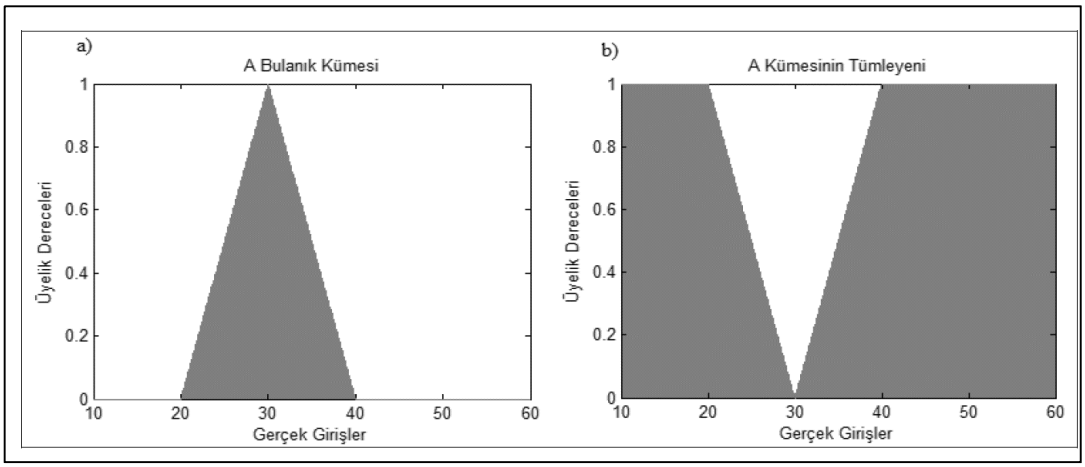
Şekil 4.6. İki Bulanık Kümenin Birleşimi

Kesişim: Bulanık kesişim kümesi, sözel olarak, hem $\tilde{A}$ hem de $\tilde{B}$ kümesini kapsayan en küçük üyelik dereceli bulanık küme olarak ifade edilebilmektedir. Burada $\wedge$ bir minimum işaretidir ve mantıksal olarak "ve" şeklinde düşünülmektedir [140]. İki bulanık kümenin kesişiminin üyelik fonksiyonu, bireysel üyelik fonksiyonlarının minimumu olarak tanımlanmaktadır [141]. Şekil 4.7'de iki bulanık kümenin kesişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.7. İki Bulanık Kümenin Kesişimi

Tümleme: Bulanık bir kümenin tümleyeni, bu kümeye ait elemanların üyelik derecelerinin 1'den çıkartılmasıyla hesaplanır. Şekil 4.8'de A bulanık kümesi ve tümleyeni gösterilmektedir.



Şekil 4.8. a) A Bulanık Kümesi b) A Bulanık Kümesinin Tümleyeni

Kartezyen Çarpım: Bulanık kümelerden farklı uzaydaki iki kümenin kartezyen çarpımı bulanık kümeler arası ilişki olarak tanımlanmaktadır. A, X evrensel uzayında B, Y evrensel uzayında iki bulanık küme ise kartezyen çarpımı yani aralarındaki ilişki R olacak şekilde:

$$AxB = R \subset XxY \tag{4.5}$$

Kartezyen çarpım Denklem (4.5) şeklinde ifade edilir.

$$\mu_R = \mu(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{4.6}$$

Burada bulanık ilişki R, Denklem (4.6) şeklinde ifade edilir. Klasik küme özeliklerinden Denklem (4.7) ve (4.8) de belirtilenler dışındaki bütün özellikler bulanık kümeler içinde geçerlidir.

$$A \vee \overline{A} \neq X \tag{4.7}$$

$$A \wedge \overline{A} \neq \varnothing \tag{4.8}$$

Bulanık kümelerde klasik küme özelliklerinden farklı olarak bir küme ile tümleyeninin birleşimi evrensel kümeye eşit değildir. Benzer şekilde bulanık bir küme ile tümleyeninin kesişimi de boş küme değildir. Diğer küme özellikleri ise Tablo 4.2'de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2. Klasik küme ve bulanık küme özellikleri

Klasik Kümeler	**Bulanık Kümeler**
Değişme Özelliği $A \cup B = B \cup A$ ve $A \cap B = B \cap A$	Değişme Özelliği $\tilde{A} \cup \tilde{B} = \tilde{B} \cup \tilde{A}$ ve $\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{B} \cap \tilde{A}$
Birleşme Özelliği $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$	Birleşme Özelliği $\tilde{A} \cup (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cup \tilde{C}$ $\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cap \tilde{C}$
Dağılma Özelliği $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$	Dağılma Özelliği $\tilde{A} \cup (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cap (\tilde{A} \cup \tilde{C})$ $\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cup (\tilde{A} \cap \tilde{C})$
Tek Kuvvet Özelliği $A \cup A = A$ ve $A \cap A = A$ Ayrıca $A \cup \varnothing = A$, $A \cup X = X$, $A \cap X = A$, $A \cap \varnothing = \varnothing$	Tek Kuvvet Özelliği $\tilde{A} \cup \tilde{A} = \tilde{A}$ ve $\tilde{A} \cap \tilde{A} = \tilde{A}$ Ayrıca $\tilde{A} \cup \varnothing = \tilde{A}$, $\tilde{A} \cup X = X$, $\tilde{A} \cap X = \tilde{A}$, $\tilde{A} \cap \varnothing = \varnothing$

4.6. Üyelik Fonksiyonu ve Çeşitleri

Bulanık kümeleri ifade etmek için üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Üyelik fonksiyonu, bir nesnenin bulanık kümeye aitlik derecesini gösteren üyelik değerinin hesaplanmasını sağlar ve bir bulanık kümenin içerdiği tüm bilgileri açıklar [142]. Bu nedenle bir olayın bulanık mantık ile modellenebilmesi uygun üyelik fonksiyonlarının oluşturulabilmesine bağlıdır.

Üyelik fonksiyonlarının doğru ve uygulama ile örtüşen bir şekilde belirlenmesi, bulanık küme teorisinin esasını oluşturmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi için genel bir yöntem bulunmamaktadır. Bulanık bir kümeye ilişkin üyelik fonksiyonunun belirlenmesi, tesadüfî bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesine benzetilebilmektedir. Bir sistemin işleyişi veya bir nesne için "ne kadar" veya "hangi noktadan sonra" gibi soruların yanıtları ile bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları oluşturulmaya çalışılmaktadır [143].

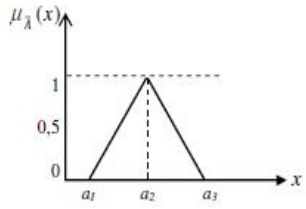
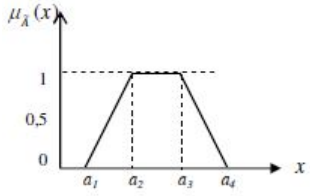
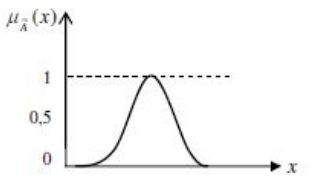
Üyelik fonksiyonunu oluşturmak için üç yol izlenebilmektedir. Bunlardan birincisi, kavram hakkında bilgi sahibi olan kişiler ile görüşmek ve daha sonra gerekli düzenlemeleri yapmaktır. Karar verici tarafından belirlenen üyelik fonksiyonları karar vericinin tecrübesine, kültürüne, bakış açısına bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. İkinci yol, verilerden yararlanarak üyelik fonksiyonlarını oluşturmaktır. Üçüncü yol ise, sistem performansından gelen geri bildirimlerden yararlanarak üyelik fonksiyonlarını belirlemektir. İlk yaklaşım, 1980'li yılların sonundan beri bulanık mantık araştırmacıları ve uygulamacıları tarafından izlenen temel yaklaşımdır. Sistematik düzenleme stratejilerinin eksikliğinden dolayı günümüzde birçok bulanık sistem deneme yanılma süreci şekline dönüşmüştür [144].

Çok sayıda üyelik fonksiyonu olmakla birlikte pratikte en yaygın olarak kullanılanlar üçgen, yamuk, gaussian ve çan şekilli fonksiyonlardır. Ayrıca literatürde sigmoidal, S ve Pi (Π) gibi üyelik fonksiyonları da tanımlanmıştır.

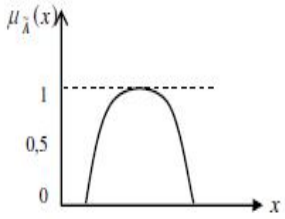
Tablo 4.3'te görüldüğü gibi üyelik fonksiyonları farklı şekillerde olabilmektedir. Özel bir şeklin uygun olup olmayacağını tespit etmek, çalışılan uygulama alanı tarafından elde edilen verilerle belirlenmektedir. Fakat birçok uygulama, bu tür şekil değişikliklerine karşı çok fazla duyarlılık göstermemektedir. Hesaplama açısından

getirdiği kolaylıklar göz önüne alınarak istenilen şekilde üyelik fonksiyonunun seçilmesi, bulanık küme teorisinin esnekliğini yansıtmasında öne çıkan bir durumdur. Çoğu durumda, üçgensel ve yamuksal üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Üçgensel üyelik fonksiyonu, yamuksal üyelik fonksiyonunun özel bir durumudur. Formüllerin basit oluşu ve bilgi işlemedeki kolaylık açısından hem üçgensel hem de yamuksal üyelik fonksiyonları çok sık kullanılmaktadır [144]. Bulanık kümeler üzerine kurulan matematiksel yapı, klâsik matematikten daha fazla açıklayıcı bir güce sahip olmasına rağmen kullanılabilirliği, uygulama alanlarında karşılaşılan kavramlar için uygun üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasına bağlıdır [116].

Tablo 4.3. En çok kullanılan üyelik fonksiyonu çeşitleri

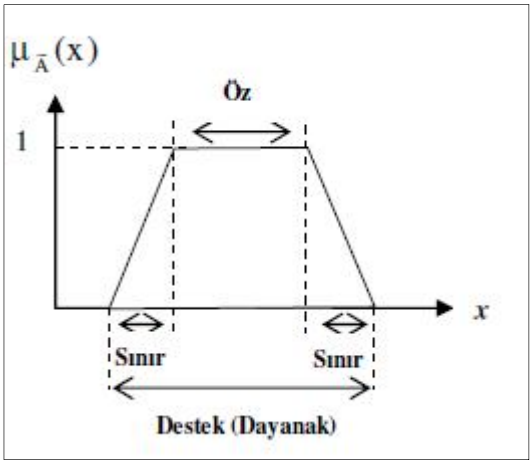
Üyelik Fonksiyonunun	
Matematiksel İfadesi	**Grafiksel Şekli**
Üçgensel Üyelik Fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x;a_1,a_2,a_3)=\begin{cases}(x-a_1)/(a_2-a_1), a_1\le x\le a_2\\(a_3-x)/(a_3-a_2), a_2\le x\le a_3\\0,\ x>a_3 \text{ veya } x<a_1\end{cases}$	
Yamuksal Üyelik Fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x;a_1,a_2,a_3,a_4)=\begin{cases}(x-a_1)/(a_2-a_1), a_1\le x\le a_2\\1, a_2\le x\le a_3\\(a_4-x)/(a_4-a_3), a_3\le x\le a_4\\0,\ x>a_4 \text{ veya } x<a_1\end{cases}$	
Gaussian Üyelik Fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x;m,\sigma)=\exp\left\{\frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right\}$	

Tablo 4.3. (Devam) En çok kullanılan üyelik fonksiyonu çeşitleri

Üyelik Fonksiyonunun	
Matematiksel İfadesi	**Grafiksel Şekli**
Çan Şekilli Üyelik Fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x;a_1,a_2,a_3)=\left\{\frac{1}{1+\left\lvert\frac{a_3}{a_1}\right\rvert^{2a_2}}\right\}$	

Bir bulanık alt kümede birden fazla elemanın üyelik derecesi 1'e eşit alınabilmektedir. Sadece o alt kümeye ait olan ve üyelik dereceleri 1'e eşit olan elemanlara öz, bir alt kümenin tüm elemanlarını içeren aralığa ise dayanak adı verilmektedir.

Üyelik dereceleri 1 veya 0'a eşit olmayan elemanların oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonun sınırları veya geçiş bölgeleri adı verilmektedir. Yamuksal bir üyelik fonksiyonunun öz, dayanak ve sınırları Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Üyelik Fonksiyonunun Kısımları

Yamuksal üyelik fonksiyonunda, bir alt kümede birden fazla elemanın üyelik derecesi 1'e eşit olmaktadır. Üçgensel üyelik fonksiyonunda ise, bir tane elemanın üyelik derecesi 1'e eşittir bu yüzden üçgensel üyelik fonksiyonun özü bir noktadan oluşmaktadır.

4.7. Bulanık Sistem

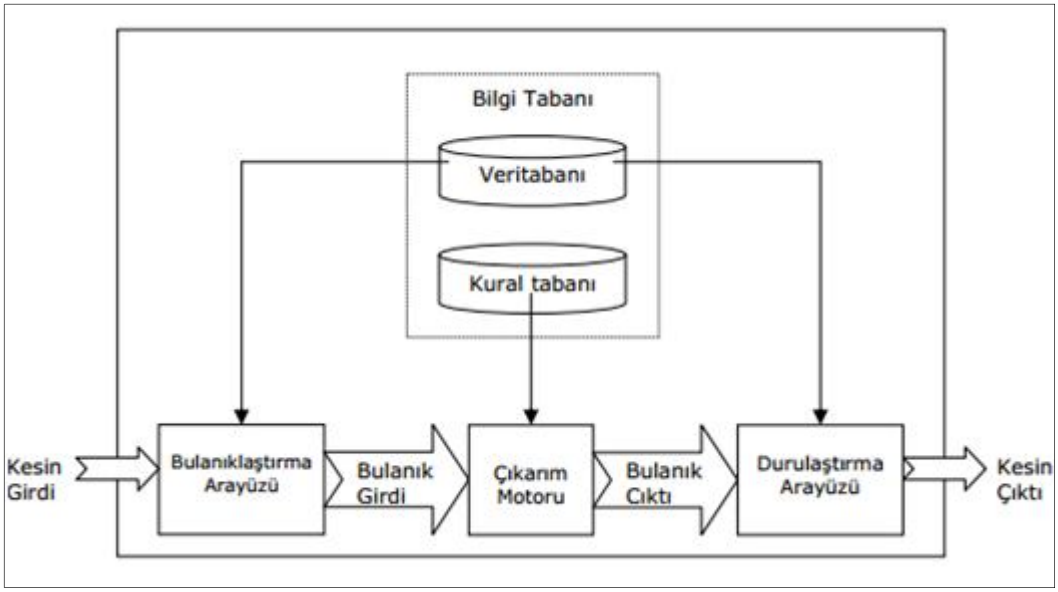
Endüstride bulanık mantık sistemleri, genellikle kontrol alanına odaklanmış olup çoğu kaynakta, bulanık kontrol adı altında anılmaktadır [145]. Bulanık kontrol (bulanık mantık denetleyici, bulanık çıkarım sistemleri, bulanık kontrolörler), doğrusal olmayan ve güvenilir analitik modeli kurulamayan sistemler için önemli yaklaşımlardan bir tanesidir. Bu anlamda, bulanık kontrole dayanan çıkarım, insan düşüncesinin benzetimi olarak düşünülebilmektedir [146].

Klâsik kontrol sistemleri, sistemin matematiksel modelinin oluşturulmasını gerektirirken; bulanık kontrol sistemlerinde, modelin tam olarak bilinmesine gerek kalmamaktadır. Sistemin oluşturulması, uzmanların veya karar vericilerin deneyimlerine ve sözel kurallara bağlıdır [147]. Bu tür kurallarla yapılan kontroller, kimi zaman "Kural Tabanlı Denetim" veya "Akıllı Denetim" olarak da adlandırılmaktadır [148]. Bulanık mantık kontrollü sistemlerin tasarımı, kontrol kurallarının tasarımını içermekte başka bir deyişle, operatörün davranışlarına göre "eğer-ise" kuralları elde edilmektedir [149].

Kural tabanlı sistemlerin avantajları, doğusal olmayan, iyi tanımlanmamış ve zamanla içinde değişiklik gösteren sistemlerde kolaylıkla işlemesi, kuralların kolay bir şekilde oluşturulması ve yorumlanması, sistemin kolay bir şekilde esnetilmesi ve düzenlenmesi, kolay bir çıkarım tekniği olması olarak sıralanabilmektedir [150].

Kural tabanlı sistemlerin dezavantajları ise, farklı kurallar arasındaki ilişkinin tam olarak açık olmaması, verilerin işlenmesi ve çıkarımı esnasındaki düşük esneklik, uzmanların kişisel bilgilerini ve deneyimlerini bulanık sistemin veritabanına ve kural tabanına aktarımında kullanılabilecek standart bir yöntemin bulunmaması, oluşturulan bulanık çıkarım sonucunda elde edilen çıktının, hata ölçümlerini en aza indirebilmek ve etkinliğini arttırabilmek için üyelik fonksiyonlarının tam olarak ne olması gerektiğine ilişkin bir yöntemin bulunmaması, oluşturulan sistemde birden fazla giriş değişkeni varsa gerçekleştirilecek çıkarımın daha da zorlaşması olarak sıralanabilmektedir [151].

Şekil 4.10'da bir bulanık sistemin genel yapısı görülmektedir. Buna göre bir bulanık sistem, temel olarak bulanıklaştırma, çıkarım ve durulaştırma birimlerinden oluşmaktadır.



Şekil 4.10. Bir Bulanık Sistemin Genel Yapısı

4.7.1. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, sistemden alınan kesin giriş verilerini, dilsel niteleyiciler olan sözel değişkenlere dönüştürme işlemidir. Bu aşamada, belirlenen üyelik fonksiyonlarından yararlanarak giriş bilgileri, ait olduğu bulanık küme/kümeler ile eşleştirilmekte ve üyelik derecesi belirlenerek sözel değişkenler belirlenmektedir. Başka bir deyişle, giriş değerlerinin daha önceden belirlenen üyelik fonksiyonlarından hangisine ve ne derecede (üyelik derecesi) ait olduğu belirlenmektedir. Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla farklı sayıda ve özellikte bulanık küme oluşturulabilmektedir [151].

Bulanıklaştırma sürecinde aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir [152]:

• Giriş değişkenlerinin ölçüsü başka bir deyişle, değişkenin alabileceği değer aralığı belirlenir.

• Sözü edilen uzaya karşılık gelen ve giriş değişkenlerinin oranına dönüştüren performans ölçeklemesi yapılır.

• Belirlenen üyelik fonksiyonları ile giriş verileri ölçek değişikliğine başka bir deyişle, uygun sözel değişkenlere dönüştürülür ve diğer adımlara aktarılmak üzere bulanık veriler hazırlanır.

4.7.2. Kural tabanı

Girişler bulanıklaştırıldıktan sonra, sistemin yapısına göre kural tabanı belirlenmektedir. Kural tabanında, sistemin bilgi girişlerinin alabileceği çeşitli değerlere göre mantıki olarak uygunluk gösteren sistem çıkış değerleri, kural satırları haline getirilerek, kural tabanı oluşturulur [139].

Basit olarak bir sistem için kural tabanı geliştirdiğimizde, sistem çıkışını etkileyebilecek ölçülebilen giriş değerleri tespit edilmelidir. Giriş bilgisine ait değer uzayı, üyelik fonksiyonları ile bölgelere ayrılarak, dilsel ifadelerle isimlendirilir ve aynı zamanda her giriş değeri için bir üyelik ağırlığı tespit edilmiş olur. Böylece her giriş değerinin, ait olduğu bir bölgesi ve bir üyelik ağırlığı olur. Kural tabanı, her birisi bir bölgeyi temsil eden dilsel ifadelerle düzenlenir. Örneğin "1. giriş sıcak, 2. giriş normal ise, çıkış yüksektir." gibi bir kural satırında görüldüğü gibi, kural tabanını oluşturan bilgiler, tamamen dilsel ifadelerdir. Fakat her kural satırındaki, tespit edilmiş olan çıkış değeri, birim fonksiyonlarla oluşturulmuş ise, sayısal değerlerle de ifade edilebilir. Bu durumda oluşturulacak kural satırları "1. giriş sıcak. 2. giriş normal ise, çıkış l.5 tir." şeklinde bir kuralın benzeri olabilir [153].

Kural satırları Eğer-İse (If- Then) kelimeleri ile ayrılmış olan iki kısımdan oluşur. Bunlardan EĞER ile İSE kelimeleri arasında bulunan kısma öncül veya ön şartlar, İSE kelimesinden sonraki kısma ise soncul veya kural çıkarımı adı verilir. Aşağıda kaynaklarda kural tabanını açıklamak için yaygın olarak kullanılan 2 örnek kural verilmiştir [45].
"EĞER hız düşük İSE gaza fazlaca bas"
"EĞER hız yüksek İSE gaza az bas"

Bulanık "eğer-ise" kuralları, genellikle belirsiz ortamda karar vermede kişisel yargıları yansıtmakta olup, kesin giriş değerlerini bulanık yapıya aktarmakta ve bunları, kontrol sisteminin bir parçası haline getirmektedir [151].

Kurallar, kendi arasında eksik veya tamamlanmamış kurallar, karma kurallar, bulanık cümle şeklindeki kurallar, karşılaştırmalı kurallar, şartlı kurallar, niceleyici kurallar olmak üzere altı gruba ayrılabilmektedir [154].

Kurallar, x ve y değişkenleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Başka bir deyişle, bulanık eğer-ise kuralları, ikili bulanık ilişki olarak tanımlanabilmektedir [155]. Verilen bir kuralın öncül kısmı, birden fazla bölüme sahipse diğer bir deyişle, karma bir kural söz konusu ise, bu kuraldan tek bir sayı elde etmek için bulanık operatörler kullanılmaktadır. Bu operatörler sonucu elde edilen sayı, daha sonra çıkış fonksiyonunda kullanılmaktadır. Bu anlamda, bulanık operatörün girişi, bulanıklaştırılmış giriş değişkenlerinden elde edilen iki veya daha fazla üyelik değeri olurken, kurallardan belirlenen çıkış değerlerinin toplamı, bulanık küme olmaktadır [156]. Bazı kural cümlelerinin sonuna parantez içinde yazılan herhangi bir "a" sayısı (0 ile 1 arasında "a" ağırlığı) bulunmakta ve kurallar üzerinde uzmanların belirsizliğini tanımlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca, bulanık kural tabanı oluşturulurken şu üç özellik göz önünde bulundurulmalıdır [157]:

• Kurallar, tam olmalıdır yani, olası koşullar atlanmamalıdır.
• Kurallar, tutarlı olmalıdır yani, çelişkili sonuçlar barındırmamalıdır.
• Kurallar, fazla veya eksik olmamalıdır.

4.7.3. Çıkarım

Bir girdi bulanık kural tabanında çıkarım mekanizması sayesinde işleme tabi tutulur. Bulanık çıkarım kimi zaman bulanık çıkarım motoru, bulanık kural tabanlı sistem, bulanık uzman sistem, bulanık model, bulanık ilişkisel hafıza, bulanık denetleyici veya bulanık sistem adı altında da incelenmektedir [155]. Kural tabanında bilginin modellenme şekline göre eldeki girdiye karşılık gelen çıktı değeri belirlenir. Aslında çıkarım veya yaklaşık çıkarım olarak adlandırılan bu süreç, girdiler ile çıktının eşleştirildiği başka bir deyişle, bilginin işlendiği süreçtir [158].

İki veya daha fazla mantıksal ifade VE (AND), VEYA (OR) mantıksal bağlantı işlemcileri kullanılarak birleştirilebilir. Çıkarım aşamasında her mantıksal ifade sonunda bir sonuç (sonuç aşaması), bu sonuçların birleştirilmesi ile de en son sonuç değerine veya sonuç kümesine ulaşılır.

AND ve OR mantıksal bağlantı işlemcileri her kural için eşik değerini belirlemede etkilidirler. Eşik değeri çıkarım aşamasında kullanılan çıkarım yöntemine göre farklı şekillerde hesaplanır ve kullanılır. Kural AND mantıksal bağlantı işlemcisi ile oluşturuldu ise kesişim işlemi uygulanır ve eşik değer en küçük üyelik derecesine eşit olur. Eğer kural OR işlemcisi ile oluşturuldu ise birleşim işlemi uygulanır ve sınır değer en büyük üyelik derecesine eşit olur. Eğer kuralın öncül şartı gerçekleşmez ise eşik değer sıfır olur ve sonuç aşamasında boş küme elde edilir [142].

Bulanık çıkarım sisteminde uzmanların bilgileri, bulanık kurallardan oluşan kural tabanı ile gösterilmektedir [98]. Literatürde çıkarım aşamasında sıkça Mamdani ve Takagi-Sugeno yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

4.7.3.1.Mamdani yöntemi

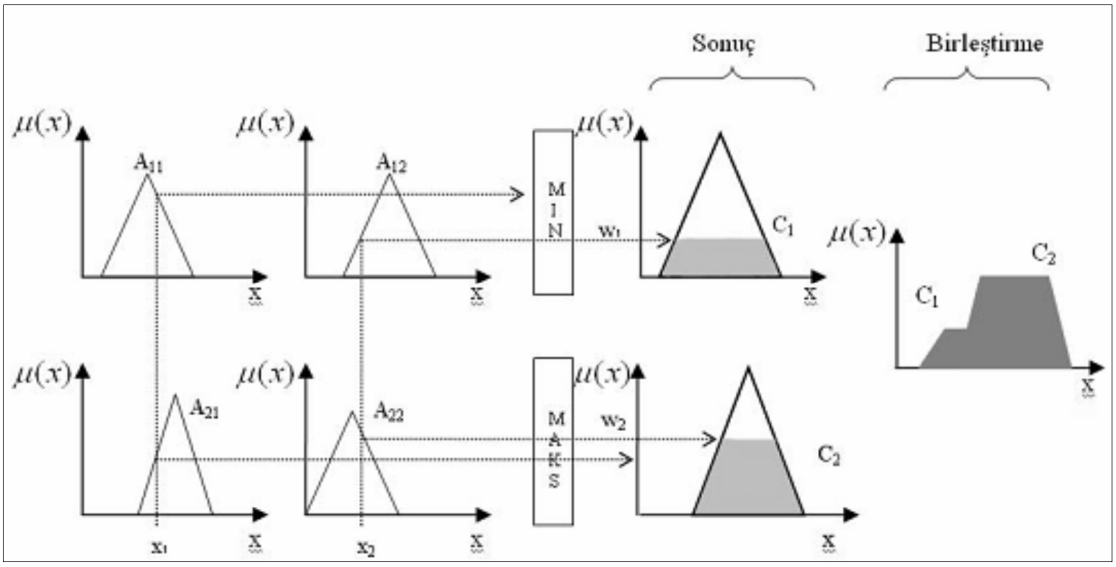
Sistemlerin matematiksel modeline gerek duymadan sadece istenilen çıkışı verecek şekilde girişe uygulanan işaret ayarlanır. Mamdani tipi bulanık model insan davranışlarına çok uygun olduğundan kullanışı en yaygın olan modellemedir. İlk defa bir buhar motorunun insan tecrübelerinden elde edilen sözel bilgilerin kontrolü amacıyla geliştirilmiştir [159]. Bu modelde girdi ve çıktı değişkenleri üyelik fonksiyonları ile ifade edilir ve kural tablosu ile birbirine bağlanır. Bu modelde önce "eğer" şart ifadesi sonra "ise" hüküm cümlesi gelmektedir. Kuralın "ise" hüküm vermesi bulanık önermelere göre olmaktadır.

Mamdani bulanık çıkarım sistemi min-max yöntemi olarak da ifade edilebilmekte ve karar verme aşamasında, yani kuralların birleştirilmesi kısmında minimum (T-norm) ve maximum (T-conorm) operatörlerini birlikte kullanmaktadır. Max ve min operatörlerinin kullanılması, kuralları oluşturma kısmında ise, bize giriş değerlerinin OR veya AND bağlaçları ile birbirine bağlanabileceğini göstermektedir [137].

Bu yöntemin kural yapısı, Denklem (4.9) şeklindedir:

$$\begin{aligned} &\mathrm{IF}(x_1 = A_{11})\,\mathrm{AND}\,(x_2 = A_{12})\,\mathrm{THEN}\,(z_1 = c_1) \\ &\mathrm{IF}(x_1 = A_{21})\,\mathrm{AND}\,(x_2 = A_{22})\,\mathrm{THEN}\,(z_2 = c_2) \end{aligned} \tag{4.9}$$

Bu kural yapısının şekilsel gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Burada $x_1$ve x_2 girdi değişkenleri, z ise çıktı değişkenidir. A_{11} ve A_{12} girdi değişkenlerinin alt seviyelerini temsil eden üyelik fonksiyonlarıdır. C ise her kuralın sonunda çıkan bulanık sonuç kümesidir. C bulanık kümeleri Mamdani çıkarım yönteminde sonuç kısmında eşik değerinin kestiği noktanın altında kalan alandan oluşmaktadır. Eşik değeri (wi), birinci kuralda AND mantıksal bağlantı işlemcisi kullanıldığı için en küçük üyelik derecesine, ikinci kuralda OR mantıksal bağlantı işlemcisi kullanıldığı içinde en büyük üyelik derecesine eşittir [142].



Şekil 4.11. Mamdani Çıkarım Yönteminin Gösterimi

Mamdani yönteminde kurallar birleştirilirken her bir kuralın sonuç kümelerine bulanık birleşim işlemi uygulanır, yani kurallar AND işlemcisi ile birleştirilir. Birleşim sonucunda bulanık bir küme elde edildiğinden sonuç kümesinin kesin kümeye dönüştürülmesi gerekir.

4.7.3.2.Takagi-sugeno yöntemi

Takagi-Sugeno bulanık mantık modellemesi Mamdani modelinin geliştirilmesi ile ortaya çıkmış bir modellemedir. İlk kez 1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Girdi değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve bulanık mantık işlemleri Mamdani bulanık modelleme yöntemi ile tamamen aynıdır. İki yöntem arasındaki fark çıktı üyelik fonksiyonlarındadır. Sugeno tipi bulanık modellemede çıktı üyelik fonksiyonları sadece lineer ya da sabittir. Çıktı üyelik fonksiyonları sabit olduğu zaman 0. derece, 1.

derece doğru denklemi şeklinde olduğu zaman ise birinci derece Sugeno bulanık model olarak adlandırılırlar [127].

Bir başka deyişle bu modelleme yaklaşımında, model bulanık ifadelerden ve kurallar tarafından oluşturulur. Kuralın IF kısmı bulanık değişkenleri içeren bulanık ifadeleri, her bir bulanık ifadenin, THEN kısmı ise modelin girdi değişkenlerinin parametrelerden oluşan eşitliğini gösterir.

Takagi-Sugeno modelleme, Mamdani gibi hesaplama yapılması için uygundur. Mamdani'den üstün olan özelliği lineer olmayan sistemlerin kontrolü içinde modelleme yapılabilmektedir. Mamdani gibi sürekliliği sağlar ve matematiksel analiz için uygun yapıdadır [160].

4.7.4. Durulaştırma

Durulaştırma işlemi, bulanık çıkarım sisteminin son adımını oluşturmaktadır. Çıkarım biriminden gelen bulanık verilerin, gerçek sistemde kullanılabilmesi için gerçek veya kesin değerlere çevrilmesi gerekmektedir. Bulanık bir niceliği lineer bir sayıya dönüştürme işlemine durulama veya bulanıklık giderme denir. Bulanık sistemlerin üyelik fonksiyonları ile oluşturulan kural cümlelerinin hükümleri, durulaştırma ile tek bir ifade şeklinde elde edilir.

Durulama yöntemlerinde genel olarak gözlemlenen dört temel özellik vardır [123]. Bunlar:

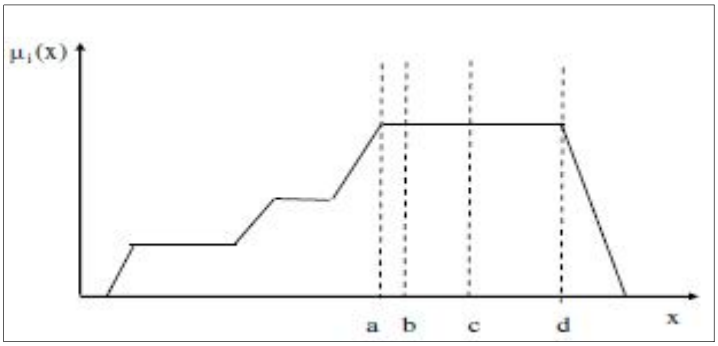
1. Durulama işlemcisi daima sayısal bir değer hesaplar.
2. Üyelik fonksiyonu durulanmış değerleri belirler.
3. İki üçgen bulanık sayının işleme sokulup durulanmasından elde edilen değer daima bireysel olarak durulanıp işleme sokulmasında elde edilen değerlerin arasında yer alır.
4. Engelleyici bir durumda, durulanmış değer sınırlı bölgeye düşürülmelidir.

Durulaştırma işlemi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Uygulamalarda uygun durulaştırma yöntemi seçilirken dikkat edilmesi gereken kriterler şunlardır [160]:

• Elde edilecek sonucun belirsiz olmaması (tek bir değer vermesi),

• Elde edilecek sonucun makul olması (belli bir alanın yaklaşık olarak ortasında bulunması),
• Seçilen yöntemin hesaplama açısından kolay olması.

Bulanık kontrol alanında; en büyük üyelik derecesi, en büyüklerin ortalaması yöntemi, iki bölge yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, toplamların merkezi yöntemi, yükseklik yöntemi, düzenlenmiş yükseklik yöntemi, kümelerin merkezi yöntemi olmak üzere birçok durulaştırma yöntemi tanıtılmıştır. Şekil 4.12'de a) maksimum değerlerin en düşüğü, b) ağırlık merkezi, c) maksimum değerlerin ortalaması ve d) maksimum değerlerin en büyüğü yöntemlerinden elde edilen durulaştırma değerleri görülmektedir. Bu yöntemler arasında ağırlık merkezi yöntemi ve en büyüklerin ortalaması yöntemi literatürde sıkça kullanılmaktadır [151].



,

Şekil 4.12. Durulaştırma Yöntemleri

4.7.4.1.En büyüklerin ortalaması yöntemi

Bu yöntem, bulanık kontrolde tanımlanan üyelik fonksiyonlarının ulaştığı en büyük değerlerin ortalamasını vermektedir [123]. En büyük değerlerin ortalaması Denklem (4.10) da ifade edilmektedir.

$$Z = \frac{\sum_{j=1}^{n} Z_j}{n} \tag{4.10}$$

Burada Z_j, üyelik fonksiyonlarının aldığı en yüksek üyelik derecesine karşılık gelen değerleri gösterirken; n, en yüksek değer sayısını göstermektedir.

4.7.4.2.Ağırlık merkezi yöntemi

Bulanık kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sonucu elde edilen sonuç, bulanık bir küme olan A'nın olabilirlik dağılımının çekim noktasını vermektedir [123]. Başka bir deyişle, yöntem ile elde edilen sonuç, tüm olabilirlik dağılımını dikkate almaktadır. Yöntemde gerçekleştirilen hesaplamaların yoğunluğu ve zorluğu, yöntemin dezavantajı olarak görülmektedir [144]. Ağırlık merkezi hesaplaması Denklem (4.11) de ifade edilmektedir.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_i(Y_i)\, Y_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i(Y_i)} \tag{4.11}$$

Burada Y_i , i. kuraldan çıkan bulanık çıktı kümesinin fonksiyon değeri; $\mu_i(Y_i)$ ise i. kuraldan çıkan üyelik derecesidir [146].

5. UYGULAMA

Uygulamanın amacı, elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılan güneş, jeotermal ve rüzgâr enerjisi santralleri için yenilenebilir enerji kaynakları risklerinin incelenerek, santrallerin kurulum, işletim ve bakım aşamalarında karşılaşılabilecek sorunların, giderilme sürelerini ve maliyetlerini indirgemek ve söz konusu riskler için alınacak önlemlerin önceden belirlenmesine katkı sağlamaktır.

Uygulamada, söz konusu risklerin değerlendirilmesinde, FMEA ve bulanık mantık yaklaşımıyla FMEA yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntemden alınan sonuçlar için risklerin karşılaştırılması yapılmıştır.

5.1. FMEA ve Bulanık Yaklaşımlı FMEA Değerlerinin Hesaplanması

Hata türlerinin değerlendirilmesi risk faktörleri olan ortaya çıkma, şiddet ve saptanabilirlik değerlerinin puanlandırılmasıyla mümkündür. Risk faktörleri puanlandırılırken değişik istatistiksel tekniklere veya uzman görüşüne başvurulmaktadır. Bu uygulamanın ilk aşamasında alan uzmanlarınca, ortaya çıkma, şiddet ve saptama değerlerinin her bir risk faktörü için puanlandırması yapılmıştır. Alan uzmanları tarafından tespit edilen değerler ve bu değerlerin çarpımı sonucu elde edilen RÖS değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Hata türlerinin değerlendirilmesi

FMEA No	Riskler	Rüzgâr				Jeotermal				Güneş			
		O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS
1	Döviz Riski	5	5	7	175	4	5	6	120	4	4	6	96
2	Kredi Riski	3	4	7	84	5	4	7	140	3	4	8	96
3	Enflasyon Riski	4	4	7	112	4	4	6	96	3	4	6	72
4	Elektrik Fiyat Riski	4	5	7	140	4	4	6	96	3	4	8	96
5	Terörizm	2	6	7	84	2	7	7	98	3	6	7	126
6	İç Karışıklık ve Savaş	2	5	7	70	3	5	7	105	2	5	7	70

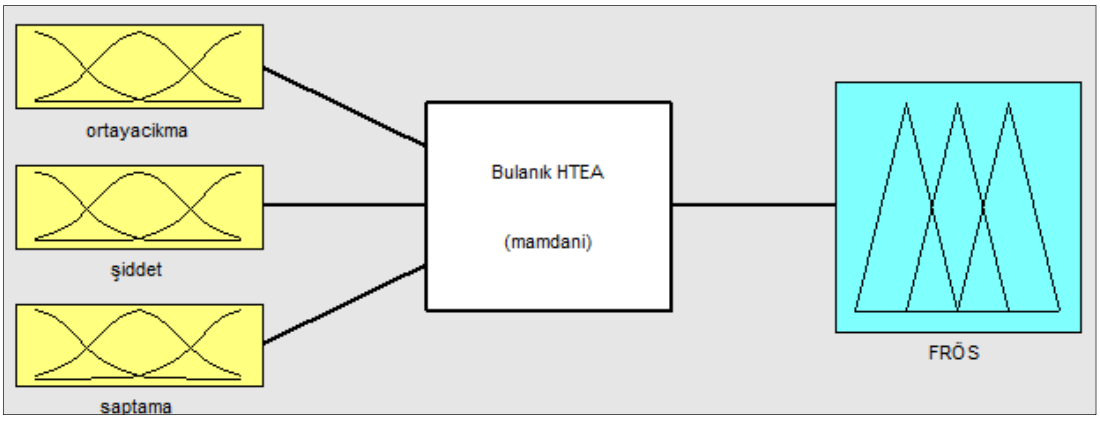
Tablo 5.1. (Devam) Hata türlerinin değerlendirilmesi

No	Riskler	Rüzgâr				Jeotermal				Güneş			
		O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS
7	Kanun ve Mevzuatların Değişmesi	3	4	8	96	4	5	8	160	4	3	7	84
8	Teknik ve Mühendislik Tasarım Hataları	4	7	6	168	5	7	5	175	5	7	5	175
9	Diğer Enerji Türlerindeki Teknolojinin Gelişme Riski	5	2	5	50	6	3	5	90	7	2	4	56
10	İşçi Hataları ve İş Kazaları	6	3	5	90	7	3	5	105	7	2	5	70
11	Plandışı Bakım ve Onarım	4	7	5	140	3	8	5	120	3	6	4	72
12	Periyodik Bakım Süresinin Uzaması	3	6	4	72	3	6	5	90	3	6	5	90
13	İşletme Masraflarının Tahmin Edilenden Yüksek Çıkması	3	8	4	96	3	8	5	120	3	8	4	96
14	İnşaat Süresinin Uzaması	3	7	3	63	3	7	4	84	3	7	4	84
15	Ekipmanların Tedariklerinde Gecikme	5	6	4	120	4	5	4	80	3	6	4	72
16	Doğal Afetler	5	7	6	210	4	7	8	224	5	7	6	210
17	Yangın ve Patlama	3	7	8	168	5	7	6	210	4	7	8	224
18	Rüzgârın Değişkenliği	8	5	8	320	-	-	-	-	-	-	-	-
19	Seçilen Türbinin Uygunluğu	2	3	8	48	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Keşif Riski	-	-	-	-	7	6	8	336	-	-	-	-
21	Sondaj Riski	-	-	-	-	7	5	7	245	-	-	-	-

Tablo 5.1. (Devam) Hata türlerinin değerlendirilmesi

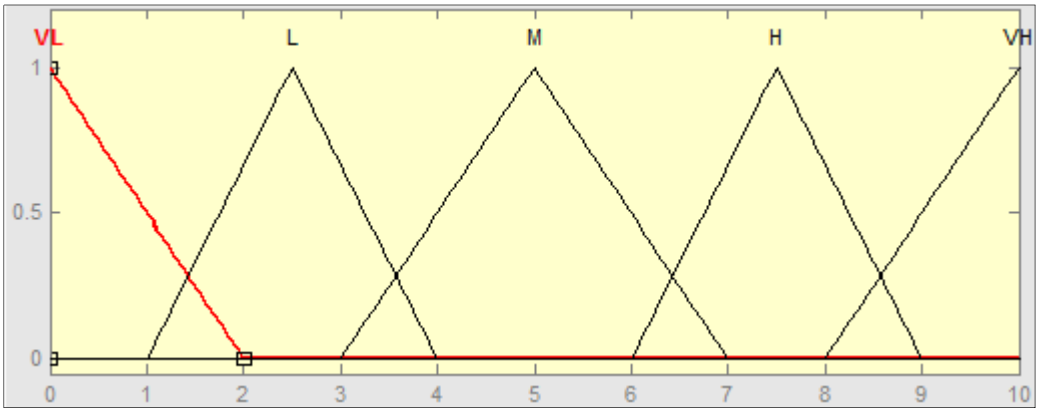
No	Riskler	Rüzgâr				Jeotermal				Güneş			
		O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS	O	D	S	RÖS
22	Güneşin Değişkenliği	-	-	-	-	-	-	-	-	9	5	9	405
23	Hırsızlık	-	-	-	-	-	-	-	-	1	8	2	16
24	Üçüncü Sahışların Zarar Görmesi	4	5	5	100	4	5	6	120	5	5	6	150
25	Gürültü	8	1	2	16	-	-	-	-	-	-	-	-
26	Kuş Ölümleri	8	2	1	16	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Gaz Emisyonları Riski	-	-	-	-	8	2	2	32	-	-	-	-
28	Jeotermal Atık Riski	-	-	-	-	8	2	3	48	-	-	-	-
29	Atık Riski	-	-	-	-	-	-	-	-	8	2	4	64
30	Ekilebilir Alanların azalması	-	-	-	-	-	-	-	-	8	1	2	16

Uygulamanın ikinci aşamasında bulanık mantık yaklaşımıyla model oluşturulmuştur. Bulanık mantık yaklaşımıyla RÖS değerlerinin hesaplanması için MATLAB programının fuzzy logic toolbox'undan yararlanılmıştır. FMEA tekniği için 3 girdi ve 1 çıktı değişkeni olan Şekil 5.1'deki model kurulmuş olup böylelikle 3 faktör birleştirilerek risk öncelik sayısı hesaplanmıştır.

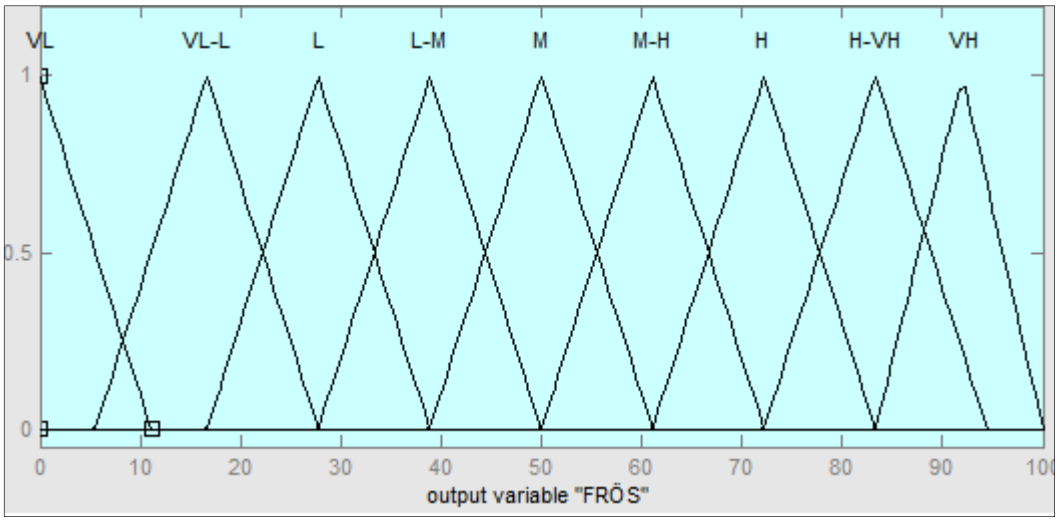


Şekil 5.1. Bulanık Model

Geliştirilen modelde ortaya çıkma, şiddet ve saptama girişleri için Şekil 5.2'deki üyelik fonksiyonu, FRÖS çıktı değişkeni için ise Şekil 5.3'deki üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

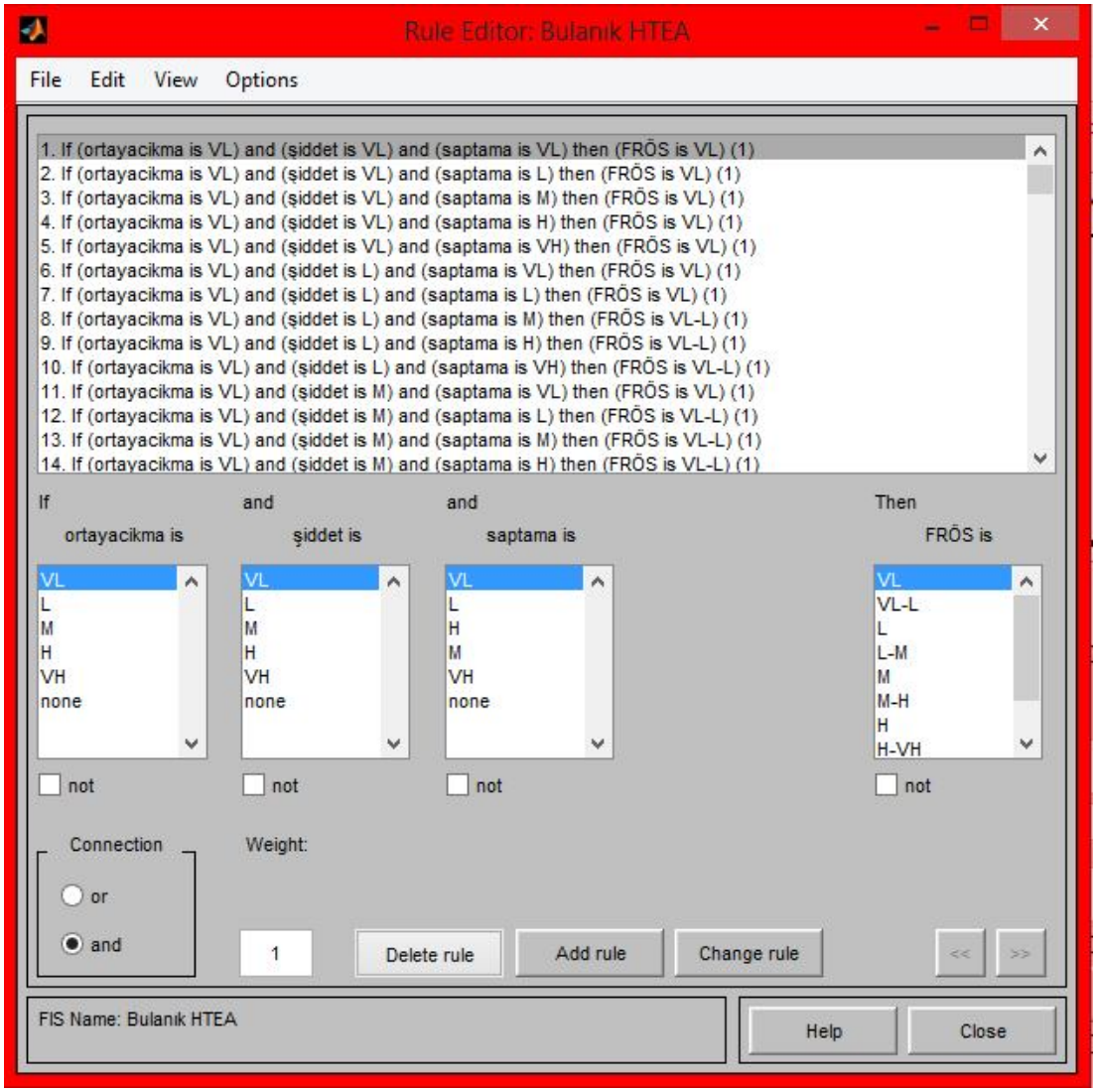


Şekil 5.2. Girdi Değişkenleri Üyelik Fonksiyonu



Şekil 5.3. Çıktı Değişkeni Üyelik Fonksiyonu

Şekil 5.2'de görüldüğü üzere girdi değerleri için üyelik fonksiyonları oluşturulurken onlu skala 5 farklı bölgeye bölünmüştür. Üçgen üyelik fonksiyonları ile temsil edilen bu alt bölgeler sırasıyla; VL (çok düşük), L(düşük), M (orta), H(yüksek) ve VH (çok yüksek)'dir. Çıktı değişkeni için ise Şekil 5.3'de yüzlü skala 9 farklı parçaya bölünmüştür. Bunlar sırasıyla; VL (çok-düşük), VL-L (çok-düşük-düşük), L (düşük), L-M (düşük-orta), M (orta), M-H (orta-yüksek), H (yüksek), H-VH (yüksek-çok yüksek) ve VH (çok yüksek)'dir. Modelde 125 kuraldan oluşan bir kural tabanı kullanılmıştır. Şekil 5.4'te görülen kurallar olası bütün durumlar tek tek değerlendirilerek tamamen uzman bilgisi dikkate alınarak yazılmıştır.



Şekil 5.4. Kural Tabanı

Kurallardan bazıları şu şekildedir:

• EĞER ortaya çıkma=VL VE şiddet=VL VE saptama=VL İSE FRÖS=VL (çok düşük)

• EĞER ortaya çıkma=L VE şiddet=VL VE saptama=VH İSE FRÖS=VL-L (çok düşük-düşük)

• EĞER ortaya çıkma=M VE şiddet=H VE saptama=VH İSE FRÖS=M (orta)

Kuraların tamamı Ek 1'de tablo şeklinde verilmiştir. Çıkarım mekanizmasında mamdani yöntemi kullanılmış ve sonuçlar Ağırlık merkezi yöntemi ile durulanmıştır. Bulanık yaklaşımla hesaplanan RÖS değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

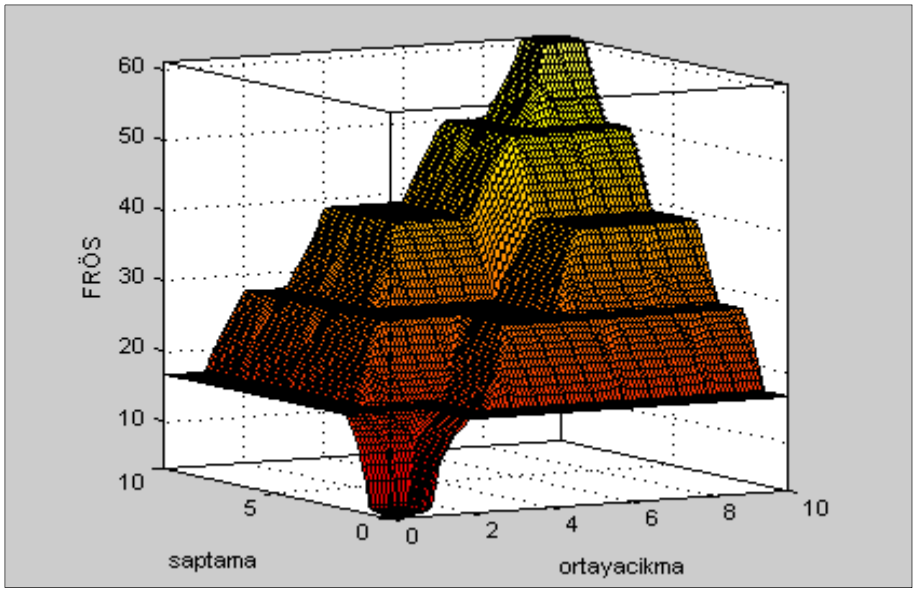
Tablo 5.2. Hata türlerinin bulanık FMEA yaklaşımıyla değerlendirilmesi

No	Riskler	Rüzgâr				Jeotermal				Güneş			
		O	D	S	FRÖS	O	D	S	FRÖS	O	D	S	FRÖS
1	Döviz Riski	5	5	7	38,9	4	5	6	27,8	4	4	6	27,8
2	Kredi Riski	3	4	7	27,8	5	4	7	38,9	3	4	8	27,8
3	Enflasyon Riski	4	4	7	38,9	4	4	6	27,8	3	4	6	27,8
4	Elektrik Fiyat Riski	4	5	7	38,9	4	4	6	27,8	3	4	8	27,8
5	Terörizm	2	6	7	27,8	2	7	7	38,9	3	6	7	27,8
6	İç Karışıklık ve Savaş	2	5	7	27,8	3	5	7	27,8	2	5	7	27,8
7	Kanun ve Mevzuatların Değişmesi	3	4	8	27,8	4	5	8	38,9	4	3	7	27,8
8	Teknik ve Mühendislik Tasarım Hataları	4	7	6	38,9	5	7	5	38,9	5	7	5	38,9
9	Diğer Enerji Türlerindeki Teknolojinin Gelişme Riski	5	2	5	27,8	6	3	5	27,8	7	2	4	27,8
10	İşçi Hataları ve İş Kazaları	6	3	5	27,8	7	3	5	27,8	7	2	5	27,8
11	Plandışı Bakım ve Onarım	4	7	5	38,9	3	8	5	27,8	3	6	4	27,8
12	Periyodik Bakım Süresinin Uzaması	3	6	4	27,8	3	6	5	27,8	3	6	5	27,8
13	İşletme Masraflarının Tahmin Edilenden Yüksek Çıkması	3	8	4	27,8	3	8	5	27,8	3	8	4	27,8
14	İnşaat Süresinin Uzaması	3	7	3	27,8	3	7	4	27,8	3	7	4	27,8
15	Ekipmanların Tedariklerinde Gecikme	5	6	4	27,8	4	5	4	27,8	3	6	4	27,8
16	Doğal Afetler	5	7	6	38,9	4	7	8	50	5	7	6	38,9
17	Yangın ve Patlama	3	7	8	38,9	5	7	6	38,9	4	7	8	50
18	Rüzgârın Değişkenliği	8	5	8	50	-	-	-	-	-	-	-	-
19	Seçilen Türbinin Uygunluğu	2	3	8	27,8	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Keşif Riski	-	-	-	-	7	6	8	50	-	-	-	-
21	Sondaj Riski	-	-	-	-	7	5	7	50	-	-	-	-
22	Güneşin Değişkenliği	-	-	-	-	-	-	-	-	9	5	9	61,1
23	Hırsızlık	-	-	-	-	-	-	-	-	1	8	2	16,7
24	Üçüncü Sahışların Zarar Görmesi	4	5	5	27,8	4	5	6	27,8	5	5	6	27,8
25	Gürültü	8	1	2	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-

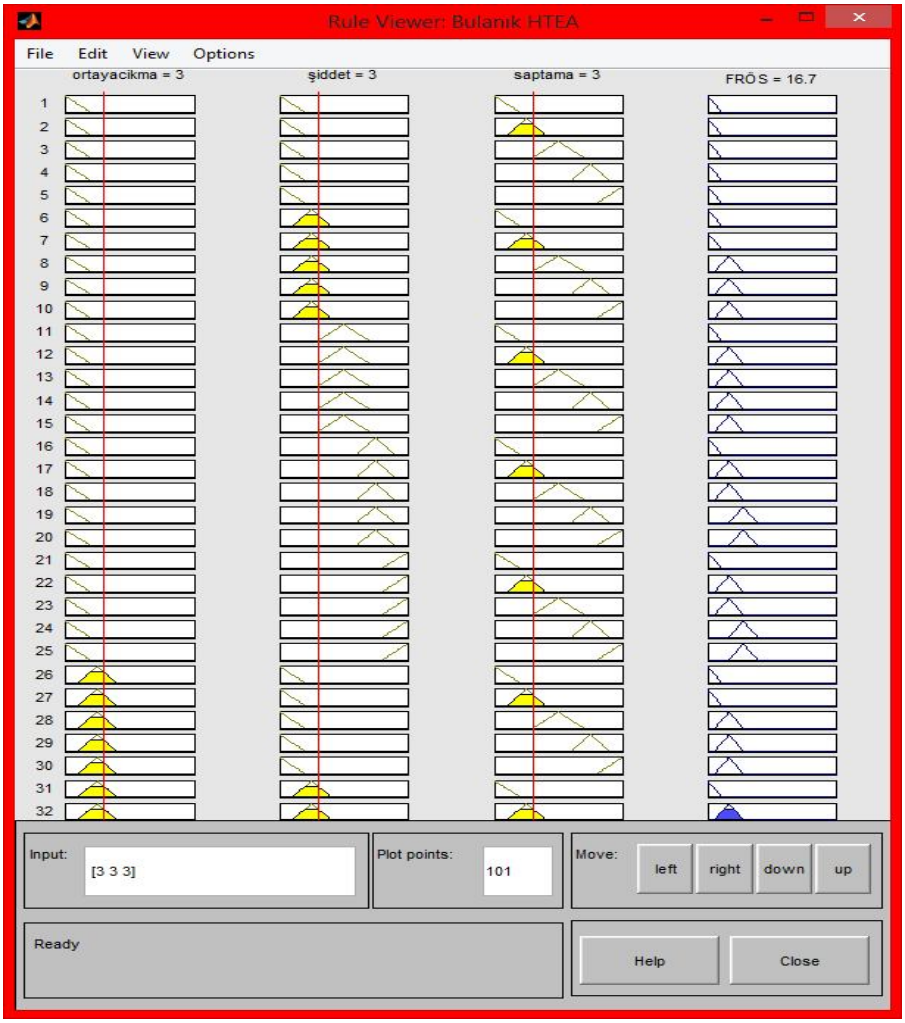
Tablo 5.2. (Devam) Hata türlerinin bulanık FMEA yaklaşımıyla değerlendirilmesi

No	Riskler	Rüzgâr				Jeotermal				Güneş			
		O	D	S	FRÖS	O	D	S	FRÖS	O	D	S	FRÖS
26	Kuş Ölümleri	8	2	1	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Gaz Emisyonları Riski	-	-	-	-	8	2	2	27,8	-	-	-	-
28	Jeotermal Atık Riski	-	-	-	-	8	2	3	27,8	-	-	-	-
29	Atık Riski Ekilebilir	-	-	-	-	-	-	-	-	8	2	4	27,8
30	Alanların azalması	-	-	-	-	-	-	-	-	8	1	2	16,7

Ortaya çıkma, şiddet ve saptama giriş değerleriyle çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren yüzey Şekil 5.5'de, kural tabanı MATLAB görünümü ise Şekil 5.6'da ki gibidir.



Şekil 5.5. Giriş ve Çıkış Değerleri Arasındaki İlişki Yüzeyi



Şekil 5.6. Bulanık Kural Tabanı MATLAB Görünümü

5.2. Sonuçların Yorumlanması

Uygulama sonuçları rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santralleri için ayrı ayrı tablolarda değerlendirmeye alınmıştır. Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te her risk faktörünün sırasıyla RÖS değerleri ve RÖS değerlerinin büyüklüğüne göre oluşturulan sıralaması verilmiştir. Sonraki iki sütunda her risk faktörü için bulanık modelden çıkan RÖS değerleri ve bunların sıralaması verilmiştir. En son sütunda ise sıralama değerlerinin mutlak farkı verilmiştir.

Tablo 5.3. Rüzgâr enerjisi sonuç karşılaştırma tablosu

FMEA No	Riskler	Rüzgâr				
		RÖS	Sıra	FRÖS	Sıra	Fark
18	Rüzgârın Değişkenliği	320	1	50	1	0
16	Doğal Afetler	210	2	38,9	2	0
1	Döviz Riski	175	3	38,9	2	1
8	Teknik ve Mühendislik Tasarım Hataları	168	4	38,9	2	2
17	Yangın ve Patlama	168	4	38,9	2	2
4	Elektrik Fiyat Riski	140	5	38,9	2	3
11	Plandışı Bakım ve Onarım	140	5	38,9	2	3
3	Enflasyon Riski	112	7	38,9	2	5
15	Ekipmanların Tedariklerinde Gecikme	120	6	27,8	3	3
24	Üçüncü Sahışların Zarar Görmesi	100	8	27,8	3	5
7	Kanun ve Mevzuatların Değişmesi	96	9	27,8	3	6
13	İşletme Masraflarının Tahmin Edilenden Yüksek Çıkması	96	9	27,8	3	6
10	İşçi Hataları ve İş Kazaları	90	10	27,8	3	7
2	Kredi Riski	84	11	27,8	3	8
5	Terörizm	84	11	27,8	3	8
12	Periyodik Bakım Süresinin Uzaması	72	12	27,8	3	9
6	İç Karışıklık ve Savaş	70	13	27,8	3	10
14	İnşaat Süresinin Uzaması	63	14	27,8	3	11
9	Diğer Enerji Türlerindeki Teknolojinin Gelişme Riski	50	15	27,8	3	12
19	Seçilen Türbinin Uygunluğu	48	16	27,8	3	13
25	Gürültü	16	17	16,7	4	13
26	Kuş Ölümleri	16	17	16,7	4	13
20	Keşif Riski	-	-	-	-	-
21	Sondaj Riski	-	-	-	-	-
22	Güneşin Değişkenliği	-	-	-	-	-
23	Hırsızlık	-	-	-	-	-
27	Gaz Emisyonları Riski	-	-	-	-	-
28	Jeotermal Atık Riski	-	-	-	-	-
29	Atık Riski	-	-	-	-	-
30	Ekilebilir Alanların azalması	-	-	-	-	-

Tablo 5.4. Jeotermal enerji sonuç karşılaştırma tablosu

FMEA No	Riskler	Jeotermal				
		RÖS	Sıra	FRÖS	Sıra	Fark
20	Keşif Riski	336	1	50	1	0
21	Sondaj Riski	245	2	50	1	1
16	Doğal Afetler	224	3	50	1	2
17	Yangın ve Patlama	210	4	38,9	2	2
8	Teknik ve Mühendislik Tasarım Hataları	175	5	38,9	2	3
7	Kanun ve Mevzuatların Değişmesi	160	6	38,9	2	4
2	Kredi Riski	140	7	38,9	2	5
5	Terörizm	98	10	38,9	2	8
1	Döviz Riski	120	8	27,8	3	5
11	Plandışı Bakım ve Onarım	120	8	27,8	3	5
13	İşletme Masraflarının Tahmin Edilenden Yüksek Çıkması	120	8	27,8	3	5
24	Üçüncü Sahışların Zarar Görmesi	120	8	27,8	3	5
6	İç Karışıklık ve Savaş	105	9	27,8	3	6
10	İşçi Hataları ve İş Kazaları	105	9	27,8	3	6
3	Enflasyon Riski	96	11	27,8	3	8
4	Elektrik Fiyat Riski	96	11	27,8	3	8
9	Diğer Enerji Türlerindeki Teknolojinin Gelişme Riski	90	12	27,8	3	9
12	Periyodik Bakım Süresinin Uzaması	90	12	27,8	3	9
14	İnşaat Süresinin Uzaması	84	13	27,8	3	10
15	Ekipmanların Tedariklerinde Gecikme	80	14	27,8	3	11
28	Jeotermal Atık Riski	48	15	27,8	3	12
27	Gaz Emisyonları Riski	32	16	27,8	3	13
18	Rüzgârın Değişkenliği	-	-	-	-	-
19	Seçilen Türbinin Uygunluğu	-	-	-	-	-
22	Güneşin Değişkenliği	-	-	-	-	-
23	Hırsızlık	-	-	-	-	-
25	Gürültü	-	-	-	-	-
26	Kuş Ölümleri	-	-	-	-	-
29	Atık Riski	-	-	-	-	-
30	Ekilebilir Alanların azalması	-	-	-	-	-

Tablo 5.5. Güneş enerjisi sonuç karşılaştırma tablosu

FMEA No	Riskler	Güneş				
		RÖS	Sıra	FRÖS	Sıra	Fark
22	Güneşin Değişkenliği	405	1	61,1	1	0
17	Yangın ve Patlama	224	2	50	2	0
16	Doğal Afetler	210	3	38,9	3	0
8	Teknik ve Mühendislik Tasarım Hataları	175	4	38,9	3	1

Tablo 5.5. (Devam) Güneş enerjisi sonuç karşılaştırma tablosu

FMEA No	Riskler	Güneş				
		RÖS	Sıra	FRÖS	Sıra	Fark
24	Üçüncü Sahışların Zarar Görmesi	150	5	27,8	4	1
5	Terörizm	126	6	27,8	4	2
1	Döviz Riski	96	7	27,8	4	3
2	Kredi Riski	96	7	27,8	4	3
4	Elektrik Fiyat Riski	96	7	27,8	4	3
13	İşletme Masraflarının Tahmin Edilenden Yüksek Çıkması	96	7	27,8	4	3
12	Periyodik Bakım Süresinin Uzaması	90	8	27,8	4	4
7	Kanun ve Mevzuatların Değişmesi	84	9	27,8	4	4
14	İnşaat Süresinin Uzaması	84	9	27,8	4	5
3	Enflasyon Riski	72	10	27,8	4	6
11	Plandışı Bakım ve Onarım	72	10	27,8	4	6
15	Ekipmanların Tedariklerinde Gecikme	72	10	27,8	4	6
6	İç Karışıklık ve Savaş	70	11	27,8	4	7
10	İşçi Hataları ve İş Kazaları	70	11	27,8	4	7
29	Atık Riski	64	12	27,8	4	8
9	Diğer Enerji Türlerindeki Teknolojinin Gelişme Riski	56	13	27,8	4	9
23	Hırsızlık	16	14	16,7	5	9
30	Ekilebilir Alanların azalması	16	14	16,7	5	9
18	Rüzgârın Değişkenliği	-	-	-	-	-
19	Seçilen Türbinin Uygunluğu	-	-	-	-	-
20	Keşif Riski	-	-	-	-	-
21	Sondaj Riski	-	-	-	-	-
25	Gürültü	-	-	-	-	-
26	Kuş Ölümleri	-	-	-	-	-
27	Gaz Emisyonları Riski	-	-	-	-	-
28	Jeotermal Atık Riski	-	-	-	-	-

Tablo 5.3'te rüzgâr enerjisi için hazırlanan karşılaştırma tablosunda 19, 25 ve 26 numaralı risk faktörleri 13 birim, 9 numaralı risk faktörü 12 birim, 14 numaralı risk faktörü 11 birim, 6 numaralı risk faktörü 10 birim, 12 numaralı risk faktörü 9 birim, 2 ve 5 numaralı risk faktörleri 8 birim, 10 numaralı risk faktörü 7 birim, 7 ve 13 numaralı risk faktörleri 6 birim, 3 ve 24 numaralı risk faktörleri 5 birim, 4, 11 ve 15 numaralı risk faktörleri 3 birim, 8ve 17 numaralı risk faktörleri 2 birim, 1 numaralı risk faktörü 1 birim yer değiştirmiştir. 18 ve 16 numralı risk faktörlerinin sıralamasında yer değiştirme olmamıştır. 18 numaralı risk faktörü en önemli tercih olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 5.4'te jeotermal enerji için hazırlanan karşılaştırma tablosunda 27 numaralı risk faktörü 13 birim, 28 numaralı risk faktörü 12 birim, 15 numaralı risk faktörü 11 birim, 14 numaralı risk faktörü 10 birim, 9 ve 12 numaralı risk faktörleri 9 birim, 3, 4 ve 5 numaralı risk faktörleri 8 birim, 6 ve 10 numaralı risk faktörleri 6 birim, 1, 2, 11, 13 ve 24 numaralı risk faktörleri 5 birim, 7 numaralı risk faktörü 4 birim, 8 numaralı risk faktörü 3 birim, 8 ve 17 numaralı risk faktörleri 2 birim, 21 numaralı risk faktörü 1 birim yer değiştirmiştir. 20 numralı risk faktörünün sıralamasında yer değiştirme olmamıştır. 20 numaralı risk faktörü en önemli tercih olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 5.5'te güneş enerjisi için hazırlanan karşılaştırma tablosunda 9, 23 ve 30 numaralı risk faktörleri 9 birim, 29 numaralı risk faktörü 8 birim, 6 ve 10 numaralı risk faktörleri 7 birim, 3, 11 ve 15 numaralı risk faktörleri 6 birim, 14 numaralı risk faktörü 5 birim, 7 ve 12 numaralı risk faktörleri 4 birim, 1, 2, 4, 12 ve 13 numaralı risk faktörleri 3 birim, 5 numaralı risk faktörü 2 birim, 5 ve 24 numaralı risk faktörleri 1 birim yer değiştirmiştir. 22, 17 ve 16 numaralı risk faktörünün sıralamasında yer değiştirme olmamıştır. 22 numaralı risk faktörü en önemli tercih olarak ortaya çıkmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde petrol ve doğal gaz kaynaklı uluslararası enerji fiyatlarındaki hızlı artış ve atmosferdeki sera gazı birikiminin yarattığı etkiler, dünya kamuoyunda en sık tartışılan ve geleceğe yönelik kaygıları arttıran konuların başında gelmektedir. Bu kaygılar, fosil enerji kaynaklarına dayalı sanayi düzeninin ekonomik açıdan sürdürülebilirliği ve ani küresel iklim değişikliğinin canlılar ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Fosil enerji kaynaklarının söz konusu etkilerine karşı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sonucu ortaya çıkan sera gazı miktarı çok daha düşük seviyelerde ve gerek ilk yatırım maliyetleri, gerekse üretim ve tesis işletme maliyetleri açısından birçok yenilenebilir enerji kaynağı fosil kaynaklarla rekabet edebilir durumdadır. Ayrıca, bu kaynakların hemen hemen her ülkede belirli bir potansiyel düzeyinde bulunması da, ağırlığını yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşturacağı bir enerji ve sanayi düzenini daha mümkün hale getirmektedir.

Yenilenebilir enerji konusundaki istikrarlı yaklaşımlar, uygulanmakta olan teşvik-destek sistemleri ve yeni nesil yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik araştırma, geliştirme ve uygulama çalışmaları ile yatırımların artması, geleceğin enerji düzeninin yenilenebilir enerji merkezli olacağına işaret etmektedir. Bu açıdan bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum fayda getirisi sağlanması için yapılan yatırım faaliyetlerinin taşıdığı risklerin araştırılması ve ortadan kaldırılması gerekmektedir.

Literatürde hata önlemeyi amaçlayan birçok teknik vardır. FMEA bu tekniklerden biri olup oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir. FMEA tekniğinde hata türleri risk düzeylerine göre önceliklendirilmektedir. En yüksek önceliğe sahip hata türünden başlanarak sırasıyla hata türleri için önlemler belirlenirken, söz konusu sistemlerin adım adım iyileştirilmesi beklenmektedir. Geleneksel FMEA hata türlerini sıralamak için risk öncelik sayısını kullanmaktadır. Ancak son zamanlarda risk öncelik sayısının hesaplanması noktasında bazı eleştiriler olduğu görülmektedir.

Ayrıca FMEA tekniği sayısal verilere ihtiyaç duymaktadır. Yeterli verinin bulunmadığı ya da verilerin güvenilir olmadığı durumlarda ortaya çıkma, şiddet ve saptama değerleri uzman görüşüne başvurularak sayısallaştırılmaktadır. Bu tür durumlarda uzman görüşü çoğunlukla az, çok vb. dilsel değişkenler olup belirsizlik içermektedir. Geleneksel FMEA tekniğinin RÖS'ün hesaplanması, veri yetersizliği durumlarında uzman görüşüne başvurulması ve dilsel ifadelerin belirsizlik içermesi gibi eksiklikleri sebebiyle, daha sağlıklı sonuçlar vereceği düşünülerek verilerin bulanık mantık yaklaşımı ile işlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjilerinin, 5 ana başlık altında sınıflandırılan risk faktörlerinin FMEA ve bulanık yaklaşımlı FMEA tekniği kullanılarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bulanık modelde giriş bulanık kümeleri için 5'er alt küme, çıkış bulanık kümesi için 9 alt küme tanımlanarak, 125 adet kuraldan oluşan kural tabanı oluşturulmuştur. MATLAB programı kullanılarak risk öncelikleri belirlenmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır.

FMEA ve bulanık yaklaşımlı FMEA tekniğinin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilen uygulamanın sonuçları değerlendirildiğinde; FMEA tekniğinde kullanılan parametrelere ait değerlerin uzman görüşleri alınarak oluşturulması, uzmanın tecrübesi göz önünde bulundurulduğunda, sözel tanımlamaya bağlı sapma ihtimalini ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmanın istatistiki verilere dayanarak FMEA tekniği için tekrarlanması bu ihtimali ortadan kaldıracaktır. Bulanık yaklaşımlı FMEA tekniğinde ise kural tanımlama işleminin ileri düzeyde uzmanlık gerektiren bir işlem olması sebebiyle optimum çözümün daha fazla uzman görüşü alınarak sağlanacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] Ağaçbiçer G., Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye ekonomisine katkısı ve yapılan swot analizler, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çanakkale, 2010, 298012.

[2] Ergür Ö., Rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006, 181784.

[3] Ünal E., Yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji piyasaları, Uzmanlık Tezi, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK), Ankara, 2006.

[4] Cingil İ., Yenilenebilir enerji kaynakları ve ekonomik etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 237163.

[5] Adıyaman Ç., Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Niğde, 2012, 322308.

[6] Ataman A., Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2007, 208041.

[7] Altaş İ. H., Fotovoltaj güneş pilleri: eşdeğer devre modelleri ve günışığı ile sıcaklığın etkileri, *Aylık 3e (Enerji, Elektrik, Elektromekanik) Dergisi*, 1998, **46**, 86-91.

[8] Karadağ H. İ., Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisinin önemi ve rüzgâr türbini tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 238997.

[9] Gülay A. N., Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin geleceği ve Avrupa Birliği ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2008, 220247.

[10] Türkiye Çevre Vakfı, *Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları*, Türkiye Çevre Vakfı Yayınları, Ankara, 2006.

[11] Akova İ., *Yenilenebilir enerji kaynakları*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2008.

[12] Farret A. F., Simoes M. G., *Integration of alternative sources of energy*, 1st ed., A John Willey and Sons Inc. Publications, USA, 2006.

[13] Cassedy S. E., *Prospects for sustainable energy* a *critical assessment*, 1st ed., Cambridge University Press, UK, 2000.

[14] Kılıç N., *Dünya'da ve Türkiye'de enerji sektörüne bakış ve jeotermal enerji potansiyelinin irdelenmesi*, İzmir Ticaret Odası Yayını, İzmir, 1998.

[15] Dağıstan H., Yenilenebilir enerji ve jeotermal kaynaklarımız, *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi*, Ankara, Türkiye, 27-30 Kasım 2006.

[16] Eniş A., Enerji politikaları ile yerli, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları, *Türkiye VI. Enerji Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 10-12 Aralık 2003.

[17] Uğurlu Ö., Türkiye'de çevresel güvenlik bağlamında sürdürülebilir enerji politikaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2006, 191385.

[18] Çelik S., Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığının azaltılmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2012, 320327.

[19] Ertürk O., Enerji kaynağı olarak hidrojen ve temiz enerjilerin AB muktesebatı ve uyum sürecindeki yeri, *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi*, Ankara, Türkiye, 27-30 Kasım 2006.

[20] Aslan Ö., Hidrojen ekonomisine doğru, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2007, **11**, 283-298.

[21] Kaya T., Türkiye'de su gücü ve küçük hidroelektrik santraller, *Nevşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2011, **1**, 207-238.

[22] Akdoğar M., Enerji kaynakları ve Doğu Karadeniz'in hidroelektrik potansiyel dengesi etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006, 182980.

[23] Koltukcu H., Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından SWOT analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 2010, 257251.

[24] Uygur İ., Demirci R., Saruhan H., Özkan A., Belenli İ., Batı Karadeniz bölgesindeki dalga enerjisi potansiyelinin araştırılması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2006, **12**, 7-11.

[25] Ablabekova A., İktisadi etkinlik açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlar ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2008, 261860.

[26] Sayın S., Yenilenebilir enerjinin ülkemiz yapı sektöründe kullanımının önemi ve yapılarda güneş enerjisinden yararlanma olanakları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006, 180293.

[27] Akkaya S., Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi ve bir rüzgar enerjisi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007, 212133.

[28] Fay J., Golomb D., *Energy and the environment*, 2nd ed., Oxford University Press, Newyork, 2002.

[29] Bülbül İ., Tipik bir karargahta yenilenebilir enerji uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 233049.

[30] Erdal L., Enerji arz güvenliğini etkileyen faktörler ve yenilenebilir enerji kaynakları alternatifi, Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın, 2011, 312358.

[31] Erdal L., Karakaya E., Enerji arz güvenliğini etkileyen ekonomik, siyasî ve coğrafî faktörler, *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi,* 2012, **31**, 107-136.

[32] Elkind J., *Energy security: economics, politics, strategies and implications*, 1st ed., Brookings Institution Press, Washington, 2010.

[33] Apak S., Tunalı E., İnşaat sektöründe nakit yönetimi, *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 2007, **36**, 50-59.

[34] Usta Ö., *İşletme finansı ve finansal yönetim*, Detay Yayıncılık, Ankara, 2004.

[35] Durak M., Yenilenebilir enerji yatırımları için finansman modelleri: proje ve sendikasyon kredisi, *Aylık 3e (Enerji, Elektrik, Elektromekanik) Dergisi*, 2005, **128**, 29-40.

[36] Price A. D. F., *Financing international projects*, 1st ed., International Labour Organization, Geneva, 1995.

[37] Sayım F., Aydın V., Hizmet sektörü özellikleri ve sistematik olmayan risklerin sektör menkul kıymetleri ile etkileşimine dair teorik bir çalışma, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2011, **29**, 245-262.

[38] Nuttall W. J., Manz D. L., A new energy security paradigm for the twenty-first century, *Technological Forecasting & Social Change*, 2008, **75**, 1247-1259.

[39] Belyi A. V., New dimensions of energy security of the enlarging EU and their impact on relations with Russia, *Journal of European Integration*, 2003, **25**, 351-369.

[40] Aydoğan S., Enerji sorunu, avrupa birliğinde arayışlar ve Türkiye, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 241997.

[41] Çolak İ., Bayındır R., Sefa İ., Demirbaş Ş., Ergen H., Alternatif enerji kaynaklarının kullanımı, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.

[42] Kulözü N., Yenilenebilir enerji politikaları: Fransa örneği, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.

[43] Köksal B., Türkiye'nin enerji politikası içerisinde bileşik ısı-güç üretiminin yeri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223793.

[44] Mutlu E., Türkiye'de yenilenebilir enerji ekonomisi ve Ankara iline ait SWOT analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2013, 333246.

[45] Erdal L., Türkiye'de yenilenebilir enerji enerji yatırımları ve istihdam yaratma potansiyeli, *Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 2012, **4**, 171-181.

[46] Yumurtacı Z., Bekiroğlu N., Yenilenebilir enerji kaynakları ve Teknolojileri, *Uluslararası Eko Teknolojiler ve Ekolojik Yerleşimler Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 14-15 Kasım 2005.

[47] Korkutan N., İş sağlığı ve iş güvenliği maliyetlerinin bina inşaatı toplam maliyetlerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 293836.

[48] Moubray J., *Reliability centered maintenance*, 2nd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann Lineacre House, Oxford, 1997.

[49] Kuldaşlı D. E., Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik temelli bakım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251025.

[50] İn M., Enerji iletim hatlarının periyodik kontrol ve bakım işlerinin hizmet alımı yoluyla karşılanmasının fizibilitesinin analiz edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta, 2008, 215727.

[51] Aslan H., Kömüre dayalı elektrik santrallerinde verim ve kapasite kullanım oranı düşüklüğünün nedenleri ve bunların yükseltilmeleri için alınması gerekli tedbirler, *TMMOB 1. Enerji Sempozyumu,* Ankara, Türkiye, 12-14 Kasım 1996.

[52] Yenen S., Kobilerde maliyet muhasebesi sistemi ve bir işletme uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Muğla, 2011, 288152.

[53] Bilginoğlu F., Hedef maliyetleme: yeni bir yönetim aracı, *İstanbul Üniversitesi Yönetim Dergisi*, 1995, **21**, 13-15.

[54] Yumurtaci Z., Toprak K., An economic analysis of hydrogen production using wind power, *International Journal of Renewable Energy Research*, 2011, **1**, 11-17.

[55] Erdem H., Türkiye'de alternatif santral kapasitelerinin ve bölgelere göre dağıtımlarının optimizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 184498.

[56] Kısar A., Rüzgâr santrallerinde işletme ve bakım, *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 21-24 Kasım 2013.

[57] Can G., Tedarik zinciri yönetimi ve maliyetlere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2011, 279420.

[58] Ergünay, O., Afet yönetiminde kurumsal yapılanma ve mevzuat nedir? Nasıl olmalıdır?, *CHP İstanbul Deprem Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 20 Eylül 2008.

[59] Ertürkmen C., Afet yönetimi, Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2006.

[60] Sungur Z., Doğal afet kaynaklı risk olgusunun petrokimya ve akrilik kimya sanayi sektörlerinde sosyolojik açıdan değerlendirilmesi: Kocaeli ve Yalova uygulamaları, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2004, 143825.

[61] Tierney K., Impacts of recent disasters on businesses: The 1993 midwest floods and the 1994 northridge earthquake, *The National Center for Earthquake Engineering Research Conference*, Newyork, USA, March 19 1995.

[62] Dahlhamer J., Tierney K., Rebounding from disruptive events: Business recovery following the northridge earthquake, *The Annual Meeting of the North Central Sociological Association*, Ohio, April 12-14 1996.

[63] Arpacıoğlu Ü., Yangın olgusu ve yüksek yapılarda yangın güvenliği, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004, 184525.

[64] Nurbay N., Çınar A., Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.

[65] Adım C., Rüzgar enerjisi, Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 2009.

[66] Onur M., Satman A., Jeotermal sistemlerin potansiyellerinin belirlenmesinde ve sürdürülebilir işletilmesinde rezervuar mühendisliği çalışmaları ve önemi, *Türkiye'de Jeotermal Kaynaklar Arama ve Uygulamalar Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 8-9 Kasım 2012.

[67] Edwards L. M., Chilingar G. V., Reike H. H., Fertl W. H., *Handbook of geothermal energy*, Gulf Publishing Company, USA, 1982.

[68] Gupta H., Roy S., *Geothermal energy: An Alternative Resource for The 21st Century*, Elsevier Science, Holland, 2006.

[69] Şeyhanlıoğlu M., Hırsızlık suçu, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2010, 265466.

[70] İşeri E., Özen C., Türkiye'de sürdürülebilir enerji politikaları kapsamında nükleer enerjinin konumu, *İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 2012, **47**, 161-180.

[71] Şahiner S., Türkiye Cumhuriyet'i enerji politikasına Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği enerji politikaları bağlamında genel bir bakış ve elektrik enerjisi özelleştirme politikası ile çevresel ve hukuksal alt yapı yaklaşımları, *11. Enerji Kongresi*, İzmir, Türkiye, 21-23 Ekim 2009.

[72] Göktepe G., Ekşi K., Demircan S., Doğu Karadeniz'de enerji-çevre etkileşimi kararlara katılımda sivil toplum kuruluşlarının rolü, *11. Enerji Kongresi*, İzmir, Türkiye, 21-23 Ekim 2009.

[73] Fıçıcı F., Dursun B., Gökçöl C., Rüzgar enerji sistemlerinden kaynaklanan gürültünün incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2007, **1**, 63-71.

[74] Kocabıyık M., Rüzgar enerji santralleri ve ÇED, *2.Rüzgar Enerjisi Sempozyumu*, Samsun, Türkiye, 4-5 Haziran 2009.

[75] Çakın A., Gökçen G., Eroğlu A., Jeotermal uygulamaların çevresel etkileri: Balçova jeotermal bölgesel ısıtma sistemi örneği, *VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 23-26 Kasım 2005.

[76] El-Wakil M. M., *Power plant technology*, McGraw-Hill Inc., USA, 1984.

[77] Dağıstan H., Yenilenebilir enerji ve jeotermal kaynaklarımız, *10. Enerji Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-30 Kasım 2006.

[78] Dinç F., Jeotermal kaynaklardan çıkan atık suların genotoksik özelliklerinin bitkisel test sistemleri ile araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 2005, 170707.

[79] Badruk M., Jeotermal enerji uygulamalarında çevre sorunları, *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 8-11 Ekim 2003.

[80] Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V., Environmental impacts from the solar energy technologies, *Energy Policy*, 2005, **33**, 289-296.

[81] Varınca K., Varank G., Güneş kaynaklı farklı enerji üretim sistemlerinde çevresel etkilerin kıyaslanması ve çözüm önerileri, *Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, İçel, Türkiye, 24-25 Haziran 2005.

[82] Köroğlu T., Teke A., Bayındır Ç., Tümay M., Güneş paneli sistemlerinin tasarımı, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 2010, **439**, 98-104.

[83] Durhan D., Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 200029.

[84] Çeber Y., Hata türü ve etkileri analizi yönteminin (FMEA) üretim sektöründe uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2010, 261520.

[85] Down M., Brozowski L., Younis H., Benedict D., Feghali J., Schubert M., Brender R., Gruska G., Vallance G., Krasich M., Haughey W., *Potential failure mode and effect analysis (FMEA)*, 4th ed., Chrysler LLC Ford Motor Company General Motors Corporation, Germany, 2008.

[86] Welborn C., Boraiko C., Proactive safety engage employees in failure modes and effects analysis to improve safety, *American Society of Safety Engineers*, 2009, **10**, 37-41.

[87] Scipioni A., Saccarola G., Centazzo A., Arena F., FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food, *Food Control*, 2002, **13**, 495-501.

[88] Musubeyli E. N., Ürünün önemli kalite karakteristiklerinin belirlenmesinde tasarım hata türü ve etkileri analizi ile kalite evinin birlikte kullanılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1999, 84511.

[89] Akın B., *ISO 9000 uygulamasında işletmelerde hata türü ve etkileri analizi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1998.

[90] Stamatis D. H., *Failure mode and effects analysis: FMEA from theory to execution*, 2nd ed., ASQC Quality Press, Wisconsin, 2003.

[91] Aran G., Kalite iyileştirme sürecinde hata türü etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tokat, 2006, 189162.

[92] Bayar N., İstanbul Boğazı'nda deniz trafik güvenliğinin risk tabanlı bulanık AHP ve FMEA yöntemleri ile incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 295808.

[93] Sellappan N., Sivasubramanian R., Modified method for evaluation of risk priority number in design FMEA*, ICFAI Journal of Operations Management*, 2008, *7*, 43-45.

[94] Pentti H., Atte H., *Failure mode and effect analysis of software-based automation systems*, STUK, Finland, 2002.

[95] Abdelgawad M., Fayek A. R., Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP, *Journal of Consruction Engineering and Management*, 2010, **136**, 1028-1036.

[96] Erginel N. M., Tasarım hata türü ve etkileri analizinin etkinliği için bir model ve uygulaması, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 1999, **3**, 17- 26.

[97] Shahin A., Integration of FMEA and the kano model: An exploratory examination, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2004, **21**, 731-746.

[98] Tay K. M., Lim C. P., Fuzzy FMEA with a guide rules reduction system for priorization of failures, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2006, **23**, 1047-1066.

[99] Yılmaz A., Hata türü ve etki analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997, 66801.

[100] Eryürek Ö. F., Tanyaş M., Hata türü ve etkileri analizi yönteminde maliyet odaklı yeni bir karar verme yaklaşımı, *İtü Dergisi*, 2003, **6**, 31-40.

[101] Yılmaz B. S., Hata türü ve etki analizi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2000, **2**, 133-150.

[102] Bolat T., *Toplam kalite yönetimi (Konaklama işletmelerinde uygulanması)*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 2000.

[103] Algın A., Hata türü ve etkileri analizi ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 233070.

[104] Bluvband Z., Grabov P., Failure analysis of FMEA, R*eliability and Maintainability Symposium*, Fort Worth, USA, January 26-29 2009.

[105] Düzgüner E., Ürün geliştirme sürecinde önleyici kalite güvence: FMEA metodu ve bu metodun bir sanayi işletmesindeki uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 2002, 122086.

[106] Çelikdemir H., Bir otomasyon hattında hata türü ve etkileri analizi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 322980.

[107] Şamur S. M., Otomotiv servislerinde FMEA ve FTA hata önleme tekniklerinin uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198353.

[108] Mcdermott R. E., Mikulak R. J., Beauregard R., *The basic of FMEA*, 2nd ed., Productivity Press, Newyork, 2009.

[109] Bertsche B., *Reliability in automotive and mechanical engineering*, 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Stuttgart, 2008.

[110] Pillay A., Wang J., Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning, *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, **79**, 69-85.

[111] Baysal M. E., Canyılmaz E., Eren T., Otomotiv yan sanayiinde hata türü ve etkileri analizi, *Teknoloji*, 2002, **5**, 83-90.

[112] Gül B., Kalite yönetiminde hata türü ve etkileri analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Ünivesitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001, 114657.

[113] Chang D. S., Sun K. P., Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2009, **26**, 629-643.

[114] Erdal C., Bulanık mantık ve firmaların başarı kriterlerinin tanımlanarak bulanık mantık ile ölçülmesinin bir uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kırıkkale, 2008, 261365.

[115] Sari M., Murat Y. S., Kirabali M., Fuzzy modelling approach and aplications, *Journal of Natural and Applied Science Institute of Dumlupinar University*, 2005, **9**, 77-92.

[116] Aktaş H., Çağman N., Bulanık ve yaklaşımlı kümeler, *Çankaya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 2005, **3**, 13-25.

[117] Şen Z., *Mühendislikte bulanık mantık ile modelleme prensipleri*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2004.

[118] Zimmermann H. J., *Fuzzy sets, decision making and expert systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1987.

[119] Kosko B., *Fuzzy Thinking: The new science of fuzzy logic*, Hyperion Publishers, USA, 1993.

[120] Işık T. A., Bütünleşik üretim planlamasında bulanık mantık yaklaşımı ve bir uygulama, Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın, 2011, 312314.

[121] Pehlivan İ., Bulanık mantık kontrolörler ile klasik PID kontrolörlerin karşılaştırılması ve bir bulanık mantık kontrolör tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2001, 105505.

[122] Özkan M., *Bulanık hedef programlama*, Ekin Kitabevi, Bursa, 2003.

[123] Baykal N., Beyan T., *Bulanık mantık ilke ve temelleri*, Bıçaklar Kitabevi, Ankara, 2004.

[124] Bilgin Ö., Hata türü ve etkileri analizinde bulanık mantık uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197922.

[125] Zadeh L. A., Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, **3**, 338-353.

[126] Zadeh L. A., Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decisions process, *IEEE Transaction on Systems*, 1973, **3**, 28-44.

[127] Mamdani E. H., Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proceedings of IEEE*, 1974, **121**, 1585-1588.

[128] Yasunobu S., Miyamoto S., *Automatic train operation system by predictive fuzzy control*, Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1985.

[129] Yamakawa T., Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system, *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, **32**, 161-180.

[130] Larkin I. L., A fuzzy logic controller for aircraft flight control, *Proceedings of IEEE*, 1984, **23**, 894-897.

[131] Steinberg M., Development and simulation of an F/A-18 fuzzy logic automatic carrier landing system, *Proceedings of IEEE 2nd International Fuzzy Systems Conference*, 1993, **2**, 797-802.

[132] Dufrene W. R., AI techniques in uninhabited aerial vehicle flight, *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, **19**, 8-12.

[133] Doitsidis L., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kontitsis M., A framework for fuzzy logic based UAV navigation and control, *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* 2004, **4**, 4041-4046.

[134] Türkbey O., Çok amaçlı makine sıralama problemi için bir bulanık güçlü metot, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2003, **3**, 81-98.

[135] Klir J. G., Yuan B., *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

[136] Cemrek F., Senturk S., Terlemez L., Investigation of OECD countries according to CO_2 emissions by fuzzy cluster analysis, *E-Journal of New World Sciences Academy Physical Sciences*, 2010, **5**, 52-69.

[137] Şentürk S., Deney planlamasında bulanık mantık yaklaşımı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006, 181558.

[138] Bojadziev G., Bojadziev M., *Fuzzy sets, fuzzy logic, applications*, World Scientific Publishing Company, London, 1995.

[139] Öztürk T., Hata türü ve etkileri analizinde bulanık mantık kullanarak bir kamu hastanesinin satın alma sürecinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 233150.

[140] Tomsovic K., A fuzzy linear programing approach to the reactive power/voltage control problem, *Transaction on Power Systems*, 1992, **7**, 287-293.

[141] Nguyen T. H., Walker A. T., *A first course in fuzzy logic*, Chapman&Hall/CRC, Newyork, 2005.

[142] Görgülü Ö., Bulanık mantık (Fuzzy logic) teorisi ve tarımda kullanım olanakları üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2007, 200205.

[143] Yakupoğlu T., Özdemir N., Ekberli İ., Toprak erozyonu çalışmalarında bulanık mantık uygulamaları, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2008, **2**, 121-130.

[144] Yen J., Langari R., *Fuzzy logic: Intelligence, control and information*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.

[145] Guimaraes A. C.F., Lapa C. M. F., Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems, *Applied Soft Computing*, 2007, **1**, 17-28.

[146] Pappis P. C., Siettos C. I., *Fuzzy reasoning*, Springer US, Newyork, 2005.

[147] Demirel O., Bulanık mantık, *Bilim ve Teknik*, 1999, **385**, 78-80.

[148] Çiftçibaşı T., Otomasyon, otomatik kontrol, akıllı kontrol, bilimsel tanımlamaları ve uygulama sınırlamaları, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi*, 2001, **410**, 1-4.

[149] Tanaka K., *An introduction to fuzzy logic for practical applications*, Springer Verlag, Newyork, 1997.

[150] Perfilieva I., Analytical theory of fuzzy if-then rules with compositional rule of inference, *Springer Berlin Heidelberg*, 2007, **215**, 173-191.

[151] Aytaç E., .Kalite iyileştirme sürecinde bulanık mantık yaklaşımı ile hata türü ve etkileri analizi ve uygulama örneği, Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın, 2011, 312361.

[152] Bolat Y., Matlab-simulink + pic tabanlı bulanık mantık denetleyici tasarımı ve gerçek zamanlı sıcaklık kontrolü uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185063.

[153] Özkan İ. A., Tornalamada kesme kuvvetlerinin ve takım ucu sıcaklığının bulanık mantık ve yapay sinir ağı teknikleriyle tahmin edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006, 183446.

[154] Mendel J. M., *Uncertain rule-based fuzzy logic systems, introductions and new directions*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.

[155] Jang J. S. R., Sun C. T., *Mizutani E., neuro-fuzzy and soft computing*, Prentice Hall, New Jersey, 1997.

[156] Efendigil T., Müşteri odaklı sistemler için yapay sinir ağı ve bulanık çıkarım tabanlı bir karar destek sistemi yaklaşımı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 179720.

[157] Sağlam G., Hiyerarşik bulanık mantık PID kontrolörleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223433.

[158] Yadav O. M., Choudhary N., Bilen C., Complex system reliability estimation methodology in the absence of failure data, *Quality and Reliability Engineering International*, 2008, **7**, 745-764.

[159] Xu K., Tang L. C., Xie M., Ho S. L., Zhu M. L., Fuzzy assessment of FMEA for engine systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, **75**, 17-29.

[160] Sharma K. R., Kumar D., Kumar P., Systematic falure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2005, **9**, 986-1004.

EKLER

Ek- A. Kural Tabanı

No	Ortaya Çıkma	Şiddet	Saptama	RÖS
1	çok düşük	çok düşük	çok düşük	çok düşük
2	çok düşük	çok düşük	düşük	çok düşük
3	çok düşük	çok düşük	orta	çok düşük
4	çok düşük	çok düşük	yüksek	çok düşük
5	çok düşük	çok düşük	çok yüksek	çok düşük
6	çok düşük	düşük	çok düşük	çok düşük
7	çok düşük	düşük	düşük	çok düşük
8	çok düşük	düşük	orta	çok düşük-düşük
9	çok düşük	düşük	yüksek	çok düşük-düşük
10	çok düşük	düşük	çok yüksek	çok düşük-düşük
11	çok düşük	orta	çok düşük	çok düşük
12	çok düşük	orta	düşük	çok düşük-düşük
13	çok düşük	orta	orta	çok düşük-düşük
14	çok düşük	orta	yüksek	çok düşük-düşük
15	çok düşük	orta	çok yüksek	çok düşük-düşük
16	çok düşük	yüksek	çok düşük	çok düşük
17	çok düşük	yüksek	düşük	çok düşük-düşük
18	çok düşük	yüksek	orta	çok düşük-düşük
19	çok düşük	yüksek	yüksek	düşük
20	çok düşük	yüksek	çok yüksek	düşük
21	çok düşük	çok yüksek	çok düşük	çok düşük
22	çok düşük	çok yüksek	düşük	çok düşük-düşük
23	çok düşük	çok yüksek	orta	çok düşük-düşük
24	çok düşük	çok yüksek	yüksek	düşük
25	çok düşük	çok düşük	çok düşük	çok düşük
26	çok düşük	çok yüksek	çok yüksek	düşük
27	düşük	çok düşük	çok düşük	çok düşük
28	düşük	çok düşük	düşük	çok düşük
29	düşük	çok düşük	orta	çok düşük-düşük
30	düşük	çok düşük	yüksek	çok düşük-düşük
31	düşük	çok düşük	çok yüksek	çok düşük-düşük
32	düşük	düşük	çok düşük	çok düşük
33	düşük	düşük	düşük	çok düşük-düşük
34	düşük	düşük	orta	çok düşük-düşük
35	düşük	düşük	yüksek	düşük
36	düşük	düşük	çok yüksek	düşük
37	düşük	orta	çok düşük	çok düşük-düşük
38	düşük	orta	düşük	çok düşük-düşük
39	düşük	orta	orta	düşük

No	Ortaya Çıkma	Şiddet	Saptama	RÖS
40	düşük	orta	yüksek	düşük
41	düşük	orta	çok yüksek	düşük
42	düşük	yüksek	çok düşük	çok düşük-düşük
43	düşük	yüksek	düşük	düşük
44	düşük	yüksek	orta	düşük
45	düşük	yüksek	yüksek	düşük-orta
46	düşük	yüksek	çok yüksek	düşük-orta
47	düşük	çok yüksek	çok düşük	çok düşük-düşük
48	düşük	çok yüksek	düşük	düşük
49	düşük	çok yüksek	orta	düşük
50	düşük	çok yüksek	yüksek	düşük-orta
51	düşük	çok yüksek	çok yüksek	orta
52	orta	çok düşük	çok düşük	çok düşük
53	orta	çok düşük	düşük	çok düşük-düşük
54	orta	çok düşük	orta	çok düşük-düşük
55	orta	çok düşük	yüksek	çok düşük-düşük
56	orta	çok düşük	çok yüksek	çok düşük-düşük
57	orta	düşük	çok düşük	çok düşük-düşük
58	orta	düşük	düşük	çok düşük-düşük
59	orta	düşük	orta	düşük
60	orta	düşük	yüksek	düşük
61	orta	düşük	çok yüksek	düşük
62	orta	orta	çok düşük	çok düşük-düşük
63	orta	orta	düşük	düşük
64	orta	orta	orta	düşük
65	orta	orta	yüksek	düşük-orta
66	orta	orta	çok yüksek	düşük-orta
67	orta	yüksek	çok düşük	çok düşük-düşük
68	orta	yüksek	düşük	düşük
69	orta	yüksek	orta	düşük-orta
70	orta	yüksek	yüksek	orta
71	orta	yüksek	çok yüksek	orta
72	orta	çok yüksek	çok düşük	çok düşük-düşük
73	orta	çok yüksek	düşük	düşük
74	orta	çok yüksek	orta	düşük-orta
75	orta	çok yüksek	yüksek	orta
76	orta	çok yüksek	çok yüksek	orta-yüksek
77	yüksek	çok düşük	çok düşük	çok düşük
78	yüksek	çok düşük	düşük	çok düşük-düşük
79	yüksek	çok düşük	orta	çok düşük-düşük
80	yüksek	çok düşük	yüksek	düşük
81	yüksek	çok düşük	çok yüksek	düşük
82	yüksek	düşük	çok düşük	çok düşük-düşük
83	yüksek	düşük	düşük	düşük
84	yüksek	düşük	orta	düşük
85	Yyüksek	düşük	yüksek	düşük-orta

No	Ortaya Çıkma	Şiddet	Saptama	RÖS
86	yüksek	düşük	çok yüksek	düşük-orta
87	yüksek	orta	çok düşük	çok düşük-düşük
88	yüksek	orta	düşük	düşük
89	yüksek	orta	orta	düşük-orta
90	yüksek	orta	yüksek	orta
91	yüksek	orta	çok yüksek	orta
92	yüksek	yüksek	çok düşük	düşük
93	yüksek	yüksek	düşük	düşük-orta
94	yüksek	yüksek	orta	orta
95	yüksek	yüksek	yüksek	orta-yüksek
96	yüksek	yüksek	çok yüksek	yüksek
97	yüksek	çok yüksek	çok düşük	düşük
98	yüksek	çok yüksek	düşük	düşük-orta
99	yüksek	çok yüksek	orta	orta
100	yüksek	çok yüksek	yüksek	yüksek
101	yüksek	çok yüksek	çok yüksek	yüksek-çok yüksek
102	çok yüksek	çok düşük	çok düşük	çok düşük
103	çok yüksek	çok düşük	düşük	çok düşük-düşük
104	çok yüksek	çok düşük	orta	çok düşük-düşük
105	çok yüksek	çok düşük	yüksek	düşük
106	çok yüksek	çok düşük	çok yüksek	düşük
107	çok yüksek	düşük	çok düşük	çok düşük-düşük
108	çok yüksek	düşük	düşük	düşük
109	çok yüksek	düşük	orta	düşük
110	çok yüksek	düşük	yüksek	düşük-orta
111	çok yüksek	düşük	çok yüksek	orta
112	çok yüksek	orta	çok düşük	çok düşük-düşük
113	çok yüksek	orta	düşük	düşük
114	çok yüksek	orta	orta	düşük-orta
115	çok yüksek	orta	yüksek	orta
116	çok yüksek	orta	çok yüksek	orta-çok yüksek
117	çok yüksek	yüksek	çok düşük	düşük
118	çok yüksek	yüksek	düşük	düşük-orta
119	çok yüksek	yüksek	orta	orta
120	çok yüksek	yüksek	yüksek	yüksek
121	çok yüksek	yüksek	çok yüksek	yüksek
122	çok yüksek	çok yüksek	çok düşük	düşük
123	çok yüksek	çok yüksek	düşük	orta
124	çok yüksek	çok yüksek	orta	orta-çok yüksek
125	çok yüksek	çok yüksek	yüksek	yüksek-çok yüksek

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Yorukoglu H.**, Ozkale C., Ozcan B., Celik C., The analysis of the risks of renewable energy resources by using fuzzy fmea technique, *International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics*, Sarajevo, May 18-22 2013.

[2] Aytekin G. F., **Yörükoğlu H.**, Akman G., Kısıtlar teorisi yaklaşımı ile kurumsal bilgi teknolojileri yönetimi talep sistemlerinin iyileştirilmesi, *Organizasyon ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 2012, **4**, 39-49.

ÖZGEÇMİŞ

Hülya YÖRÜKOĞLU 1986 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2004 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. Ocak 2010'da Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.