
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ŞEBEKEYE BAĞLI MELEZ ENERJİ SİSTEMİNDE ÜRETİM VE DEPOLAMA KARARLARI İÇİN MODEL ÖNERİSİ

Ahmet AKTAŞ

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet AKTAŞ

14/09/2021

ŞEBEKEYE BAĞLI MELEZ ENERJİ SİSTEMİNDE ÜRETİM VE DEPOLAMA KARARLARI İÇİN MODEL ÖNERİSİ

(Doktora Tezi)

Ahmet AKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Kalabalıklaşan nüfus ve gelişen teknoloji dünya genelinde enerji talebinin artmasına sebep olmuştur. Artan talebi karşılayabilmek için, ekonomik ve çevre dostu yeni enerji kaynakları aranmaktadır. Yenilenebilir kaynaklar, ekonomik ve çevre dostu enerji sunmaları nedeniyle bu arayış için uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Ancak, yenilenebilir kaynakların iklimsel koşullar başta olmak üzere çeşitli sebeplerle değişken miktarlarda enerji sunmaları enerji kesintisi ve enerji kalitesi düşüklüğü gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için ortaya atılan melez yenilenebilir enerji sistemleri kavramı yenilenebilir kaynakların şebeke bağlantısı ile veya şebeke bağlantısı olmadan birlikte kullanımını ifade etmektedir. Bu tez çalışmasında, güneş ve rüzgâr enerjisi açısından potansiyele sahip bir ilçedeki enerji sistemi ele alınmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi ile enerji depolama durumlarının var olduğu şebekeye bağlı melez yenilenebilir enerji sisteminde saatlik detay seviyesinde enerji üretimi, depolama ve satın alma kararlarını belirleyecek üç amaçlı karma tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Modelin çözümünden önce enerji sisteminde yer alacak enerji depolama teknolojisinin seçimi için tereddütlü bulanık dilsel çok kriterli analiz uygulanmış ve volan kullanımının enerji ağına uygun olduğu tespit edilmiştir. Bütün bir yılın verileri için çözümü elde etmenin hesaplama zorluğu yüksek olduğundan, yılın dört mevsimini yansıtan dört haftalık temsili bir veri seti üzerinden modelin çözümü çok amaçlı en iyileme yaklaşımlarından Referans Nokta yöntemi ile bulunmuştur. Daha sonra, modelde dikkate alınan kapasite, talep ve maliyet değerlerindeki değişimi dikkate alan sekiz senaryo için yapılan çözümler çok kriterli karar verme yaklaşımlarından ELECTRE-TRI ile iyi, makul veya kötü olarak sınıflandırılmıştır. Çözüm sonuçları elektrik enerjisi ihtiyacının yarısına yakınının yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre önerilen modelin, Ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltılmasında yol gösterici olabileceği değerlendirilmektedir.

Bilim Kodu	:	90620
Anahtar Kelimeler	:	Melez yenilenebilir enerji sistemleri, karma tamsayılı programlama, çok amaçlı en iyileme, çok kriterli karar verme
Sayfa Adedi	:	100
Danışman	:	Prof. Dr. Mehmet KABAK

MODEL PROPOSAL FOR GENERATION AND STORAGE DECISIONS OF A GRID CONNECTED HYBRID ENERGY SYSTEM

(Ph. D. Thesis)

Ahmet AKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Due to the crowded population and developing technology, energy demand increased in the world. In order to satisfy the increasing demand, new economical and environmentally friendly energy resources are sought. Renewable resources are seen as an appropriate solution in this manner, as they provide economical and environmentally friendly energy. On the other hand, the renewable resources provide variable amounts of energy due to various reasons, especially climatic conditions, can cause some problems such as energy shortages and low energy quality. The concept of hybrid renewable energy systems, which was put forward to eliminate this disadvantage, refers to the combined use renewable resources with or without grid connection. In this thesis, energy system in a district with potential in terms of solar and wind energy is considered. A three-objective mixed integer programming model has been proposed to determine the energy production, storage and purchasing decisions at hourly detail level in the grid-connected solar-wind hybrid renewable energy system with energy storage option. Prior to the solution of the model, hesitant fuzzy linguistic multi-criteria analysis was applied for the selection of the appropriate energy storage technology within the energy system and it was found that the use of flywheels was appropriate. Since the computational complexity of obtaining the solution to the problem for the data of a whole year is high, the solution of the model was obtained by using the Reference Point method, one of the multi-objective optimization approaches, over a four-week data set which represents the demand and capacity characteristics of four seasons in a year. Then, the solutions obtained for eight scenarios in which changes in capacity, demand and cost values in the model are considered, are classified as good, reasonable or bad by multi-criteria decision making method of ELECTRE-TRI. The results of the solution show that almost half of the electrical energy demand can be satisfied by renewable energy resources. These results demonstrate that the proposed model can be a guide for reducing foreign dependence on energy for our country.

Science Code	:	90620
Key Words	:	Hybrid renewable energy system, mixed integer programming, multi-objective optimization, multi-criteria decision making
Page Number	:	100
Supervisor	:	Prof. Dr. Mehmet KABAK

TEŞEKKÜR

Doktora sürecimde akademik ve kişisel gelişimime katkı sağlayan, çalışmalarımı sabır ve ilgi ile destekleyen danışman hocam Prof. Dr. Mehmet KABAK'a saygılarımı ve şükranlarımı sunarım.

Tez döneminde ilerleyişimi ilgiyle takip edip tezimin olgunlaşması için değerli görüşlerini aktaran Tez İzleme Komitesi üyesi hocalarım Doç. Dr. Mehmet ATAK ve Dr. Öğr. Üyesi Haluk AYGÜNEŞ'e bu süreçte sağladıkları katkılar için teşekkür ederim. Tez savunma sınavı üyesi olarak tezimi değerlendiren Prof. Dr. Serpil EROL ve Prof. Dr. Ergün ERASLAN hocalarıma da değerli görüşleri için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının bir kısmında araştırmacı olarak bulunduğum Coimbra Üniversitesi'ne davet eden, görüşleriyle ve çalışma tarzı ile ufkumu genişleten Prof. Dr. Carlos Henggeler ANTUNES'e katkıları için şükranlarımı sunarım. Bu çalışma dönemi için 2214-A Yurtdışı Doktora Sırası Araştırma Programı kapsamında finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na sunulan imkânlardan ötürü teşekkür ederim.

Akademik kariyerimin daha erken safhalarında araştırma yapmayı öğrenmemde ve sevmemde katkılarını hiçbir zaman unutamayacağım Yıldız Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Selçuk ÇEBİ'ye ve yüksek lisans tez danışmanım Mersin Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. İzzettin TEMİZ'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Beni dünyaya getiren ve yetiştiren anneme, her zaman bana güvenen ve yanımda olan aileme, tanıştığımız günden son günlerine kadar her koşulda ellerinden gelen en iyi şekilde destek olan rahmetli kayınvalideme ve rahmetli kayınpederime şükranlarımı sunarım.

Doktora sürecimde fark ettiğim en önemli şey, sürekli çalışma, üretme ve bir önceki yaptığının daha iyisini yapma gerekliliğiydi. Her gün bir öncekinden daha iyi şeyler yapabilmek için en büyük motivasyon kaynağım olan, uzun doktora sürecimin gerginliğini benimle beraber yaşayan ve gün bittiğinde yanlarında olmanın en büyük mutluluk olduğunu her gün tekrar tekrar hissettiğim kıymetli eşim Billur'a ve canım oğlum Mehmet Orhan'a varlıklarıyla hayatımı güzelleştirdikleri için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. MELEZ YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ 5

3. LİTERATÜR TARAMASI 9

3.1. Melez Enerji Sistemlerinde Çok Kriterli Karar Verme Uygulamaları 9

3.2. Melez Enerji Sistemlerinde En İyileme Uygulamaları 12

4. ÖNERİLEN KARAR MODELİ 21

4.1. Problem Tanımı 21

4.2. Problemin Matematiksel Modeli 23

4.3. Problemin Çözümü için İzlenen Yol 26

5. KULLANILAN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ 29

5.1. Tereddütlü Bulanık Dilsel Terimler Kümesi Ve Tereddütlü Bulanık VIKOR Melez Yaklaşımı 29

5.1.1. Tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerine dayalı grup karar verme yaklaşımı 30

5.1.2. Tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemi 33

5.2. Çok Amaçlı En İyileme 37

5.2.1. Çok amaçlı en iyileme için çözüm yaklaşımları 39

Sayfa

5.2.2. Referans nokta yöntemi 40

5.4. ELECTRE-TRI 46

6. SAYISAL ÇALIŞMALAR 49

6.1. Enerji Depolama Teknolojilerinin Değerlendirilmesi 49

6.1.1. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi 50

6.1.2. Alternatiflerin değerlendirilmesi 59

6.2. Üretim, İletim, Depolama ve Satın Alma Kararlarının Belirlenmesi 64

6.3. Senaryo Analizi 70

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 81

KAYNAKLAR 85

EKLER 92

EK-1. GAMS Kodu 93

EK-2. Model doğrulamasında kullanılan parametre değerleri ve elde edilen çözüm sonuçları 97

ÖZGEÇMİŞ 98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması 6

Çizelge 5.1. Kriterler arası kıyaslamalar için dilsel terimler kümesi 31

Çizelge 6.1. Enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesinde kullanılan kriterler 50

Çizelge 6.2. Ana kriterler için uzmanların değerlendirmeleri 53

Çizelge 6.3. K_1 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri 53

Çizelge 6.4. K_2 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri 53

Çizelge 6.5. K_3 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri 53

Çizelge 6.6. K_4 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri 54

Çizelge 6.7. Ana kriterlerin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri 54

Çizelge 6.8. K_1 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri ... 54

Çizelge 6.9. K_2 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri ... 54

Çizelge 6.10. K_3 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri . 55

Çizelge 6.11. K_4 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri . 55

Çizelge 6.12. Ana kriterler için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler 55

Çizelge 6.13. K_1 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler 56

Çizelge 6.14. K_2 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler 56

Çizelge 6.15. K_3 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler 56

Çizelge 6.16. K_4 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler 56

Çizelge 6.17. Ana kriterler için aralık vektörü ve ağırlık değerleri 57

Çizelge 6.18. K_1 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri 57

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.19. K_2 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri 57

Çizelge 6.20. K_3 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri 57

Çizelge 6.21. K_4 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri 58

Çizelge 6.22. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmede kullanılacak kriter ağırlıkları 58

Çizelge 6.23. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmede kullanılan dilsel değişkenler 59

Çizelge 6.24. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirme matrisi 60

Çizelge 6.25. Alternatiflere ait skor ve varyans değerleri 60

Çizelge 6.26. İdeal ve anti-ideal çözümler 61

Çizelge 6.27. İdeal çözüme uzaklık değerleri 62

Çizelge 6.28. Fayda değerleri 63

Çizelge 6.29. Değerlendirme ölçüt değerleri 63

Çizelge 6.30. Parametre değerleri 68

Çizelge 6.31. Tek amaçlı modeller için çözüm sonuçları 69

Çizelge 6.32. Referans noktaya uzaklık yöntemi için çözüm sonuçları 70

Çizelge 6.33. Türkiye'de kurulu güç ve net elektrik tüketimi değerleri 72

Çizelge 6.34. Senaryolara göre çözüm sonuçları 74

Çizelge 6.35. Senaryo değerlendirme için karar matrisi 75

Çizelge 6.36. Değerlendirmede kullanılan karar matrisi 76

Çizelge 6.37. Sınıf profilleri 76

Çizelge 6.38. Parametre değerleri 76

Çizelge 6.39. Senaryolar ile sınıf profillerinin uyum değerleri 77

Çizelge 6.40. Senaryolar ile sınıf profillerinin uyumsuzluk değerleri 78

Çizelge 6.41. Senaryolar ile sınıf profillerinin güvenilirlik değerleri 79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Ele alınan enerji ağının temsili görünümü 23

Şekil 4.2. Çalışmada izlenen yol 27

Şekil 5.1. *n* kriter ve *m* alternatif içeren bir karar problemi için hiyerarşik yapı 31

Şekil 5.2. L_1, L_2 ve L_∞ metrikleri için z^*'a aynı uzaklıktaki noktaların gösterimi 41

Şekil 5.3. L_1, L_2 ve L_∞ metriklerine göre Z bölgesinin z^*'a en yakın noktalarının gösterimi 41

Şekil 5.4. L_1^λ, L_2^λ ve L_∞^λ metrikleri için z^*'a aynı uzaklıktaki noktaların gösterimi 42

Şekil 5.5. L_∞^λ ve $L_\infty^{\lambda,p}$ metrikleri için z^*'dan eşit uzaklıktaki noktaların gösterimi 42

Şekil 5.6. Uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının en küçüklenmesi 44

Şekil 5.7. Ağırlıklı Chebyshev ve uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının gösterimi 44

Şekil 5.8. Referans noktaya uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının en küçüklenmesi 45

Şekil 5.9. Referans noktanın çözüm bölgesinin içinde olduğu durumun gösterimi 46

Şekil 5.10. Uzatılmış Chebyshev metriğinin tam sayılı programlama gösterimi 46

Şekil 6.1. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması 49

Şekil 6.2. Enerji depolama teknolojisi belirleme problemi için hiyerarşik yapı 52

Şekil 6.3. Konut talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri 65

Şekil 6.4. Ticari bina talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri ... 65

Şekil 6.5. Toplumsal bina talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri 66

Şekil 6.6. Endüstri talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri 66

Şekil 6.7. Bölgenin saat bazında güneş enerjisi potansiyeli 67

Şekil 6.8. Bölgede gerçekleşen rüzgâr hızı 67

Şekil 6.9. Yenilenebilir enerji birim üretim maliyetlerindeki değişim 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.10. İncelenen senaryolar 72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
$	Amerikan doları
GWh	Gigawatt saat
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
MW	Megawatt

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AHP	Analytic Hierarchy Process
CO_2	Karbondioksit
ELECTRE	Elemination and Choice Translating Reality
GAMS	General Algebric Modelling System
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve değişen hayat standartlarına bağlı olarak enerji ihtiyacı her geçen gün daha da artmaktadır. Enerji ihtiyacındaki artış, enerjiyi elde edebilmek için gerekli fosil yakıt tüketimini de aynı yönde etkilemektedir. Tüketimin fazlalaşması fosil yakıtlarla ilgili iki büyük soruna çözüm aranmasını gerekli kılmaktadır. Bu sorunlar, fosil yakıt kaynaklarının çok yakın gelecekte tükenmek üzere olması ve bu yakıtların çevreye verdiği zararların boyutudur.

Fosil yakıt kaynaklarının tükenmek üzere olmasına çözüm olarak, enerji ihtiyacının karşılanmasında nükleer enerjiden yararlanmak düşünülmüştür. Nükleer santraller birim üretim maliyeti açısından oldukça avantajlı ve yüksek miktarda enerji arzı sağlıyor olmasına karşın çevreye verebileceği zararlar açısından son derece risklidir. Nitekim 1986 yılında Ukrayna'da Çernobil Nükleer Santrali'nde ve 2011 yılında Japonya'da Fukuşima Nükleer Santrali'nde farklı nedenlerden meydana gelen kazaların yol açtığı çevresel etkiler dünya genelinde nükleer santrallere yönelik endişeyi artırmıştır. Nükleer enerjinin yerini alabilecek, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir yeni enerji kaynakları aranmasını zorunlu kılmıştır.

Yenilenebilir enerji, bu noktada uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Yenilenebilir enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerjinin türleri arasında güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi, biokütle enerjisi ve dalga enerjisi sayılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları kendini tekrarlayan doğal süreçlerden elde edildiği için tükenmeyen ve çevre dostu enerji kaynakları olarak görülmekte ve kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Olumlu bu yönlerine karşın, yenilenebilir kaynakların çoğunlukla iklimsel koşullara bağlı olarak değişen miktarlarda enerji sağlıyor olmaları sebebiyle büyük ölçekli enerji sistemlerinde enerji ihtiyacını karşılamada yetersiz oldukları görülmüştür. Yenilenebilir kaynaklardan enerji talebinin karşılanmaya çalışıldığı enerji sistemlerinde, enerji dalgalanmaları, arz yetersizliği, enerji kalitesinin düşüklüğü gibi çeşitli sorunlarla karşılaşılmaktadır.

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ile ilgili bahsedilen bu sorunlara çözüm olarak farklı yenilenebilir kaynakların birlikte kullanıldığı melez yenilenebilir enerji sistemleri kavramı ortaya çıkmıştır. Bu sistemlerde bir kaynağın enerji arzı sağlamada yetersiz kaldığı durumda başka bir kaynak devreye girerek enerji arzını sağlamaktadır. Böylece yenilenebilir kaynakların talebi karşılaması sürdürülebilir bir şekilde devam edebilmektedir.

Araştırmalarda melez yenilenebilir enerji sistemlerinin, kendine yetebilen sistemler ve şebekeye bağlı sistemler olarak iki temel sınıf altında ele alındığı görülmektedir. Kendine yetebilen sistemler, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarını ve/veya enerji depolama teknolojilerini içeren sistemler iken, şebekeye bağlı sistemlerde bu bileşenlere ek olarak şebekeden alınan enerji ile enerji ihtiyacı karşılanmaktadır.

Melez yenilenebilir enerji sistemlerinin tam anlamıyla faydalı olabilmesi için, enerji sistemi ile ilgili üretim, iletim, depolama ve satın alma kararları gibi operasyonel kararların en iyilenmesi gerekir. Ancak, enerji sistemi içinde dikkate alınması gereken faktörlerin ve hesaplanması gereken parametre sayısının fazla olması sebebiyle enerji sistemlerine yönelik en iyileme çalışmaları hesaplama zorluğu yüksek bir iştir. Kapasite ve talep açısından mevsimsel değişkenliklerin etkilerini görebilmek açısından en az bir yıllık planlama dönemi boyunca ve gün içinde oluşan değişkenliklerin etkilerini görebilmek açısından da bir saat veya daha kısa zaman aralıklarını yansıtacak detay seviyesinde en iyileme çalışması yapılması gerekir.

Melez yenilenebilir enerji sistemlerine yönelik en iyileme çalışmalarında, enerji sisteminin durumlarını ifade eden matematiksel modellerden yararlanılır. Bu modellerde, üretilen, iletilen, depolanan, satılan ve satın alınan enerji miktarlarını ifade eden sürekli karar değişkenlerinin yanında, sistemde yer alan üretim ve depolama tesislerinin çalışma kararları gibi çeşitli durumları ifade eden birtakım ikili değişkenlere de ihtiyaç duyulmaktadır. İkili karar değişkenleri de içeren bu tür matematiksel modeller, yöneylem araştırması biliminde karma tam sayılı programlama modelleri olarak tanımlanmaktadır. Karma tam sayılı programlama modellerinde ikili karar değişkeni sayısının artışıyla birlikte problemin en iyi çözümünü elde etmek için hesaplama zorluğu da artmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yenilenebilir kaynakların bulunduğu ilçe büyüklüğünde bir şebekeye bağlı melez bir enerji ağı modellenmiştir. Bu melez enerji ağında, yenilenebilir kaynaklardan

güneş ve rüzgâr enerjisi ile enerji depolama tesislerinin var olduğu kabul edilmiştir. İlçedeki yenilenebilir enerji potansiyelini kullanarak, enerjide dışa bağımlılığın en az olacağı duruma karşılık gelen üretim, dağıtım ve satın alma kararları çeşitli senaryolar altında belirlenmeye çalışılmıştır. Önerilen model kapsamında, ilk olarak şebekeye bağlı melez yenilenebilir enerji sistemini destekleyecek enerji depolama teknolojilerinin seçimi tereddütlü bulanık sayılar temelli çok kriterli karar verme yaklaşımı ile yapılmıştır. Bu adımda seçilen uygun teknolojiye ait veriler en iyileme çalışmasına eklenmiş, planlama dönemi boyunca saatlik detay seviyesinde her bir yenilenebilir kaynaktan üretilerek talep noktalarına ve depolama tesislerine aktarılan enerji miktarları ile depolanmış enerjiden deşarj edilen veya şebekeden çekilen enerji miktarları belirlenmiştir. Ekonomik, çevresel ve teknik üç amaç fonksiyonu açısından en iyi çözüm, çok amaçlı en iyileme yöntemlerinden Referans Nokta yöntemi ile bulunmuştur. Kapasite, talep ve maliyet verilerindeki olası değişimlere yönelik sekiz senaryo için çok amaçlı en iyileme sonucunda elde edilen çözümler, bu senaryolarda tanımlanan yenilenebilir enerji kapasitesi ile alakalı ve modelde dikkate alınmamış veriler birleştirilerek çok kriterli karar verme tekniklerinden ELECTRE-TRI ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, her biri senaryo gerçekleştiğinde elde edilen çözüm değerlerinin iyi, makul veya kötü olarak sınıflandırılması sağlanmıştır.

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, melez yenilenebilir enerji sistemleri tanıtılmış, üçüncü bölümde bu sistemlerle alakalı karar problemlerinde çok kriterli karar verme tekniklerinin ve en iyileme yöntemlerinin uygulamaları üzerine yayınlanmış çalışmalar üzerine bir literatür incelemesi sunulmuştur. Tez çalışmasında ele alınan karar problemi dördüncü bölümde tanımlanarak, problemin çözümü için kullanılan yöntemlerin açıklaması beşinci bölümde verilmiştir. Yapılan sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve senaryo analizi sonuçları altıncı bölümde sunulmuştur. Önerilen modelden ve senaryo analizinden elde edilen sonuçların özeti ve gelecek çalışmalara yönelik önerilerin paylaşıldığı yedinci bölüm ile tez çalışması tamamlanmıştır.

2. MELEZ YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

Enerji elde etmek için kullanılan klasik kaynakların tükenmeye başlaması ve enerji dönüşümünde oluşturdukları atıkların çevreye zararları önemli problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle yeniden enerji sağlayabilen kaynakların enerji elde etmek için kullanılması uygun bir çözüm olarak görülmüştür.

Yeniden enerji sağlayabilen kaynaklardan türetilen enerji yenilenebilir enerji olarak tanımlanmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları enerjinin ana kaynağına göre; güneş, dünya ve ay kaynaklı olarak üç grupta incelenmektedir [2]. Birincil enerji kaynakları açısından ise, yenilenebilir enerji su, rüzgâr, güneş, biokütle, yer merkezi ısısı ve ay çekimi gücü şeklinde gruplandırılabilir.

Su enerjisi, suyun hareketinden elde edilen enerjinin elektriğe dönüştürülmesini sağlayan hidroelektrik santrallerde elde edilen elektrik enerjisini ifade eder [3]. Hidroelektrik santrallerin rezervuarında biriken su, hareket ederek türbini döndürür ve etkin hale gelen jeneratörle elektrik enerjisi elde edilir. Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklardan en fazla güç sağlayanı hidroelektriktir. Ülkemizde potansiyeli güçlü olan bir diğer önemli yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir [4]. Kollektörler veya solar hücreler kullanılarak toplanan günışığı, ısı veya elektrik enerjisi elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yolla elektrik üretimi için, toplanan günışığına aynalarla odaklanılır ve günışığının, jeneratörü elektrik üretmek için çalıştıracak yüksek yoğunlukta bir ısı kaynağına dönüşmesi sağlanır. Güneş enerjisi ısıtma, soğutma, aydınlatma ve diğer enerji talepleri için kullanılabilir. Dünyanın atmosferle arasındaki ısı farkından kaynaklanan hava akımı olarak tanımlanan rüzgâr [3], Türkiye için önemli potansiyele sahip bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Hava akımı hızlı olduğu zaman, havanın içerdiği parçacıkların hareketinin de hızlanması ile hava kinetik enerjiye dönüşür. Havanın bu özelliği, rüzgâr enerjisi olarak isimlendirilir. Rüzgârın elektriğe dönüşümü için rotor kısmında birleşen pervaneye benzeyen iki veya üç adet bıçaklı rüzgâr türbinleri kullanılır. Yer kabuğunun farklı derinliklerinde bulunan sıcak su ve sıcak kayalar şeklindeki enerji kaynağı jeotermal enerji olarak tanımlanır [4]. Bu enerji, ısı pompaları veya elektrik üreten endüstriyel tesisler yardımıyla çıkarılabilir. Jeotermal enerji de, Türkiye'nin kıymetli enerji kaynaklarından biri olarak gösterilmektedir [4]. Biokütle ise, tahta, ekin, hızlı büyüyen ağaç

ve çimler, tarım ve orman atıkları ile şehir ve endüstriyel atıklarından çıkan organik bileşenler gibi farklı türleri olan ısı, yakıt ve elektrik elde etmek için kullanılan enerji kaynağıdır [3]. Bu tür kaynaklar, Türkiye'de bolca bulunduğundan önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olabileceği düşünülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin sınıflandırma Çizelge 2.1'de verilmiştir:

Çizelge 2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması [2]

Ana Kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
Güneş	Su	Buharlaşma, Yağış	Su Güç Tesisleri (Hidroelektrik Santralleri)	Elektrik Enerjisi
	Rüzgâr	Atmosferdeki hava hareketi	Rüzgâr Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
		Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
	Güneş Işınları	Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompaları	Isı Enerjisi
		Güneş Işınları	Kolektörler	Isı Enerjisi
			Solar Hücreler (Güneş Pilleri - Fotovoltaikler)	Elektrik Enerjisi
	Biokütle	Biokütle Üretimi	Isı Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
			Dönüşüm Tesisleri	Yakıt Enerjisi
Dünya	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Ay	Ay Çekimi Gücü	Gel – Git Olayı	Gel – Git Güç Santralleri	Elektrik Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle iklim koşullarına bağlı olarak değişken miktarlarda enerji arzı sağlayabilmektedir [5]. Bununla birlikte, yenilenebilir kaynakların yükü besleme açısından düşük kaliteli enerji sağlaması da önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bu problemlerin çözümünün yenilenebilir enerji kaynakları ile mevcut kaynakların birlikte kullanımı sonucu elde edilebilecek alternatif bir enerji kaynağı olduğu düşünülmektedir. Birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanıldığı enerji sistemleri, melez enerji sistemleri olarak isimlendirilmektedir. Enerji üretiminde farklı kaynakların bir arada kullanıldığı melez bir sistem oluşturmanın temel nedeni, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliklerinin olmaması ve tek başlarına yükü besleyememeleridir.

Melez enerji sistemleri, içerdikleri kaynak türleri açısından kendine yeten sistemler ve şebekeye bağlı sistemler olarak iki alt başlık altında incelenmektedir. Yalnızca yenilenebilir kaynaklar içeren kendine yeten melez enerji sistemleri, evler, binalar veya çiftlikler gibi yükün çok büyük olmadığı sistemler için uygulanabilir kalmaktadır. Büyük ve sürekli güç gerektiren büyük ölçekli yapılarda enerji arzı sağlamak için başvurulan şebekeye bağlı enerji sistemlerinde ise, enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynakları yeterli gelmemektedir. Bu tür sistemlerde yenilenebilir kaynaklar şebekeden desteklenerek güç sürekliliği sağlanmaktadır. Her iki tür için, dizel jeneratörler ve enerji depolama teknolojileri gibi ek sistem bileşenlerinin de sisteme dâhil edildiği uygulamalar görmek mümkündür.

Enerji sistemleri üzerine yapılan araştırmalarda, birbirini tamamlayan yenilenebilir kaynakların birlikte kullanımının sistem güvenilirliğini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir [6]. Sistem bileşenlerinin boyutlarının, üretim ve iletim kararlarının belirlenmesinde iyi seçimler yapıldığı takdirde, enerji sistemi maliyetinde uygulama bölgesinin iklim özelliklerine göre azalmalar elde edilebileceği veya çok az bir maliyet artışıyla karşılaşılanabileceği değerlendirilmiştir.

Melez enerji sistemleri pek çok yönden fayda sağlasa da sistemde yer alan farklı bileşenlerden ötürü tek kaynak tipi içeren enerji sistemlerine göre daha karmaşık yapıdadır. Karmaşık yapısından ötürü, melez enerji sistemlerinde en düşük maliyetle enerji arzını sağlayan ve çevreye en düşük düzeyde zarar veren sistemi belirleyecek en iyileme çalışmasının hesaplama zorluğu daha yüksektir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Melez enerji sistemleri araştırmacılar tarafından son 25 yılda ele alınan konulardan biridir. Bu bölümde, melez enerji sistemleri üzerine yapılmış çok kriterli karar verme ve en iyileme tekniklerini içeren çalışmalara yönelik bir inceleme sunulmuş ve incelemeden elde edilen gözlemler doğrultusunda tez çalışmasında izlenecek yol kararlaştırılmıştır.

3.1. Melez Enerji Sistemlerinde Çok Kriterli Karar Verme Uygulamaları

Çok kriterli karar verme teknikleri, enerji sistemlerine yönelik kararların belirlenmesine yönelik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok kriterli karar verme ile sonlu sayıda alternatif içeren, birden fazla sayıda ve birbiriyle çelişen kriter içeren karar problemlerine çözüm geliştirilir [7]. 2016 yılında yayınlanmış ve 1983 – 2014 yılları arasında yayınlanan 183 çalışmanın ele alındığı bir literatür taraması çalışmasında [8], enerji alanında karar verme uygulamalarının zamanın ilerleyişi ile birlikte araştırmacıların ilgisini daha fazla çektiği ifade edilmiştir.

Enerji alanında öncelik belirleme tabanlı, üstünlüğe dayalı, ağırlıklı ortalama temelli, bulanık mantık temelli çok kriterli karar verme teknikleri ve bunların birlikte kullanıldığı yaklaşımların uygulanması yoluyla karar problemlerine çözüm aranmaktadır [8].

Enerji alanında, çok kriterli karar verme tekniklerinin uygulandığı karar problemleri arasında enerji politikası analizi, elektrik gücü planlama, teknoloji seçimi ve proje değerlendirme ve çevresel etki analizi yer almaktadır [9]. Melez enerji sistemleri üzerine yapılmış çeşitli çok kriterli karar verme uygulamaları aşağıda özetlenmiştir.

Girit adasında sürdürülebilir bir enerji planı oluşturabilmek için enerji üretim kaynak seçenekleri PROMETHEE I (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations) yöntemi ile incelenmiştir [10]. Yalnızca rüzgâr enerjisinin kullanıldığı duruma ek olarak, güneş ve biokütle kaynaklarının da sisteme eklenmesi ile oluşacak durumları ifade eden dört seçenek yatırımcı ve merkezi hükümet bakış açılarından değerlendirilmiştir.

Güneş ve rüzgâr kaynaklarından oluşan melez enerji sistemi için Türkiye'nin batısında en uygun tesis yeri Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı bulanık çok kriterli karar verme modeli ile belirlenmiştir [11]. Yalnızca güneş ve yalnızca rüzgâr enerjisine dayalı enerji üretimi için sayısal haritalar üzerinde belirlenen yerlerin birleştirilmesi bulanık mantık yardımıyla gerçekleştirilerek uygun konumlar yine harita üzerinde gösterilmiştir.

Türkiye'de yalnızca iki adet şebeke bağlantılı güneş enerjisi santrali olduğunu ve bu tip yeni tesislerin kurulabileceği yerlerin belirlenmesi için yapılan bir çalışmada, çok kriterli aksiyometrik tasarımdan faydalanılarak yedi aday konum değerlendirilmiştir [12].

Kıbrıs'ta şebekeye bağlı güneş enerjisi ve otonom güneş enerjisi sistemlerinin finansmanına yönelik üç enerji teşvik politikası seçeneğinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme tekniklerinden yararlanılmıştır [13]. AHP, PROMETHEE ve ELECTRE yöntemleri ile yapılan değerlendirmelerin her birisi şebekeye bağlı güneş enerjisi sisteminin yatırım maliyetinin %55'inin sübvanse edildiği daha düşük fiyattan alım garantisi sunulması politikasını en iyi seçenek olarak sunmuştur.

Yunanistan'ın Taşöz adasında yenilenebilir kaynaklara dayalı bölgesel enerji planlaması için çok kriterli karar verme tekniklerinden REGIME yöntemi kullanılmıştır [14]. Rüzgâr, güneş ve biokütle kaynakları ve bu kaynakların birlikte kullanıldığı altı farklı seçeneğin değerlendirilmesi sonucunda, uygulama bölgesinde tek kaynak tercih edilmesi durumunda rüzgâr enerjisinin, kaynakların birlikte kullanıldığı melez bir sistem oluşturulması durumunda ise rüzgâr ve biokütle kaynaklarının beraber kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.

Kendine yeten melez enerji sisteminin çok amaçlı optimizasyonu için evrimsel algoritmalar yardımıyla belirlenen Pareto çözümler çok kriterli karar verme yardımıyla değerlendirilmiştir [15]. Optimizasyon modelinin amaç fonksiyonları değerlendirme kriterleri olarak dikkate alındığı çok kriterli analizde, ağırlık değerlerinin değişimine bağlı olarak farklı senaryolar türetilmiş ve alternatif çözümler bulanık TOPSIS (Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution) tekniği ile sıralanmıştır.

Güneş ve rüzgâr kaynaklarından melez enerji sisteminin kurulacağı yerin seçimi için AHP yöntemine dayalı üç alt hedef, beş ana kriter ve 23 alt kriter içeren bir karar modeli önerilmiştir [16]. Çin'de bir ile kurulacak 40,5 MW gücündeki bir santralin yer seçimi üzerine bir vaka çalışması üzerinde model uygulanmış, alt hedeflerin önem derecelerindeki değişime yönelik duyarlılık analizi yapılarak sonuçlardaki değişimler yorumlanmıştır.

Litvanya'da enerji üretiminde kullanılacak enerji üretim teknolojilerinin önceliklendirilmesi için AHP ve ARAS (Additive Ratio Assessment) yöntemlerine dayalı melez bir karar modeli geliştirilmiştir [17]. Modelde teknolojilere ilişkin ekonomik, teknik, çevresel, toplumsal ve politik yönleri ifade eden faktörler göz önünde bulundurulmuş ve teknolojilerin sıralaması gerçekleştirilmiştir.

Sri Lanka'nın Hambanthota bölgesinde bulunan şebekeye bağlı güneş, rüzgâr kaynakları ile depolama tesisleri içeren elektrik ağının matematiksel modeline ε-baskınlık tekniği ile elde edilen çözümler bulanık TOPSIS tekniği yardımıyla amaç fonksiyonlarının farklı ağırlık değerlerini içeren senaryolar için değerlendirilmiştir [18].

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin değerlendirilmesi için SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve MULTIMOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis plus the full Multiplicative form) yöntemlerini birleştiren bir yaklaşım önerilmiştir [19]. İran'da geliştirme aşamasında olan bir proje için en uygun teknolojinin belirlenmesine yönelik bir vaka çalışması, önerilen yaklaşım ile incelenmiştir.

Düşük gelirli haneler için uygun melez enerji sisteminin seçimi için HOMER yazılımı ile yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) ve TOPSIS yöntemlerini birleştiren bir yaklaşımla değerlendirilmiştir [20]. Değerlendirme sonuçları güneş, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan melez sistemin hanenin talebine en uygun sistem olduğunu ortaya koymuştur.

Yenilenebilir kaynaklar içeren melez bir mikro şebekeyi desteklemek için kullanılabilecek depolama teknolojilerinin seçimi için AHP – TOPSIS çok kriterli karar verme tekniği ile değerlendirilmiştir [21]. Mikro şebekenin matematiksel modelinin kuş sürüsü en iyilemesi sezgisel yöntemi ile çözümünden beş farklı depolama seçeneği elde edilen sonuçlar değerlendirilerek en iyi depolama teknolojisinin lityum bataryalar olduğu belirlenmiştir.

Fosil yakıta dayalı gücün %70 civarında olduğu Hindistan için yerel yenilenebilir kaynakların temiz elektriğe ulaşmak için uygun olabileceğini düşünen Das ve diğerleri [22], kırsaldaki bir köy için en uygun yenilenebilir kaynak kombinasyonunu belirlemek için HOMER simülasyonu sonuçlarının değerlendirildiği bir TOPSIS incelemesinden faydalanmışlardır.

Şebeke bağlantısının olmadığı kıyı bölgeler için en uygun melez enerji sisteminin belirlenmesi için CRITIC ve CODAS (Combinative Distance-based Assessment) yöntemlerinin birleştirildiği bir yaklaşım önerilmiştir [23]. Bangladeş'te bir bölge için yapılan uygulamada altı sistem seçeneği 13 kriter temelinde değerlendirilmiş ve güneş, batarya, biyogaz ve dizel jeneratör bileşenlerine ait sistem en uygun seçenek olarak bulunmuştur.

Yine Bangladeş'te şebeke bağlantısı olmayan kıyı bölgeler için en uygun melez enerji sistemini arayan bir başka çalışmada [24], sistem seçenekleri için HOMER yazılımı ile elde edilen simülasyon sonuçları BWM (Best Worst Method) ile CODAS yönteminin değiştirilmiş bir hâlini içeren bir yaklaşım ile değerlendirilmiştir.

Melez enerji sistemleri üzerine çok kriterli karar verme çalışmalarında enerji politikası belirleme, enerji üretim kaynaklarının sıralanması ve santral yerinin seçimi konularına değinildiği görülmüştür. Enerji sisteminin çok amaçlı optimizasyonu ile elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesi için çok kriterli karar vermeden yararlanılması da ilgi çekici uygulama örnekleri olarak dikkat çekmektedir.

3.2. Melez Enerji Sistemlerinde En İyileme Uygulamaları

Yenilenebilir kaynakların önemli yatırım maliyetleri gerektirmesi, yenilenebilir kaynaklar içeren melez enerji sistemlerinin tasarımı ve uzun dönemli planlanması için alınacak kararların doğru verilmesini zorunlu kılmaktadır.

Melez yenilenebilir enerji sistemleri ile ilgili en iyileme çalışmaları büyük çoğunlukla sistem maliyeti ile ilgilenmektedir. Bununla birlikte gaz emisyonları ve yükün karşılanmayan kısmını en küçüklemek de araştırmacıların dikkate aldıkları en iyileme yönleri arasındadır. Ele alınan sistem bileşenlerine bağlı olarak da çeşitli kısıtların dikkate alınması

gerekmektedir. Bu kısıtlar arasında yenilenebilir kaynaklardan üretim miktarlarının belirlenmesi ve enerji depolama ile ilgili teknik kısıtlarla birlikte değerlendirmede göz önüne alınan çevresel faktörler ve şebeke bağlantısına ilişkin varsayımlara bağlı kısıtlayıcılar modelde yer almalıdır [25].

2015 yılında yapılan bir literatür taraması çalışmasında [26], güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanıldığı melez enerji sistemleri için gerekli optimizasyon verileri sunulmuş, sistem güvenilirliği ve maliyetle ilgili çeşitli ölçütler tanıtılmıştır. Ayrıca sistem bileşenlerinin modellenmesinde kullanılan kısıtları tanımlayan matematiksel ifadeler verilmiştir. Melez enerji sistemlerinin optimizasyonu için kullanılan teknikler olarak grafik oluşturma, iteratif teknikler, olasılıksal yaklaşım, ödünleşim yaklaşımı ve doğrusal programlama sıralanmış, yeni nesil sezgisel optimizasyon yöntemleri ile de melez enerji sistemlerinin optimize edilebileceği ifade edilmiştir.

Bir başka literatür taraması çalışması [27] ise, melez enerji sistemi bileşenlerinin tanıtımı ve modellenmesinde kullanılan matematiksel ifadeleri sunduktan sonra, ele alınan problemlerde kullanılan amaç fonksiyonlarını açıklamış ve melez enerji sistemleri analizinde sıklıkla kullanılan ticari yazılımlardan GAMS, HOMER, HYBRID2 ve RETSCREEN hakkında bilgiler vermiştir.

Bu yazılımlardan HOMER simülasyon tabanlı bir melez enerji sistemi analizi yazılımıdır. Kullanıcı tarafından tanımlanan parametre değer aralıkları için her kombinasyonu dikkate alarak enerji sistemin simülasyonunu gerçekleştirmekte ve sistem için en iyi bileşen setini kullanıcıya sunmaktadır. GAMS, doğrusal ve doğrusal olmayan yapıdaki matematiksel ifadelerle modellenen karmaşık sistemlerin optimizasyonu için kullanılmakta ve farklı sistemler için uyarlanma becerisi oldukça yüksektir. HYBRID2 yenilenebilir enerji sistemlerinin simülasyonu için geliştirilmiş hassas bir yazılım olarak tanımlanmaktadır. RETSCREEN ise yenilenebilir enerji projelerinin teknik ve finansal değerlendirilmesinde kullanılan Microsoft Excel tabanlı bir araçtır.

Melez enerji sistemlerinin en iyilemesi üzerine yapılmış bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Güneş ve rüzgâr kaynakları içeren melez enerji sisteminin tasarımı ve kontrolü için kendine yeten ve şebekeye bağlı durumlar 24 saatlik çalışma dönemi için doğrusal programlama

tabanlı bir modelle incelenmiştir [28]. Toplam maliyet, çevreye salınan zararlı gaz miktarları ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından tercih edilecek durumlara ilişkin çıkarımlar sunulmuştur.

Bir ev için güneş, rüzgâr, enerji depolama ve şebeke bağlantısı bileşenlerinden oluşan melez enerji sisteminin bileşen boyutlarını en küçük sistem maliyeti açısından belirlemek için genetik algoritma yaklaşımı kullanılmıştır [29]. Problem boyutunun büyük olmasından ötürü mevsimsel ve hafta içi talep ve kapasite değişimlerini inceleyebilmek için Ocak ve Temmuz aylarındaki durumu ifade eden dörder haftalık veriler dikkate alınarak problemin çözümü elde edilmiştir.

Topluluk ölçekli melez enerji sisteminde belirsizlik altında enerji planlaması problemi aralıklı doğrusal programlama, şans kısıtlı programlama ve karma tam sayılı programlama tekniklerinin kullanımı ile çözülmüştür [30]. Elektrik, ısıtma ve ulaşım gibi farklı yük tiplerinin dikkate alındığı problemde kaynak tahsisi ve kapasite artırım planlaması kararları en düşük sistem maliyeti, en yüksek sistem güvenilirliği ve enerji güvenliği amaçları doğrultusunda belirlenmiştir.

Güneş, rüzgâr ve depolama tesisi içeren şebekeye bağlı melez enerji sistemi Çok Amaçlı Kuş Sürüsü En İyilemesi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir [31]. Sistemin değerlendirilmesinde amaç fonksiyonu olarak sistem maliyeti, güvenilirlik ve zararlı gaz salınımı dikkate alınmıştır.

Bir başka çalışmada [32], yine güneş, rüzgâr ve depolama tesisi içeren şebekeye bağlı bir melez enerji sisteminin tasarımı ele alınmıştır. En düşük maliyetli optimum sistem tasarımını belirlemek için Kuş Sürüsü En İyilemesi yöntemi temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Güneş, rüzgâr ve yakıt hücresi içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde işletme kararlarının belirlenmesi için Çok Amaçlı Bal Arısı Çiftleştirme Algoritması yönteminden yararlanılmıştır [33]. Sistem değerlendirmesi için göz önünde bulundurulan amaç fonksiyonları aktif elektrik gücü kaybı, voltaj sapması, toplam enerji maliyeti ve yenilenebilir sistemlerin ve trafoların toplam zararlı gaz salınımın en düşük olmasını hedeflemiştir.

İran'ın Binalood bölgesi kırsalında melez enerji sisteminin güneş ve rüzgâr kaynaklarının yanında dizel üreteçle veya şebekeden desteklenmesi durumlarının kıyaslaması yapılmıştır [34]. HOMER yazılımından elde edilen benzetim sonuçları incelenerek iki senaryo değerlendirilmiştir.

Yenilenebilir kaynaklar içeren melez bir mikro şebekede tasarım, boyutlandırma, işletme ve planlama kararlarının belirlenmesi için HOMER yazılımından elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir [35]. Enerji arzının sağlanması için sadece dizel üreteç kullanılması, tamamen yenilenebilir kaynaklar kullanılması, yenilenebilir kaynaklar ve dizel üretecin birlikte kullanılması ve şebeke bağlantısının kullanılması mekanizmaları için yapılan senaryo analizleri değerlendirilmiş ve şebeke bağlantısının kurulması için başa baş noktası hesaplanmıştır.

Bir başka çalışmada, belirli zaman aralıklarında şebekenin enerji arzı sağlayamadığı kırsal bir bölgede şebekeyi desteklemek için biokütle, rüzgâr ve güneş enerjisini de içeren bir melez enerji sistemi tasarımı üzerine odaklanılmıştır [36]. Sistem yatırımı maliyetinin net bugünkü değeri için farklı arz mekanizmalarının kıyaslanması sonunda şebekeye bağlı melez enerji sisteminin kendine yeten melez enerji sisteminden daha küçük bir amaç fonksiyonu değeri sağladığı ve yine şebekeye bağlı melez sistemin yalnızca şebekeye bağlı durumda ortaya çıkan zararlı gaz salınımına göre %80 azalma sağladığı gözlenmiştir.

Ticari bir binada güneş ve geleneksel kaynaklardan ısıtma, soğutma ve elektrik talebini karşılama problemi için yatırım planlama ve işletme stratejisini en düşük yaşam boyu maliyeti ile bulmaya çalışan bir matematiksel model önerilmiştir [37]. Talebin üstünde enerji üretildiği zamanlarda şebekeye enerji satışıyla ilgili yasal durumu dikkate alan modelin çözümü problem boyutunun büyük olmasından ötürü yıllık planlamada üç mevsim için birer aylık veriler kullanılarak elde edilmiştir.

Güneş ve rüzgâr kaynaklarının enerji depolama tesisleriyle desteklendiği kendine yeten melez enerji sisteminin tasarım en iyilemesi için teknik, ekonomik ve çevresel etkilerin göz önünde bulundurulduğu çok amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir [15]. Tasarım seçeneklerinin sıralamasını belirlemek için elde edilen çözüm sonuçları TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir.

İran'da kırsal bir bölgenin elektrik ve ısı talebini karşılamak için dizel üreteç, yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr) ve şebeke bağlantısını içeren 6 farklı arz modeli için senaryo analizleri HOMER yazılımı kullanılarak yapılmıştır [38]. Değerlendirmede amaç fonksiyonları olarak maliyet ve zararlı gaz salınımları dikkate alınmıştır.

Güneş enerjisi ve enerji depolama tesisi içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde elektrik talebini karşılayacak en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyeti optimize edilmiştir [39]. Çalışmada güneş enerjisi ile üretilecek enerji miktarları ve enerji depolama kapasitesi saatlik detay seviyesinde bir yıllık veri kullanılarak hesaplanmıştır.

Güneş, rüzgâr, biokütle kaynakları içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde sistem bileşenlerinin boyutlandırma kararları en düşük yaşam boyu maliyeti açısından belirlenmiştir [40]. Problem çözümünde genetik algoritma tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Dinamik Çok Amaçlı Kuş Sürüsü En İyilemesi tabanlı bir çözüm yaklaşımı ile rüzgâr ve güneş kaynakları içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde toplam maliyetin net şimdiki değeri, yenilenebilir enerji oranı ve yakıt gaz salınımı açısından iyi çözümleri gösteren Pareto eğrisi bulunmuştur [41]. Çalışmada yenilenebilir kaynaklardan üretilecek enerji miktarında etkili olan rüzgâr hızı, güneş ışınımı, sıcaklık ve enerji yükü değerlerinin stokastik belirsizlik içerdiği dikkate alınmıştır.

Konut binaları için melez enerji sistemlerinin en iyi bileşen boyutları benzetim tabanlı Dinamik Çok Amaçlı Kuş Sürüsü Optimizasyonu yaklaşımı ile belirlenmiştir [42]. Çalışmada yenilenebilir enerji oranı, toplam maliyetin şimdiki değeri ve gerekli sistem değişimleri için CO_2 gaz salınımı amaç fonksiyonları dikkate alınarak elde edilen çözümler değerlendirilmiştir.

Yenilenebilir kaynaklar içeren elektrik dağıtım şebekesi için enerji depolama ve dağıtım kararlarını belirleyecek bir karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir [43]. Test problemi boyutunun büyüklüğünden ötürü yılın 4 mevsimini yansıtan birer haftalık dönemleri içeren 4 haftalık veri seti kullanılarak yerel arama ve tavlama benzetimi tabanlı sezgisel bir yöntem yardımıyla problem çözülmüştür.

Bir üniversite kampüsünü temsil eden güneş ve rüzgâr kaynakları ile enerji depolama tesisi içeren şebekeye bağlı melez enerji ağı iki amaçlı iki aşamalı stokastik programlama ile modellenmiştir [44]. Çalışmada, toplam maliyet ve şebekeden alınan elektrik sebebiyle oluşan karbon salınımını açısından en iyi çözümü sağlayan sistem bileşeni boyutları ile üretim, depolama ve şebekeden enerji satın alma kararları belirlenmiştir.

Rüzgâr ve güneş yenilenebilir enerji kaynakları ile depolama tesisinden oluşan şebekeye bağlı melez enerji sisteminin seviyelendirilmiş yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyetlerini içeren yıllık toplam maliyeti doğrusal programlama ile modellenmiştir [45]. Modelin çözümünden elde edilen planlama stratejisi yarım saatlik detay seviyesinde belirlemiştir.

Enerji depolama tesisi, yakıt hücresi, güneş enerjisi içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde elektrik ve ısı talebini karşılamak için toplam maliyet ve CO_2 salınımı amaçlarını dikkate alan çok amaçlı matematiksel model önerilmiş ve çözümü ε-kısıt yöntemi ile elde edilmiştir [46]. Çalışmada çözüm sonuçlarının Talep Tarafının Yönetimi yaklaşımı uygulaması ile ve ε-kısıt yöntemi yerine ağırlıklı toplam uygulandığında değişimi incelenmiştir.

Sri Lanka'da küçük bir köyün elektrik talebini karşılayan güneş, rüzgâr, içten yanmalı motor ve depolama tesisi içeren şebekeye bağlı elektrik merkezi için evrimsel algoritma tabanlı ε - baskınlık tekniği altı farklı baskın çözüm elde edilmiştir [18]. Elde edilen çözümler seviyelendirilmiş enerji maliyeti, ilk yatırım maliyeti, şebeke katkı düzeyi, seviyelendirilmiş CO_2 salınımı, yenilenebilir enerji kullanım oranı, sistemin esnekliği ve güç kaybı olasılığı kriterleri bakımından TOPSIS tekniği ile sıralanmıştır.

Hindistan'da kırsal kesimde bulunan bir bölgenin elektrik talebini karşılamak için güneş ve biokütle kaynakları ile dizel üreteç içeren melez sistem kurulması ve şebeke bağlantısı kurulması durumunun maliyet kıyaslaması HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [47]. Şebekeye bağlı melez sistemin daha düşük maliyetli çözümler sunduğu görülmüştür.

Güç sistemlerine yenilenebilir kaynakların katılımı planlarını optimize etmek için deterministik bir model önerilmiştir [48]. Aylık yükün dikkate alındığı çalışmada 10 yıllık

enerji ağı genişleme planlaması maliyet ve karbondioksit emisyonu amaçları açısından belirlenmiştir.

Şebekeye bağlı güneş ve rüzgâr kaynakları ile enerji depolama tesisi içeren melez enerji ağının en iyilemesi için benzetim optimizasyonu, çok amaçlı kuş sürüsü optimizasyonu, baskın sıralamalı genetik algoritma ve güçlü Pareto evrimsel algoritma yaklaşımları kullanılmıştır [49]. Sistem bileşeni boyutları ve üretim, depolama ve şebekeden enerji satın alma kararlarını belirlemek için toplam maliyet ve şebekeden alınan elektrik sebebiyle oluşan karbon salınımı amaçları açısından elde edilen çözümler değerlendirilmiştir.

Dağıtık enerji kaynaklarının en iyi şekilde yönetimi için talep, elektrik fiyatları ve yenilenebilir kaynaklardan üretim miktarlarındaki rassal belirsizliğin dikkate alındığı stokastik iki amaçlı bir model önerilmiştir [50]. Sayısal çalışmalarla, beklenen kâr ve riskin koşullu değeri amaç fonksiyonları açısından elde edilen çözümleri incelenerek önerilen modelin fayda ve etkileri değerlendirilmiştir.

Güneş ve rüzgâr kaynakları bulunan melez mikro şebeke sisteminde elektrik talebini karşılamak için farklı enerji depolama teknolojileri kullanıldığında oluşan elektrik maliyeti, güç kaybı olasılığı ve kullanılabilir yenilenebilir enerjinin kullanım oranı değerleri Kanonik Diferansiyel Evrimsel Kuş Sürüsü En İyilemesi yöntemi yardımıyla belirlenmiştir [21]. Bulunan sonuçlar AHP-TOPSIS yaklaşımı ile değerlendirilerek en uygun enerji depolama teknolojisini gösteren çözüm belirlenmiştir.

Güneş ve rüzgâr kaynaklarını yedekleyen biokütle yakıt üreteç içeren şebekeye bağlı melez enerji sisteminde ısı ve elektrik talebini karşılanması için sıralı doğrusal programlama yaklaşımı kullanılmıştır [51]. Gerçek bir sistem için maliyet ve cezaların elde edilen gelirlerden çıkarılmasıyla hesaplanan gider fonksiyonunun en düşük değerini arayan modelin çözümü bir günün çeyrek saatlik 96 zaman aralığına bölündüğü günlük işletme planını vermektedir.

İncelenen çalışmalara bakıldığında güneş ve rüzgâr kaynaklarının depolama tesisi ile desteklendiği şebekeye bağlı sistemlerin araştırmacılar tarafından yoğunlukla incelendiği ve toplam maliyet ve gaz salınımı değerleri açısından sistemin en iyilemesini gerçekleştirmenin ele alındığı görülmüştür. Sistem davranışını incelemede talebin ve kapasitenin yılın farklı

mevsimlerindeki değerlerini yansıtacak temsili veriler ile ele alınması yaklaşımıyla hesaplama zorluğunun üstesinden gelmenin hedeflendiğine dikkat edilmiştir. Çok amaçlı modellerin çözümü için hedef programlama ve referans nokta gibi çözüm yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalar olmadığı gözlenmiştir. Son yıllarda yapılmış çalışmalarda sistemin farklı durumları için elde edilen çözüm sonuçlarını çok kriterli karar verme teknikleri ile değerlendiren çalışmaların gerçekleştirildiği de bir diğer dikkat çeken nokta olmuştur.

Bu tez çalışmasının aşağıdaki yönleriyle literatüre katkı sunduğu ve özgün değer yarattığı değerlendirilmektedir:

- İlçe büyüklüğünde bir melez enerji ağına uygun enerji depolama teknolojisini belirlemek için yeni bir melez tereddütlü bulanık dilsel terimlere dayalı çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılmaktadır. Kullanılan yaklaşım literatüre ilk kez sunulmakta olup, enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesinde de ilk kez kullanılmaktadır.
- Enerji ağının çok amaçlı en iyilemesi için çok amaçlı en iyileme yaklaşımlarından referans nokta yaklaşımı kullanılmaktadır. Enerji sistemleri ile alakalı en iyileme problemlerinin çözümü için referans nokta yaklaşımını kullanan ilk çalışma bu tez çalışmasıdır.
- Modelin farklı arz, talep ve maliyet senaryoları için çözümünden elde edilen sonuçlar ELECTRE-TRI yöntemi ile kıyaslanmakta ve böylece elde edilen çözümlerin iyi, makul ve kötü çözümler olarak sınıflandırılması yapılmaktadır. Senaryo analizi için daha önce çok kriterli sınıflandırma yapan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

4. ÖNERİLEN KARAR MODELİ

Bu bölümde tez çalışmasında ele alınan karar problemi tanımlanmış ve çözüm için önerilen karar modeli genel hatları ile sunulmuştur.

4.1. Problem Tanımı

Çalışmada ele alınan enerji ağının şebeke bağlantısı, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama bileşenleri içerdiği varsayılmaktadır. Ağın bulunduğu coğrafi bölgede, enerji üretimi için kullanımı ekonomik ve teknik olarak uygun kabul edilen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yerleşim bölgesi, sanayi bölgesi, ticari bölge ve kamu bölgesi gibi farklı gruplar şeklinde tanımlanan talep noktalarının elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak hedeflenmektedir. Yenilenebilir kaynakların talebi karşılamada kullanılması sayesinde enerji ihtiyacı için şebekeye bağlılığın azaltılabileceği öngörülmektedir. Yenilenebilir kaynakların kullanımında gözlenen arz miktarı değişkenlikleri, voltaj dalgalanması gibi sorunlara çözüm olarak depolama tesislerinin de enerji sistemi içinde yer almasının sistem faaliyetleri açısından gerekli olduğu kabul edilmiştir. Bu bilgi ve düşünceler doğrultusunda şebekeye bağlı depolama tesisleri ile desteklenen bir melez enerji ağı modellenmiştir. Önerilen model ile ekonomik açıdan sistemin dönemlik toplam maliyeti, çevresel açıdan şebekeden çekilen elektrik enerjisinin sebep olduğu gaz salınımı ve teknik olarak da enerji konusu ile alakalı stratejik bir hedef olan yenilenebilir enerji kullanım oranı amaçları doğrultusunda en iyileme gerçekleştirilmektedir.

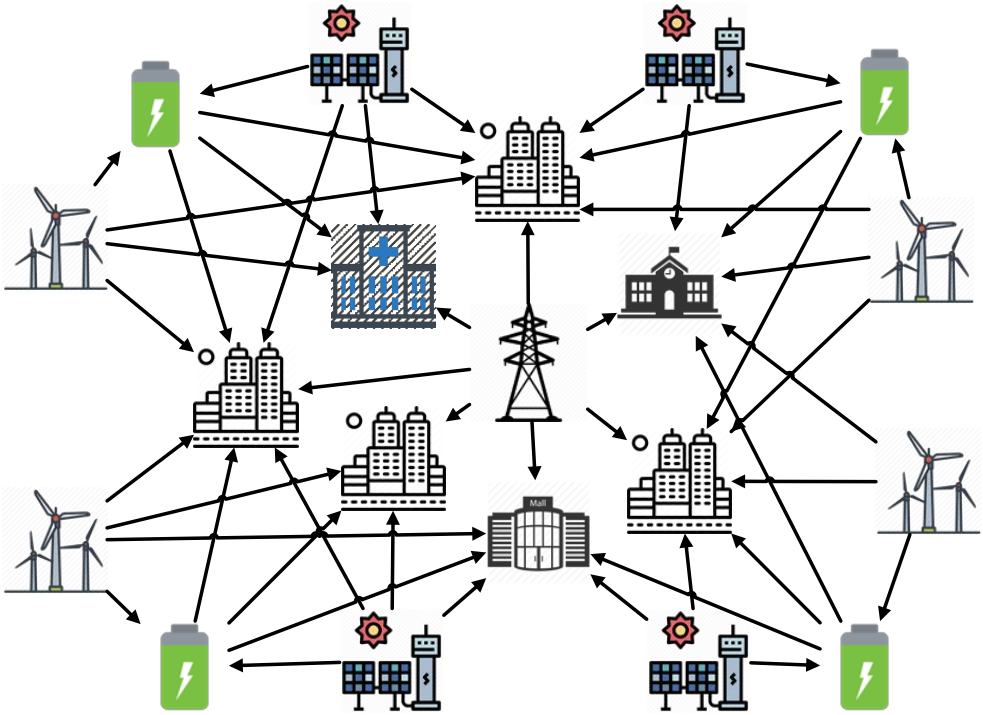
Önerilen matematiksel modelin varsayımları şu şekilde sıralanmıştır:

- Sisteme kamunun bakış açısından yaklaşılmaktadır ve üç amaç fonksiyonu ile sistem değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, toplam maliyetin en küçüklenmesi, şebekeden alınan enerjinin sebep olduğu zararlı gaz salınımının en küçüklenmesi ve yenilenebilir enerji kullanım oranının en büyüklenmesi hedeflenmektedir.
- Enerji ağının içinde farklı coğrafi konumlardaki yerleşim, ticari, kamu kurumu (okul, hastane, vb.) ve endüstriyel bölgeler tanımlanmış, talep değerleri belirlenmiştir. Talep noktalarına üretim, depolama tesislerinden deşarj ve şebekeden satın alma yoluyla iletilecek elektrik enerjisi miktarları saatlik olarak belirlenmektedir.
- Bir yıllık planlama döneminde saatlik üretim kararları belirlenmektedir. Böylece hem mevsimsel ve saatlik değişimler görülebilmekte, hem de detaylı planlama

yapılmaktadır. Hesaplama zorluğunun üstesinden gelebilmek için her mevsimden günlük ve saatlik değişimleri yansıtan birer hafta olmak üzere toplam dört haftalık talep ve kapasite değerleri dikkate alınarak modelin çözümü elde edilmektedir.

- Talep noktalarının yalnızca elektrik enerjisi talebinin karşılanması dikkate alınmıştır. Talebi karşılamada ağdaki enerji üretim noktaları yetersiz kaldığında depolanmış yenilenebilir enerjiden ve şebeke desteğinden faydalanılmaktadır.
- Ele alınan enerji sisteminde ekonomik ve teknik açıdan uygun görülen kaynaklardan elektrik üretim tesislerinin kurulu ve kullanıma hazır durumda olduğu kabul edilmektedir.
- Öncelikli olarak yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji miktarının talebi karşılama durumu tercih edilmekte, talebin karşılanamadığı durumda depolama tesisinden ve şebekeden enerji desteği alınmaktadır.

Modeli oluşturulan enerji ağının şekilsel gösterimi Şekil 4.1 ile aşağıda sunulmaktadır:



Şekil 4.1. Ele alınan enerji ağının temsili görünümü

4.2. Problemin Matematiksel Modeli

Enerji sistemini temsil etmek üzere önerilen karma tam sayılı programlama modelinin matematiksel ifadesi, modelde yer alan kümeler, parametreler, karar değişkenleri tanımlamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir:

Kümeler:

i	Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretim tesisleri
j	Talep noktaları
k	Depolama tesisleri
t	Planlama dönemleri

Parametreler:

c_i	i noktasında enerji üretimi birim maliyeti
AP_i	i enerji üretim tesisinin işletme ve bakım maliyeti
pc	Şebekeden satın alınan enerjinin birim maliyeti
e	Şebekeden satın alınan enerjiden kaynaklanan birim zararlı gaz salınım değeri
D_{jt}	j noktasının t döneminde enerji talebi

cap_{it} i tesisinin t döneminde üretim kapasitesi

ε Yeterince küçük bir sayı

M Yeterince büyük bir sayı

δ_k k depolama tesisinin verimi

$Smin_k$ k depolama tesisinin şarj düzeyi için alt sınır

$Smax_k$ k depolama tesisinin şarj düzeyi için üst sınır

Karar Değişkenleri:

x_{ijt} t döneminde i noktasında üretilip j noktasına dağıtılan enerji miktarı

xc_{ikt} t döneminde i noktasında üretilip k noktasında depolanan enerji miktarı

xd_{kjt} t döneminde k noktasından deşarj edilip j noktasına dağıtılan enerji miktarı

xg_{jt} t döneminde şebekeden alınıp j noktasına dağıtılan enerji miktarı

RU_t t döneminde yenilenebilir enerji kullanım oranı

S_{kt} t döneminde k depolama tesisinin şarj düzeyi

$$f_{jt} = \begin{cases} 1, t\ döneminde\ j\ noktasının\ talebini\ yenilenebilir\ kaynaklar\ karşılamışsa \\ 0, diğer\ durumda \end{cases}$$

$$Y_{it} = \begin{cases} 1, i\ tesisi\ t\ döneminde\ enerji\ üretiminde\ kullanılmışsa \\ 0, diğer\ durumda \end{cases}$$

$$Q_i = \begin{cases} 1, i\ tesisi\ enerji\ üretiminde\ kullanılmışsa \\ 0, diğer\ durumda \end{cases}$$

$$fc_{kt} = \begin{cases} 1, t\ döneminde\ k\ depolama\ noktasına\ enerji\ depolanmışsa \\ 0, diğer\ durumda \end{cases}$$

$$fd_{kt} = \begin{cases} 1, t\ döneminde\ k\ depolama\ noktasından\ enerji\ deşarj\ edilmişse \\ 0, diğer\ durumda \end{cases}$$

Matematiksel Gösterim:

Amaç Fonksiyonları:

$$\text{enk}\, TM = \sum_t \left[\sum_i c_i \left(\sum_j x_{ijt} + \sum_k xc_{ikt} \right) + \sum_j pc \times xg_{jt} \right] + \sum_i AP_i Q_i \tag{4.1}$$

$$\text{enk}\, Emisyon = \sum_t \sum_j e \times xg_{jt} \tag{4.2}$$

$$\text{enb}\, YKO = \sum_t RU_t \tag{4.3}$$

Kısıtlar

$$\sum_i x_{ijt} + \sum_k xd_{kjt} + xg_{jt} = D_{jt} \qquad \forall j,t \qquad (4.4)$$

$$\sum_i x_{ijt} \geq D_{jt} - M \times (1 - f_{jt}) \qquad \forall j,t \qquad (4.5)$$

$$\sum_k xd_{kjt} + xg_{jt} \leq M \times (1 - f_{jt}) \qquad \forall j,t \qquad (4.6)$$

$$\sum_k xd_{kjt} + xg_{jt} \geq \varepsilon \times (1 - f_{jt}) \qquad \forall j,t \qquad (4.7)$$

$$\sum_j x_{ijt} + \sum_k xc_{ikt} \geq \varepsilon \times Y_{it} \qquad \forall i,t \qquad (4.8)$$

$$\sum_j x_{ijt} + \sum_k xc_{ikt} \leq cap_{it} \times Y_{it} \qquad \forall i,t \qquad (4.9)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijt} + \sum_k \sum_j xd_{kjt} = RU_t \times \sum_j D_{jt} \qquad \forall t \qquad (4.10)$$

$$\sum_t Y_{it} \leq M \times Q_i \qquad \forall i \qquad (4.11)$$

$$\sum_i xc_{ikt} \geq \varepsilon \times fc_{kt} \qquad \forall k,t \qquad (4.12)$$

$$\sum_i xc_{ikt} \leq M \times fc_{kt} \qquad \forall k,t \qquad (4.13)$$

$$\sum_j xd_{kjt} \geq \varepsilon \times fd_{kt} \qquad \forall k,t \qquad (4.14)$$

$$\sum_j xd_{kjt} \leq M \times fd_{kt} \qquad \forall k,t \qquad (4.15)$$

$$fc_{kt} + fd_{kt} \leq 1 \qquad \forall k,t \qquad (4.16)$$

$$S_{kt} = S_{k,t-1} + \delta_k \sum_i xc_{ikt} - \frac{\sum_j xd_{kjt}}{\delta_k} \qquad \forall k,t \qquad (4.17)$$

$$Smin_k \leq S_{kt} \leq Smax_k \qquad \forall k,t \qquad (4.18)$$

$$x_{ijt}, xc_{ikt}, xd_{kjt}, xg_{jt}, S_{kt} \geq 0 \qquad \forall i,j,k,t \qquad (4.19)$$

$$f_{jt}, fc_{kt}, fd_{kt}, Q_i, Y_{it} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,k,t \qquad (4.20)$$

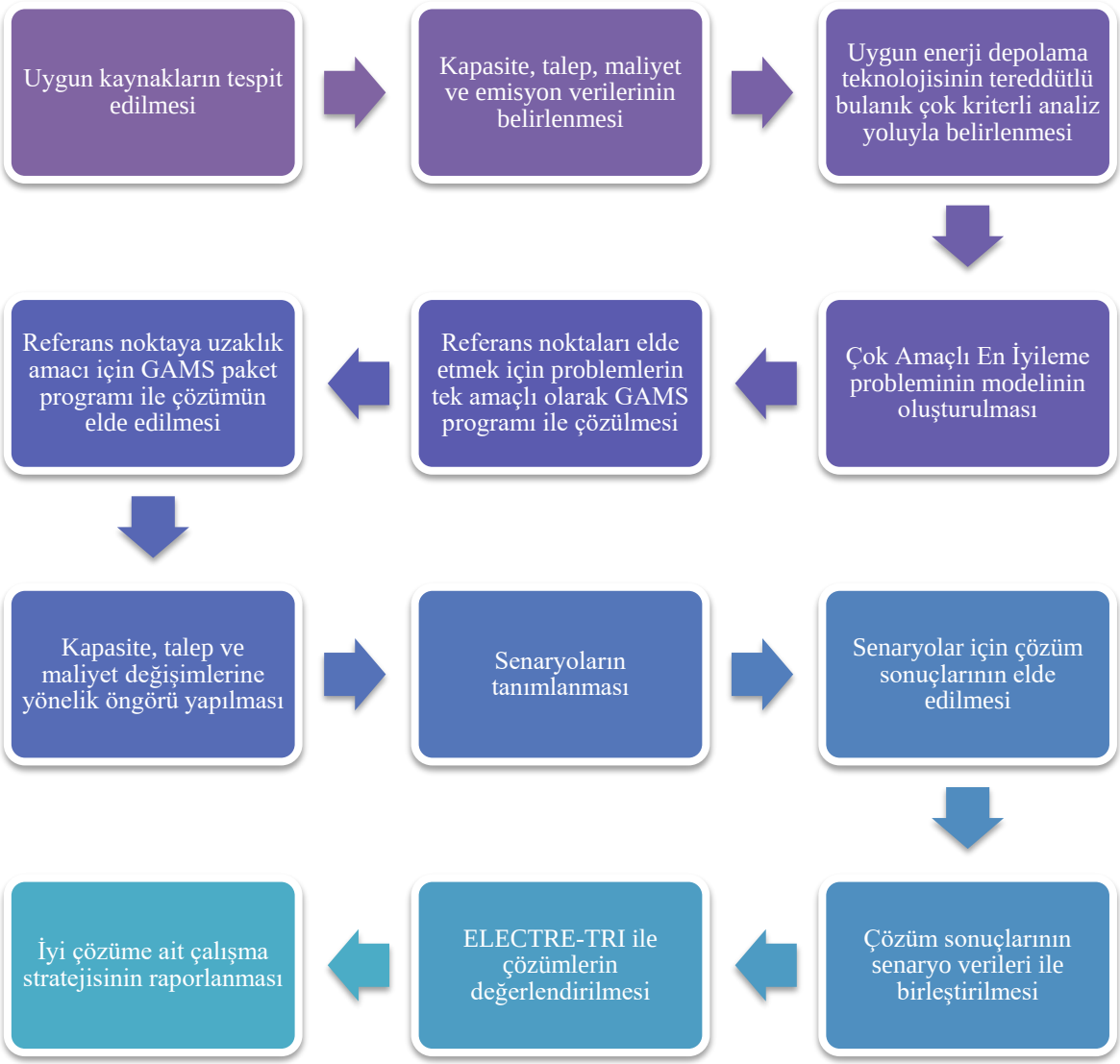
Modelin birinci amaç fonksiyonu toplam maliyetin en küçüklenmesidir. Eş. (4.1)'de gösterildiği gibi, bu değer fonksiyonu enerji üretimi ve depolanması maliyetleri, tesislerin

işletme ve bakım maliyetleri ve şebekeden alınan enerjinin maliyetinin toplamıdır. İkinci amaç fonksiyonu Eş. (4.2) ile gösterilen, şebekeden alınan enerjiden kaynaklanan zararlı gaz salınımının en küçüklenmesidir. Üçüncü amaç fonksiyonu ise, planlama dönemi boyunca toplam yenilenebilir enerji kullanımının en büyüklemesini ifade eden Eş. (4.3) ile sunulmuştur.

Eş. (4.4) ile ifade edildiği gibi, elektrik talebi üretim, depolama tesislerinin deşarjı ve şebeke bağlantısı ile sağlanmaktadır. Eş. (4.5)–(4.7) üretimin talebi karşılamada yeterli olduğu zamanlarda şebeke ve depolama tesisi deşarjına gerek olmadığını ifade etmektedir. Yalnızca talebin üretimden fazla olduğu durumlarda deşarj ve şebeke desteği seçenekleri dikkate alınmaktadır. Üretim tesislerinin kapasite kısıtlaması Eş. (4.8) ve (4.9) ile verilmiş olup dağıtılan ve şarjda kullanılan enerji toplamına eşittir. Her bir planlama dönemindeki yenilenebilir enerji kullanım oranı Eş. (4.10) ile hesaplanmaktadır. Eş. (4.11) işletme ve bakım maliyetini eklemede kullanılan karar değişkeni ile tesis kullanımını ifade eden karar değişkenini bağlamaktadır. Eş. (4.12)-(4.16) ile depolama tesislerinde ya şarj, ya deşarj yapılabileceği ya da durumunu koruyacağı ifade edilmektedir. Depolama tesislerinin belirli bir dönemdeki durumu Eş. (4.17) ile hesaplanmaktadır. Depolama tesisinin şarj ve deşarj verimi bu hesapta dikkate alınmaktadır. Eş. (4.18) depolama tesisinin şarj düzeyinin alt ve üst şarj düzeyi sınırları arasında olması gerektiğini göstermektedir. Enerji miktarı ile ilgili karar değişkenleri için işaret kısıtları Eş. (4.19) ile ve ikili değişkenler için işaret kısıtları Eş. (4.20) ile verilmiştir.

4.3. Problemin Çözümü için İzlenen Yol

Karar modelinin oluşturulması ve çözümleri elde etmek için çalışmada izlenecek yol Şekil 4.2 ile verilmiştir:



Şekil 4.2. Çalışmada izlenen yol

Enerji ağı ile ilgili kararları belirlemek için öncelikle enerji ağına ilişkin tanımlamaların yapılması gerekir. Ağ ile ilgili temel bilgiler ve ağın yönetimi ile ilgili prensipler, diğer bir deyişle arz ve talep noktası sayısı, talep noktalarının talebinin hangi yoldan karşılanacağı gibi bilgiler tanımlanmalıdır. Tesislerin üretim kapasiteleri ve talep noktalarının elektrik enerjisi ihtiyaç miktarları ile maliyet değerleri belirlenmelidir. Ayrıca, enerji ağı içinde enerji depolama teknolojilerinden yararlanılacağı için, uygun enerji depolama teknolojisinin belirlenmesi gerekir. Enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken çok sayıda faktör söz konusu olduğundan, enerji depolama teknolojisi seçenekleri arasında seçimi belirlemek için bu kısımda çok kriterli karar verme yaklaşımlarına dayalı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

Probleme ilişkin tanımların oluşturulmasından sonra, en iyileme probleminin çözümü elde edilir. Bu aşamada, problemin matematiksel modeli ve modele ait en iyileme yazılımı kodunun geliştirilmesi ilk işlemdir. Beşinci bölümde matematiksel ifadesi verilen karma tamsayılı programlama modeli GAMS paket programı üzerinde CPLEX çözücüsü yardımıyla çözülmüştür. Oluşturulan yazılım kodu sayesinde problem parametreleri, karar değişkenleri ve eşitlikler tanımlandıktan sonra, önce her bir amaç fonksiyonu için tek amaçlı çözüm sonuçları bulunarak referans noktalar belirlenmiştir. Daha sonra, referans noktalara en uzak amaç fonksiyonunun uzaklığını en küçükleyecek çözüm elde edilmiştir. Bu amaç fonksiyonu için elde edilen çözüm, sistemin en iyi çalışma stratejisini vermektedir.

Çalışmanın son aşaması, enerji sisteminin kapasite, talep ve maliyet parametrelerindeki değişime yönelik senaryo analizi çalışmasıdır. Bu aşamada, ilk önce parametrelerdeki değişimin ne düzeyde olacağına yönelik bir değerlendirme yapılmış, daha sonra olası durumların birleşimi ile senaryolar tasarlanmıştır. Her bir senaryo için elde edilen çözüm sonuçları, modelde yer almayan ilgili senaryodaki enerji ağına ait farklı faktörleri ile birleştirilerek çok kriterli karar verme tekniklerinden ELECTRE-TRI ile iyi, makul veya kötü çözüm olarak sınıflandırılmıştır.

5. KULLANILAN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bu tez çalışmasında dördüncü bölümde tanımı verilen karar probleminin çözümü için üç aşamadan oluşan bir karar modeli önerilmiştir.

İlk aşamada, tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesi ve tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yaklaşımlarını birleştiren çok kriterli karar verme modeli kullanılarak enerji sistemine uygun enerji depolama teknolojileri değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada değerlendirme sonucunda, sistemde kullanımı uygun bulunan enerji depolama teknolojisi için üç amaçlı karma tamsayılı programlama modeli oluşturularak en iyi çalışma stratejisi belirlenmiştir. Üç amaçlı karma tamsayılı programlama modelinin çözümü için çok amaçlı en iyileme yaklaşımlarından Referans Nokta Yönteminden yararlanılmıştır.

Son aşamada, kapasite, talep ve maliyet değerlerindeki değişime yönelik oluşturulan senaryolar için elde edilen çözüm sonuçları modele dâhil edilmeyen bazı faktörleri de dikkate alarak çok kriterli karar verme yaklaşımlarından ELECTRE-TRI tekniği ile değerlendirilmiştir.

Bu kısımda, çalışmada ele alınan yöntemler açıklanmıştır.

5.1. Tereddütlü Bulanık Dilsel Terimler Kümesi Ve Tereddütlü Bulanık VIKOR Melez Yaklaşımı

Karar problemlerinin bazıları, belirsiz değerlere sahip veya dilsel değişkenlerle ifade edilen elemanlara sahip olabilirler. Bu tip durumlarda bulanık küme teorisi, karar vericilerin problemi modellemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bulanık küme teorisi, ilk kez 1965 yılında Zadeh [52] tarafından literatüre tanıtılmıştır. Bulanık mantık, bir önerme ilgili doğru veya yanlış şeklinde çıkarımda bulunan klasik mantığın tanımlamada yetersiz kaldığı, daha fazla sayıda durumların ifade edilebileceği durumlar için üyelik fonksiyonları yardımıyla tanımlanabileceğini ortaya koymuştur.

Bulanık küme teorisi sayesinde, belirsizlik içeren veya dilsel ifadelerle tanımlandığı için kesin olmayan durumlar üzerinde matematiksel işlemlerin yapılabilmesi mümkündür.

Zaman içerisinde bulanık küme teorisi, belirsizliği ifade etmede eksik kalan yönleri açısından geliştirilerek çeşitli uzantıları sunulmuştur. Bu uzantılar arasında sezgisel bulanık kümeler [53], Pisagor bulanık kümeler [54], Tip-2 bulanık kümeler [55] ve tereddütlü bulanık kümeler [56] sayılabilir.

Tereddütlü bulanık kümeler, karar vericinin bir değişkenin üyeliği hakkında birden fazla değer arasında tereddütte kaldığı durumları ifade etmek için geliştirilmiştir. Rodriguez ve diğerleri [57], tereddütlü bulanık dilsel terim kümeleri adını verdikleri bir yaklaşım geliştirerek, karar verme uygulamalarında değişkenlerin tek bir dilsel değişkenle ifadesinin yetersiz kaldığı durumları tanımlamışlardır. Bu yaklaşım sayesinde, karar verici düşüncesini ifade etmek için birden fazla dilsel değişkene ihtiyaç duyduğunda, farklı dilsel terimleri en az, en çok, arasında, büyük, küçük gibi bağlayıcı ifadeler yardımıyla birleştiren dilsel ifadeler oluşturabilmektedir. Böylece problem elemanı birden fazla dilsel değişkenle ifade edilebilir hâle gelmektedir.

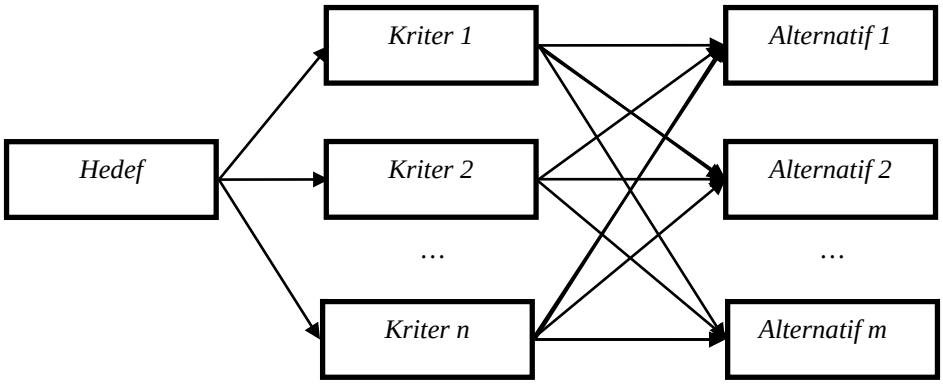
5.1.1. Tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerine dayalı grup karar verme yaklaşımı

Rodriguez ve diğerleri [57] tarafından geliştirilen karar verme yaklaşımı, daha sonra farklı uzmanların ikili kıyaslamalar yoluyla belirledikleri görüşlerini bütünleştiren bir grup karar verme yaklaşımı şeklinde geliştirilmiştir [58]. Bu yaklaşımda, karar vericiler tercihlerini tereddütlü bulanık dilsel terimler kümeleri kullanarak ifade etmekte ve ifadelerin sayısal dönüşümleri yapılarak matematiksel işlemler yoluyla karar elemanlarının öncelikleri belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasında uygun enerji depolama teknolojilerinin belirlenmesinde Yavuz ve diğerleri [58] tarafından önerilen tereddütlü bulanık dilsel terim kümelerine dayalı grup karar verme yaklaşımı ile kriterlerin önem dereceleri tespit edilmiştir. Bu yaklaşımın adımları aşağıda verildiği gibidir:

Adım 1: Karar verme problemi için hedefin, kriterlerin ve alternatiflerin tanımlanması

Bir karar verme probleminde, çözüm sonucunda elde edilmesi planlanan hedefin iyi ve doğru bir biçimde tanımlanması gerekir. Hedef tanımlandıktan sonra, hedefi etkileyen kriterler ve varsa alt kriterler belirlenerek değerlendirilecek alternatifler seçilir. Böylece karar verme problemi için hiyerarşik yapı elde edilmiş olur. Karar verme problemleri için örnek bir hiyerarşik yapı Şekil 5.1 ile aşağıda verilmiştir:



Şekil 5.1. *n* kriter ve *m* alternatif içeren bir karar problemi için hiyerarşik yapı

Adım 2: Dilsel terim kümesinin anlam ve söz dizimi sırasının tanımlanması

Kriterler arası kıyaslamaların ifadesi için Yavuz ve diğerleri [58] tarafından önerilen Çizelge 5.1 ile aşağıda verilen dilsel terimler ve sıralaması kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Kriterler arası kıyaslamalar için dilsel terimler kümesi

Dilsel terim	Önem derecesi
Önemli değil (öd)	0
Çok düşük önem (çd)	1
Düşük önem (dö)	2
Orta önem (oö)	3
Yüksek önem (yö)	4
Çok yüksek önem (çy)	5
Mutlak önem (mö)	6

Adım 3: İçerikten bağımsız gramerin tanımlanması

Kıyaslamaların yapılması için dilsel ifadeleri oluşturmada kullanılacak gramer yapısının tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Çizelge 5.1 ile verilen dilsel terimler ve dilsel terimler arasındaki ilişkileri ifade eden birleşik terimler kullanılarak oluşturulur [58]. X ve Y, Çizelge 5.1'de verilen dilsel terimleri göstermek üzere birleşik terim oluşturulurken kullanılabilecek bazı yapılar aşağıda verilmiştir:

- En az X
- En çok X
- X'den büyük
- X'den küçük
- X ve Y arasında
- X'e eşit

Adım 4: Uzmanların kriterler ve alternatifler için tercihlerinin toplanması
Her bir uzmandan kriter çiftlerini ve alternatif çiftlerini ikili kıyaslamalar yoluyla değerlendirmesi istenir.

Adım 5: Uzman tercihlerinin tereddütlü bulanık dilsel terim kümelerine dönüştürülmesi
Uzmanların değerlendirmeleri, dilsel ifadenin kapsadığı dilsel terimleri içeren kümeler şekline dönüştürülür. Daha sonra, bu kümeler kümelerdeki en düşük ve en yüksek öneme sahip elemanları içeren dilsel terim aralıkları halinde ifade edilir.

Adım 6: Kötümser ve iyimser birleştirilmiş tercihlerin dilsel bütünleştirme operatörü yardımıyla elde edilmesi
Farklı uzmanlardan alınan görüşlerini ifade eden dilsel terim aralıkları kullanılarak alt sınır terimlerinin bütünleştirilmesi ile kötümser, üst sınır terimlerinin bütünleştirilmesi ile de iyimser birleştirilmiş tercihler elde edilir. Çalışmada kullanılan yöntemde, bütünleştirme operatörü olarak aritmetik ortalama kullanılmıştır.

Adım 7: Birleştirilmiş tercihler için aralık vektörlerinin oluşturulması
Kötümser ve iyimser birleştirilmiş tercih matrislerinde satırların aritmetik ortalamaları hesaplanır ve bu ortalamalar alt ve üst sınırlara karşılık gelecek şekilde aralık vektörleri oluşturulur.

Adım 8: Öncelik değerlerinin aralık değerlerinin normalizasyonu ile elde edilmesi
Aralık alt ve üst sınırlarının orta noktaları belirlenir. Orta noktaların oluşturduğu vektör, vektör elemanlarının toplamına göre normalize edilir ve öncelik değerleri hesaplanır.

Adım 9: En iyi alternatifin kriter ve alternatiflerin kriter bazında önceliklerinin çarpımı sonucunda belirlenmesi

Kriterler ve alternatifler için kriter bazında belirlenen öncelik değerlerinin çarpımı yoluyla alternatiflerin nihai öncelik değerleri tespit edilir. En yüksek öncelik değerine sahip alternatif en iyi karar seçeneği olarak belirlenir.

5.1.2. Tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemi

VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemi Opricovic ve Tzeng [59] tarafından çok kriterli karar verme problemlerinde uzlaşık çözümü belirlemeye yönelik bir yöntem olarak önerilmiştir. Alternatiflerin kriter bazında performanslarının en iyi ve en kötü durumlarını dikkate alan bir normalizasyon adımından sonra, normalize değerler kriter ağırlıkları ile çarpılır. Ağırlıklandırılmış normalize değerlerin ideal çözüme uzaklıkları belirlendikten sonra grup faydası ve bireysel pişmanlık değerleri hesaplanır. En yüksek grup faydasını ve en düşük bireysel pişmanlığı sağlayan uzlaşık çözüme sahip alternatif belirlenmeye çalışılır.

Liao ve diğerleri [60], karar matrisindeki değerlerin tereddütlü bulanık dilsel terimlerle ifade edildiği çok kriterli karar verme problemlerinin VIKOR yöntemi ile çözülebilmesi için yöntem adımlarını düzenleyerek Tereddütlü Bulanık Dilsel VIKOR adını verdikleri bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu sayede, belirsizliğin tek bir dilsel değişkenle ifade edilemediği karar elemanları içeren problemlerin uzlaşık çözümünü elde etmeyi sağlayan bir karar destek aracı ortaya çıkmıştır. Yöntem adımları aşağıda verildiği gibidir:

Adım 1: Karar probleminin hedefinin, kriterlerinin ve alternatiflerinin belirlenmesi

Karar verici ilk olarak verilecek karara ilişkin hedefini açık bir biçimde tanımlamalıdır. Sonrasında karar vermede etkili olacağı düşünülen faktörler (kriterler) kararlaştırılır ve aralarında seçim yapılacak alternatif kümesi oluşturulur.

Adım 2: Dilsel terimlerin tanımlanması ve karar matrisinin oluşturulması

Bu adımda karar verici her bir kriter için alternatifleri değerlendireceği dilsel terimleri ve gramer yapısını tanımlar. Sonrasında, her bir alternatifin kriterler temelinde değerlendirmeleri Bölüm 5.1'de açıklanan içerikten bağımsız gramer kurallarına göre ifade

edilecek tereddütlü bulanık dilsel ifadeler yardımıyla gerçekleştirilir. Değerlendirme için kullanılacak dilsel terimler kritere bağlı olarak tanımlanabilir.

Adım 3: Dilsel bulanık değerlendirmelerin tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerine dönüştürülmesi

Adım 2'de oluşturulan karar matrisindeki tereddütlü bulanık dilsel değerlendirmeler, içerdikleri dilsel terimlerden oluşan tereddütlü bulanık dilsel terimler kümeleri halinde yazılır. Bu adımda tereddütlü bulanık dilsel değerlendirme matrisi elde edilmiş olur.

Adım 4: İdeal çözümlerin belirlenmesi

İdeal çözümleri belirlemek için Adım 3'te elde edilen tereddütlü bulanık dilsel değerlendirme matrisinin her bir sütunundaki elemanlar arasında karşılaştırmalar yapılır. Liao ve diğerleri [60], H_s^1 ve H_s^2 ile gösterilen iki tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesini kıyaslamak için sırasıyla Eş. (5.1) ve Eş. (5.2) ile hesaplanan skor ve varyans değerlerini kullanmayı önermişlerdir. Verilen ifadelerde s_{δ_l} tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesinin elemanlarının sayısal karşılıklarını, $\#H_s$ tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesinde yer alan eleman sayısını göstermektedir.

$$\rho(H_s) = \frac{1}{\#H_s} \sum_{s_{\delta_l} \in H_s} s_{\delta_l} = s_{\frac{1}{\#H_s}\sum_1^{\#H_s} \delta_l} \tag{5.1}$$

$$\sigma(H_s) = \frac{1}{\#H_s} \sqrt{\sum_{s_{\delta_l}, s_{\delta_k} \in H_s} \left(s_{\delta_l} - s_{\delta_k}\right)^2} = s_{\frac{1}{\#H_s}\sqrt{\sum_{s_{\delta_l}, s_{\delta_k} \in H_s} (\delta_l - \delta_k)^2}} \tag{5.2}$$

Eş. (5.1) ve Eş. (5.2) ile verilen ifadeler kullanılarak hesaplanan skor ve varyans değerleri yardımıyla tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerinin kıyaslaması şu kurallara göre yapılır:

- Eğer $\rho(H_s^1) > \rho(H_s^2)$ ise, $H_s^1 > H_s^2$'dir. Bu durumda $enb(H_s^1, H_s^2) = H_s^1$ ve $enk(H_s^1, H_s^2) = H_s^2$ olur.
- Eğer $\rho(H_s^1) = \rho(H_s^2)$ ise, tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerinin varyans değerleri incelenir.

- $\sigma(H_s^1) < \sigma(H_s^2)$ ise, $H_s^1 > H_s^2$'dir. Bu durumda $enb(H_s^1, H_s^2) = H_s^1$ ve $enk(H_s^1, H_s^2) = H_s^2$ olur.
- $\sigma(H_s^1) = \sigma(H_s^2)$ ise, $H_s^1 = H_s^2$'dir. Bu durumda $enb(H_s^1, H_s^2) = enk(H_s^1, H_s^2) = H_s^1 = H_s^2$ olur.

Her bir sütun için elemanların skor ve varyans değerleri incelenerek ideal ve anti-ideal çözümler belirlenir.

Adım 5: Grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütlerinin her bir alternatif için tespit edilmesi

Liao ve diğerleri [60] alternatiflere ait grup faydası ve bireysel pişmanlık değerlerinin hesaplanması için VIKOR yönteminin deterministik hâline benzer şekilde Eş. (5.3) ve Eş. (5.4) ile verilen ölçüt formüllerini geliştirmişlerdir.

$$HFLGU_i = \sum_{j=1}^{J} w_j \frac{d_{ed}\left(H_j^+, H_j^i\right)}{d_{ed}\left(H_j^+, H_j^-\right)} \tag{5.3}$$

$$HFLIR_i = enb\left(w_j \frac{d_{ed}\left(H_j^+, H_j^i\right)}{d_{ed}\left(H_j^+, H_j^-\right)}\right) \tag{5.4}$$

Deterministik VIKOR yönteminde alternatiflerin ağırlıklı normalize değerlerinin toplamı grup faydası ölçütünü vermektedir. Eş. (5.3) ile hesaplanan $HFLGU_i$ değeri i alternatifinin tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemine göre grup faydası değerini göstermektedir. Her bir kriter için alternatifin değerlendirme değerinin ideal ve anti-ideal çözüm arasında yer aldığı konuma göre ağırlıklı toplamı hesaplanarak, alternatifin grup faydası değeri bulunur.

Eş. (5.4) ile hesaplanan bireysel pişmanlık ölçütü ($HFLIR_i$) de, deterministik VIKOR yöntemine benzer şekilde her bir alternatif için ideal ve anti-ideal çözüm arasındaki ağırlıklı konum değerlerinden en büyük olanı olarak belirlenmektedir.

Bu formüllerde iki tereddütlü bulanık dilsel terim arasındaki uzaklığı belirlemek için kullanılan ve d_{ed} ile gösterilen Öklid metriği ise Eş. (5.5) ile verilen ifade yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$d_{ed}(H_s^1, H_s^2) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^{L} \left(\frac{|\delta_l^1 - \delta_l^2|}{2\tau + 1} \right)^2 \right)^{1/2} \tag{5.5}$$

Eş. (5.5) ile aralarındaki uzaklık hesaplanan iki tereddütlü bulanık kümenin aynı sayıda terime sahip olduğu ve L adet terimden oluştuğu kabul edilir. $2\tau + 1$ ile tereddütlü bulanık dilsel terim kümelerinin alabileceği dilsel terimlerin sayısı ifade edilmektedir. δ_l^1 ve δ_l^2 aralarındaki uzaklık ölçülmeye çalışılan tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerinin l. sırada yer alan elemanlarının önem derecelerini göstermektedir. H_s^1 ve H_s^2 aynı sayıda terim içermiyorsa Eş. (5.6) yardımıyla terim sayısı az olan kümeye eksik eleman sayısı kadar eleman eklenir.

$$\boldsymbol{\mathit{b}} = \zeta b^+ \oplus (1 - \zeta) b^- \tag{5.6}$$

Bu ifadede verilen $\boldsymbol{\mathit{b}}$ eklenecek dilsel terimi, b^+ ve b^- ise sırasıyla tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesindeki iyimser ve kötümser değerleri göstermektedir. ζ parametresi [0,1] aralığında değerler almakta olup iyimser terimin eklenecek terim üzerindeki etki derecesini göstermektedir. Genel olarak $\zeta = 0{,}5$ kabul edilmekte ve eksik terim sayısı olması durumunda iyimser ve kötümser değerlerin ortalaması değerli terimlerle küme tamamlanmaktadır.

Adım 6: Uzlaşı ölçütünün hesaplanması

Tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yönteminde uzlaşı ölçütü $HFLC_i$, deterministik VIKOR yöntemine benzer şekilde Eş. (5.7) ile hesaplanır:

$$HFLC_i = \theta \frac{HFLGU_i - HFLGU^+}{HFLGU^- - HFLGU^+} + (1 - \theta) \frac{HFLIR_i - HFLIR^+}{HFLIR^+ - HFLIR^+} \tag{5.7}$$

Bu formülde geçen ifadelerden $HFLGU^+ = enk\ HFLGU_i$, $HFLGU^- = enb\ HFLGU_i$, $HFLIR^+ = enk\ HFLIR_i$ ve $HFLIR^- = enb\ HFLIR_i$ olarak seçilir. θ ise, uzlaşık çözüm içinde grup faydası ölçütüne verilen önem derecesini göstermektedir. VIKOR uygulamalarında genel olarak $\theta = 0{,}5$ olarak kabul edilmektedir.

Adım 7: Uzlaşık çözümün elde edilmesi

Uzlaşık çözüme ulaşmak için karar alternatifleri grup faydası, bireysel pişmanlık ve uzlaşı ölçütü açısından azalan sırada sıralanarak üç sıralama elde edilir. Üç ölçüt için de en düşük değere sahip alternatif en iyi olarak değerlendirilir. Ancak üç ölçüt için de en iyi alternatif aynı çıkmayabilir. VIKOR yönteminde uzlaşık çözüm, uzlaşı ölçütü açısından en iyi değere sahip olan ve aşağıdaki koşulları sağlayan a'alternatifidir:

- Koşul 1: Kabul edilebilir avantaj

  En düşük $HFLC_i$ değerine sahip alternatifin $HFLC_{a'}$ değerine, en düşük ikinci $HFLC_i$ değerine sahip alternatifin $HFLC_{a''}$ değerine sahip olduğu ve $DQ = 1/(m-1)$ olarak tanımlandığı kabul edilsin. $HFLC_{a'} - HFLC_{a''} \geq DQ$ koşulu sağlanırsa, kabul edilebilir avantaj koşulu sağlanmış olur.

- Koşul 2: Karar vermede kabul edilebilir istikrar
  En düşük $HFLC_i$ değerine sahip alternatifin aynı zamanda grup faydası ve/veya bireysel pişmanlık ölçütleri açısından da en iyi alternatif olması gerekir.

Eğer bu koşullardan herhangi biri sağlanmazsa birden fazla alternatif uzlaşık çözüm olarak kabul edilir. Yalnızca ikinci koşul sağlanmazsa, en düşük $HFLC_i$ değerine sahip a' ve a''uzlaşık çözüm olarak kabul edilir. Birinci koşulun sağlanmadığı durumda ise, $HFLC_i$ değeri sıralamasına göre $HFLC_{a^{(m)}} - HFLC_{a'} < DQ$ koşulunu sağlayan a', a'', …, $a^{(m)}$ alternatiflerinin tamamı uzlaşık çözüm olarak belirlenir.

5.2. Çok Amaçlı En İyileme

Çok amaçlı programlama, klasik tek amaçlı programlamanın birden fazla amaç fonksiyonunun açıkça ele alındığı durumlara genişletildiği en iyileme problemlerinde görülebilir [61]. Bununla birlikte, eğer bu fonksiyonlar birbiriyle çelişiyorsa, yaklaşım değişikliği söz konusudur. Bu durumda en iyi çözüm kavramı anlamsız hâle gelir, çünkü genel olarak çelişen amaç fonksiyonlarının tümünü aynı anda en iyileyen mümkün bir çözüm yoktur. Tek amaçlı programlama, iyimserlik yaklaşımını takip eder, yani, mümkün seçenek çiftleri arasında tam bir kıyaslama vardır ve geçişlilik uygulanır. Çözümlemenin üç temel sorusu olan varlık, teklik ve oluşturulması sorularını çözmeye yeterli matematiksel araçlar tek amaçlı programlama için mevcut olduğundan, bu matematiksel olarak iyi formüle

edilmiş bir problemdir. Birden fazla amaç fonksiyonu dikkate alındığında bu araçlar geçerliliğini yitirir.

Çok amaçlı programlama modellerini ele almak için, p tane amaç fonksiyonunun ve m tane kısıt denkleminin doğrusal ve karar değişkenlerinin sürekli olduğu Eş. (5.8) ile verilen aşağıdaki çok amaçlı doğrusal programlama problemini düşünelim:

$$
\begin{aligned}
& enb\ z_1 = f_1(x) = c_1 x = \sum_{j=1}^{n} c_{1j} x_j \\
& \dots \\
& enb\ z_p = f_p(x) = c_p x = \sum_{j=1}^{n} c_{pj} x_j \\
& \text{Kısıtlar} \\
& \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j = b_i, i = 1, \dots, m \\
& x_j \geq 0, \qquad j = 1, \dots, n
\end{aligned}
\tag{5.8}
$$

Bu modelde, *c* amaç fonksiyonu katsayılarını, *a* kısıt katsayılarını, *b* kısıt sağ taraf değerlerini ifade etmektedir. Mümkün çözüm uzayı *X*'in boş olmadığını ve her bir amaç fonksiyonu için en büyük değerin var olduğunu kabul edelim.

Tek amaçlı en iyilemede karar uzayı tek boyutlu iken çok amaçlı en iyilemede karar uzayı *p* boyutunda olan amaç fonksiyonu (kriter) uzayıdır. Burada her bir *x* çözümü $z = (z_1, \dots, z_p) = \left(f_1(x), \dots, f_p(x)\right)$ vektörü ile gösterilir.

Genel olarak amaç fonksiyonları birbiriyle çeliştiğinden bütün amaçları birlikte en iyileyen bir *x* mümkün çözümü yoktur. Bu nedenle, uzlaşık çözümlerin hesaplanmasında bir amaç fonksiyonunu iyileştirirken en az bir diğer amaç fonksiyonunun değerini kötüleştirmemek mümkün değildir. Bu ayrıcalıklı çözümler, etkin, baskın olmayan veya Pareto en iyi çözümler olarak adlandırılır ve vektör en iyileme modeline dayanan bir karar sürecinin olası çıktılarıdır.

5.2.1. Çok Amaçlı En İyileme için Çözüm Yaklaşımları

Tek amaçlı matematiksel modellerin çözümü nispeten basittir. Çözüm sonunda elde edilen çıktılar, en iyi sonuç ve gölge fiyatlar gibi ilgili diğer bilgilerdir. Çok amaçlı matematiksel modellerde birden fazla amaç fonksiyonu olduğundan genelde bütün amaç fonksiyonlarını eş zamanlı olarak en iyileyen tek bir en iyi çözüm yoktur. Bu tür durumlarda karar vericiler en iyi çözüm yerine en çok tercih edilen çözümü ararlar. Çok amaçlı matematiksel programlamada en iyi kavramının yerini Pareto en iyi veya etkinlik kavramı almıştır. Pareto en iyi ya da etkin, baskın olmayan çözümler, başka bir amaç fonksiyonunun değerini kötüleştirmeden iyileştirilemeyecek çözümleri ifade eder. Pareto en iyi çözümlerden oluşan kümeye Pareto kümesi denir. $f_i, i = 1,2, \dots, p$ fonksiyonları en büyükleme tipinde amaç fonksiyonları olmak üzere etkin çözümün matematiksel tanıtımı şu şekilde yapılabilir:

Çok amaçlı en iyileme probleminin mümkün bir *x* çözümü eğer her bir amaç fonksiyonu için $f_i(x') \geq f_i(x)$ koşulunu sağlayan başka en az bir x' çözümü yoksa etkin çözüm olarak tanımlanır. Her etkin çözüm kriter uzayında baskın olmayan veya iyileştirilemeyen bir vektöre karşılık gelir. Eğer $f_i(x') \geq f_i(x)$ koşulu, $f_i(x') > f_i(x)$ olarak değiştirilirse zayıf etkin çözüm elde edilir. Başka etkin çözümler tarafından baskılanabileceği için çok amaçlı en iyilemede zayıf etkin çözümlerin peşine düşülmez. Mantıklı karar verici Pareto en iyi çözümler içinden en çok tercih edilen çözümü arar.

Çok amaçlı en iyileme problemlerini çözmek için kullanılan yöntemler karar vericinin tercihlerini karar verme sürecine dâhil ettiği aşamaya göre önsel yöntemler, etkileşimli yöntemler ve soncul yöntemler olarak üç kategoride sınıflandırılabilir. Önsel yöntemlerde, karar verici hedef değerleri belirlemek veya amaç fonksiyonlarına ağırlık atamak gibi tercihlerini çözüm süreci başlamadan önce ifade eder. Bu yöntemlere getirilen eleştiri, karar vericinin hedef değerleri ve ağırlıkları önceden bilmesinin veya doğru olarak değerlendirmesinin oldukça zor olmasıdır. Etkileşimli yöntemlerde, karar verici ile hesaplama aşamalarında iletişim kurularak süreç yakınsar ve az sayıda aşama sonunda tercih edilen çözümlere ulaşılır. Karar verici çözümü cevapları ile devamlı olarak yöneterek en tercih edilen çözüme yönlendirir. Buradaki sakınca, karar vericinin çözümün tamamını (Pareto küme) veya yakınsamasını görmemesidir. Bu nedenle en tercih edilen çözüm, çözüm sırasında gördüğü ve karşılaştırdığı çözümler arasındaki en tercih edilen çözümdür. Soncul

yöntemlerde, problemin etkin çözümleri (tamamı veya yeterli sayıda temsil eden çözüm) oluşturulur ve karar verici içlerinden en tercih edileni seçmek üzere sürece dâhil olur.

Soncul yöntemler, etkin çözümleri hesaplamanın zaman alan bir süreç olmasından ve uygun yazılım eksikliği nedeniyle en az tercih edilen yöntemlerdir. Ancak bu yöntemlerin önemli avantajları söz konusudur. Çözüm süreci öncelikle etkin çözümlerin oluşturulması ve sonrasında karar vericinin tüm bilgiyi görerek sürece dâhil olması olmak üzere iki bağımsız aşamaya bölünmüştür. Bu nedenle, karar vericinin ikinci aşamada tüm olası seçeneklerin elde olduğunda sürece katılmasından ötürü, karar vericinin neredeyse hiç bulunmadığı ve karar vericiyle etkileşimin zor olduğu durumlarda bu yöntemler uygundurlar. Bunun yanında, tüm potansiyel çözümler taranarak karar vericinin son kararını pekiştirirler.

Bu kısımda önsel yöntemlerden birisi olarak sınıflandırılan ve her bir amaç fonksiyonu için elde edilen en iyi çözümlerden oluşan referans noktaya (ideal çözüm) en yakın olan çözümü belirlemeye çalışan referans nokta yöntemi üzerinde durulacaktır.

5.2.2. Referans nokta yöntemi

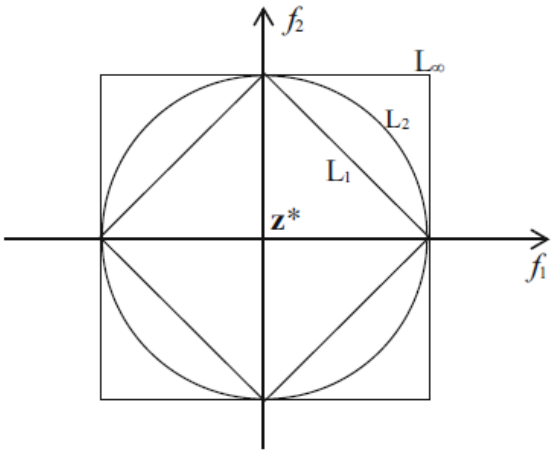
Baskın olmayan çözümleri hesaplamak için mümkün çözüm bölgesinin amaç fonksiyonu uzayında belirlenmiş bir referans noktaya belirli bir metriğe göre uzaklığının en küçüklenmesi yaklaşımı kullanılabilir.

İdeal çözüm z^* sıklıkla referans nokta olarak kullanılır. Burada, z^* değerinin bileşenlerinin tek amaçlı en iyileme ile edilen ve her bir boyut için çözüm uzayındaki erişilebilir en iyi değeri sunması mantığına dayanılmaktadır. Referans nokta ulaşılabilir bir çıktıyı gösterirse, ölçeklendirme fonksiyonu referans noktaya ulaşmak veya geçmeyi hedeflediğinden, başarı ölçeklendirme fonksiyonu olarak adlandırılır.

Ölçeklendirme fonksiyonunu oluşturmak için bir metrik seçilmesi gerekir. Metrik, n boyutlu bir uzaydaki z^1 ve z^2 nokta çifti arasındaki uzaklığı sayısal bir $\|z^1 - z^2\|$ değerine dönüştüren bir uzaklık fonksiyonudur. L_∞ metriği için n boyutlu uzaydaki iki nokta arasındaki uzaklık Eş. (5.9) ile verildiği şekilde hesaplanır:

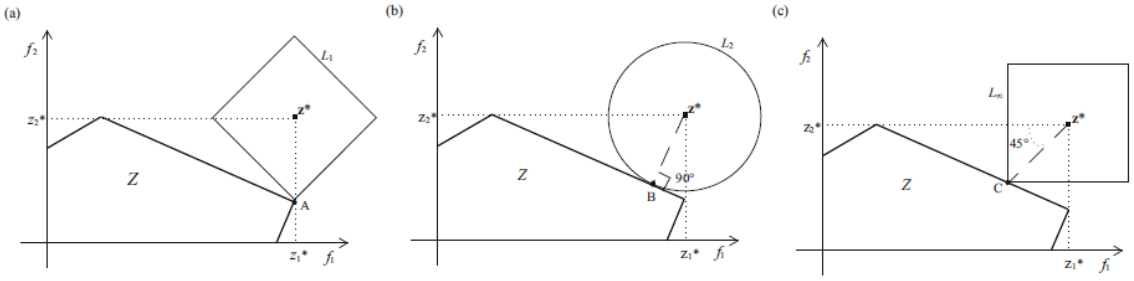
$$\|z^1 - z^2\|_q = \left[\sum_{i=1}^{n} \left|z_i^1 - z_i^2\right|^q\right]^{1/q} \quad q \in \{1,2,\dots\}$$
$$\|z^1 - z^2\|_\infty = \operatorname*{enb}_{i=1,\dots,n} \left|z_i^1 - z_i^2\right| \tag{5.9}$$

L_1, L_2 ve L_∞ metrikleri için z^*'dan aynı uzaklıktaki noktaların geometrik yerleri Şekil 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.2. L_1, L_2 ve L_∞ metrikleri için z^*'a aynı uzaklıktaki noktaların gösterimi

Şekil 5.3 (a), (b) ve (c)'de gösterilen A, B ve C noktaları ise Z bölgesinin z^*'a sırasıyla L_1, L_2 *ve* L_∞ metrikleri için en küçük uzaklığa sahip noktalarını göstermektedir.



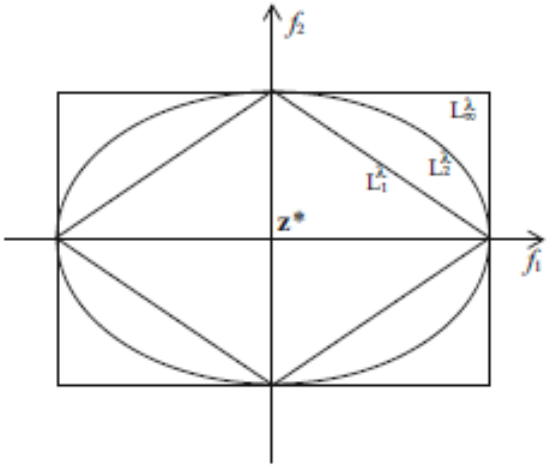
Şekil 5.3. L_1, L_2 ve L_∞ metriklerine göre Z bölgesinin z^*'a en yakın noktalarının gösterimi

L_1, L_2 *ve* L_∞ metrikleri özellikle önemlidir. L_1, $\left|z_i^1 - z_i^2\right|$'nin bileşenlerinin toplamı olup Manhattan gibi dikdörtgen bir şehirdeki bloklar arası uzaklıktır. L_2, Öklid uzaklığıdır. Chebyshev uzaklığı olarak ifade edilmekte olan L_∞ ise, $\left|z_i^1 - z_i^2\right|$ 'nin en büyük farka sahip bileşeni olup en kötü durumu ifade etmektedir.

Bu uzaklıklara ek olarak ağırlıklı bir L_q^λ metrik ailesi de tanımlanabilir (Eş. (5.10)). Buradaki $\lambda \geq 0$ vektörü bileşenlere ölçek ya da önem çarpanı atamada kullanılmaktadır.

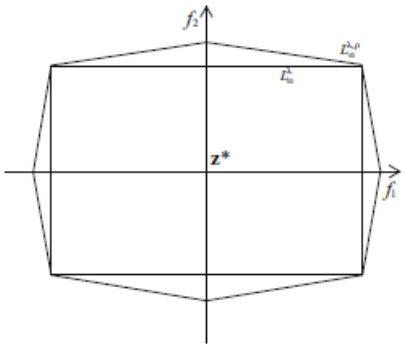
$$\begin{aligned} \|z^1 - z^2\|_q^\lambda &= \left[\sum_{i=1}^n \left(\lambda_i \left|z_i^1 - z_i^2\right|\right)^q\right]^{1/q} \quad q \in \{1,2,\dots\} \\ \|z^1 - z^2\|_\infty^\lambda &= \operatorname*{enb}_{i=1,\dots,n} \lambda_i \left|z_i^1 - z_i^2\right| \end{aligned} \tag{5.10}$$

$\lambda_1 < \lambda_2$ olmak üzere L_1^λ, L_2^λ ve L_∞^λ metrikleri için z^*'dan aynı uzaklıktaki noktaların geometrik yerleri Şekil 5.4 ile verilmiştir.



Şekil 5.4. L_1^λ, L_2^λ ve L_∞^λ metrikleri için z^*'a aynı uzaklıktaki noktaların gösterimi

L_1^λ ve L_∞^λ metriklerinin birleşimi olan ρ_i'nin oldukça küçük pozitif bir değeri için $\|z^1 - z^2\|_\infty^\lambda + \sum_{i=1}^2 \rho_i |z^1 - z^2|$ ile tanımlanan $L_\infty^{\lambda,p}$ metriği için dış eş uzaklık çizgisi Şekil 5.5 ile gösterilmiştir. Bu ifade uzatılmış ağırlıklı Chebyshev metriğidir.



Şekil 5.5. L_∞^λ ve $L_\infty^{\lambda,p}$ metriklerine göre z^*'dan eşit uzaklıktaki noktaların gösterimi

$q \in \{1,2,\dots\}$ için L_q^{λ}, referans noktaya uzaklığı en küçüklemeyi içeren sayısal problemleri çözerek baskın olmayan çözümleri belirlemede kullanılabilir olsa da, en büyük uzaklık boyutunun, diğer bir deyişle en büyük sapmanın en küçüklenmesi için Chebyshev uzaklığının (L_{∞}^{λ}) kullanılması önemlidir. Genel olarak, $L_{\infty}^{\lambda,p}$ metriği elde edilen baskın olmayan ve yalnızca zayıf baskın olmayan çözümleri garantilemek için kullanılır.

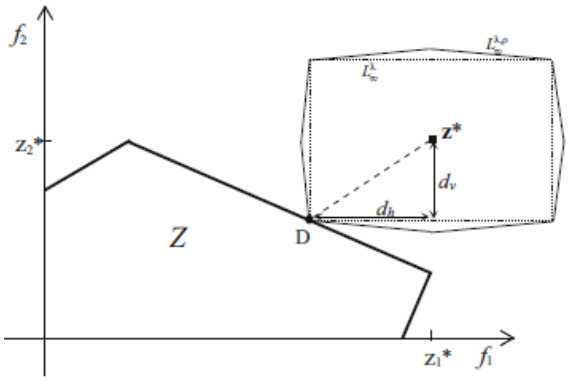
Önerme: ρ_k küçük pozitif sayılar olmak üzere $x^1 \in X$ aşağıdaki problemin çözümü ise, x^1 Eş. (5.11) ile verilen çok amaçlı problemin etkin bir çözümüdür.

$$\operatorname*{enk}_{x\in X}\left\{\operatorname*{enb}_{k=1,\dots,p} \lambda_k[z_k^* - f_k(x)] - \sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x)\right\}, bazı\ \lambda \geq 0\ değerleri\ için \qquad (5.11)$$

Verilen önermenin doğruluğu şu şekilde gösterilebilir. $\operatorname*{enb}_{k=1,\dots,p} \lambda_k[z_k^* - f_k(x)] = v_1$ olmak üzere x^1'in problemin en iyi ancak etkin olmayan bir çözümü olduğunu varsayalım. Bu nedenle, en az bir k değeri için eşitsizliğin kesin olduğu $f_k(x^2) \geq f_k(x^1), k = 1,\dots,p$ koşulunu sağlayan bir x^2 çözümü vardır. Bu koşullarda $\lambda_k[z_k^* - f_k(x^2)] \leq v_1, k = 1,\dots,p$ ve $\sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x^2) > \sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x^1)$'dir. Bundan dolayı, hipotezi yalanlayan x^1, Eş. (5.11) ile verilen problemin en iyi çözümü olamaz. Bu nedenle, x^1 'in etkin olması gerekir.

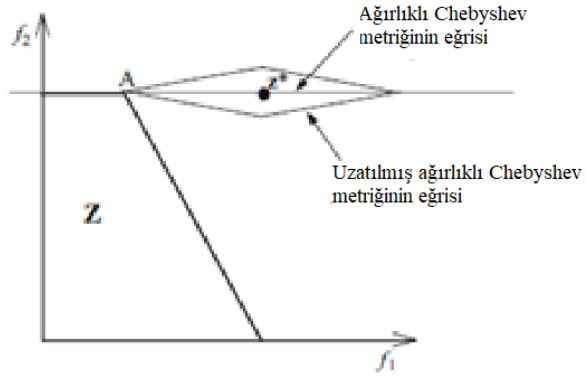
ρ_k'nın yeterince küçük değerleri için verilen önerme çok amaçlı doğrusal programlamanın gerek koşulunu da tamamlamaktadır. Bu nedenle, bu ölçeklendirme tekniği çok amaçlı doğrusal programlama probleminin etkin ya da baskın olmayan çözümlerinin tamamının kümesini elde etmeyi de mümkün kılmaktadır.

Şekil 5.6'da hesaplama süreci gösterilmiştir. $\lambda_1 < \lambda_2$ olan belirli bir λ ağırlık vektörü düşünüldüğünde, D noktası $L_{\infty}^{\lambda,p}$ metriğine göre veya $\sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x)$ teriminin olmadığı durumda L_{∞}^{λ} metriğine göre z*'a uzaklığı en küçükleyen çözümdür. $\frac{d_v}{d_h} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 5.6. Uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının en küçüklenmesi

Şekil 5.7'de gösterildiği gibi, $\sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x)$ terimi ölçeklendirme problemi alternatif en iyi çözüme sahip olduğunda, yalnızca zayıf etkin olan çözümlerden kaçınmak için kullanılır. $\lambda_1 = 0$ olduğu düşünüldüğünde, z*'dan geçen yatay çizgi üzerindeki tüm çözümler L_∞^λ metriğine göre z*'a eşit uzaklıktadır. $L_\infty^{\lambda,p}$ metriği kesin baskın olmayan A çözümünü bulmayı mümkün kılmaktadır.



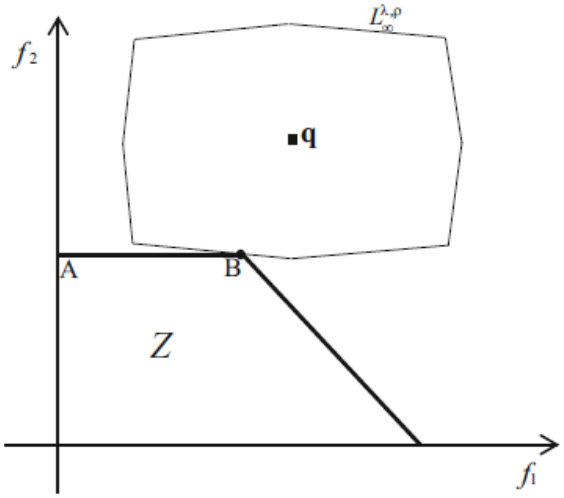
Şekil 5.7. Ağırlıklı Chebyshev ve uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının gösterimi

Yukarıda Eş. (5.11) ile verilen problem, Eş. (5.12) ile aşağıda verilen probleme denktir:

$$\begin{aligned} &\text{enk}\left\{v - \sum_{k=1}^{p} \rho_k f_k(x)\right\} \\ &kısıtlar \\ &\lambda_k\left(z_k^* - f_k(x)\right) \le v, k = 1, \dots, p \\ &x \in X \\ &v \ge 0 \end{aligned} \tag{5.12}$$

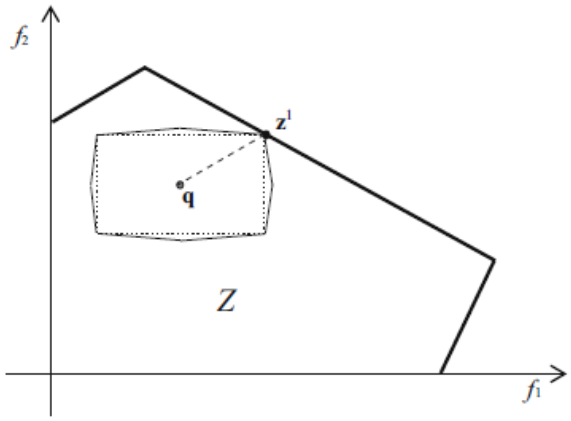
Yöntemde farklı referans nokta değerleri kullanılabilir. Referans noktanın bileşenleri karar vericinin her amaç fonksiyonu için ulaşmayı istediği değerleri ifade etmektedir. Bu amaçla, z^* ideal çözümünü kullanmak, bileşenleri mümkün çözüm bölgesi içinde her bir amaç fonksiyonu için ulaşılabilecek en iyi değerleri gösterdiği için tercih edilebilir.

Şekil 5.8'de baskın olmayan çözümlerin erişilemeyen q referans noktasına uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığı en küçüklenerek hesaplanması gösterilmektedir. Şekildeki örnekte uzatılmamış Chebyshev uzaklığının en küçüklenmesi AB kısmındaki tüm çözümlerin hesaplanmasını mümkün kılarken, bu çözümlerden kesin baskın çözüm olan B noktası dışındaki tüm çözümler sadece zayıf baskın çözümlerdir.



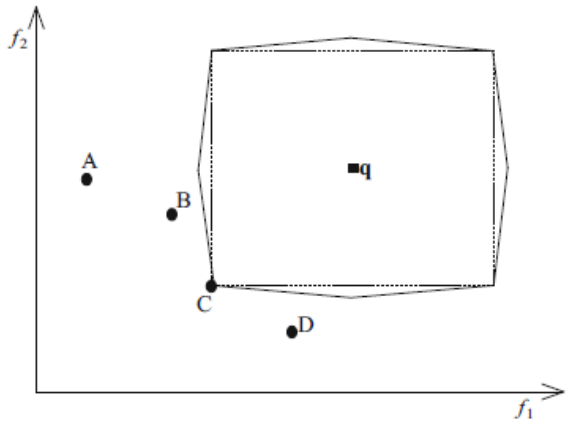
Şekil 5.8. Referans noktaya uzatılmış ağırlıklı Chebyshev uzaklığının en küçüklenmesi

Eğer referans nokta mümkün çözüm bölgesinin içinde ise, yani ondan daha etkin bir çözüm varsa Chebyshev uzaklığını kullanmak mümkün olmaz, ama bu yöntem yine de baskın çözümleri hesaplamak için Eş. (5.11)'deki v değişkeninin işaretçe kısıtsız olduğu düşüncesi altında geçerlidir. Bu durumda, bu bir başarı ölçeklendirme programıdır. Şekil 5.9 q referans noktasının izdüşümünün mümkün çözüm bölgesi içinde baskın sınırda olduğunu göstermektedir. z^1, Eş. (5.11) ile verilen problemde q ile z^*'ın değiştirilmesi ve v değişkeninin işaretçe kısıtsız olduğu düşünülerek yeniden çözülmesi ile elde edilen baskın çözümdür. $\lambda_1 < \lambda_2$ olup bu durum Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Referans noktanın çözüm bölgesinin içinde olduğu durumun gösterimi

Şekil 5.10 ise tam sayılı programlama durumunu göstermektedir. (Uzatılmış) ağırlıklı Chebyshev metriği ile desteklenmeyen *C* çözümü dâhil tüm baskın çözümlere ulaşmak mümkündür. *C* çözümüne amaç fonksiyonlarının ağırlıklı toplamlarını en iyileme yoluyla ulaşılamadığına dikkat edilmelidir.



Şekil 5.10. Uzatılmış Chebyshev metriğinin tam sayılı programlama gösterimi

5.3. ELECTRE-TRI

ELECTRE TRI çeşitli türevleri olan bir çok kriterli karar verme yaklaşımıdır. Bu kısımda ele alınacak ELECTRE TRI yaklaşımı Mousseau ve Dias [62, 63] tarafından önerilmiştir. Yöntem uygulamasında ihtiyaç duyulan girdiler aşağıda verilmiştir:

- $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ kümesinin elemanı olan m karar seçeneği sıralanır.

- $G = \{g_1(.), \dots, g_n(.)\}$ kümesinin elemanı olan n tane kritere göre değerlendirme yapılır. Takip eden işlemlerde $g_j(a_i)$ değeri yüksek olan a_i karar seçeneğinin $g_j(.)$ kriteri temelinde daha iyi performans gösterdiği kabul edilir.
- $B = \{b^0, \dots, b^k\}$, $C = \{c^0, \dots, c^k\}$ ile gösterilen k tane kategoriye ait profilleri göstermektedir. Her bir c^h $(h = 1, \dots, k)$ kategorisi sırasıyla b^{h-1} ve b^h ile gösterilen alt sınır ve üst sınır olmak üzere iki referans profil ile tanımlanır. Genel olarak, c^1 en kötü kategoriyi, c^k ise en iyi kategoriyi ifade eder.

Her bir j kriteri için $(j = 1, \dots, n)$ aşağıdaki tercihle ilişkili parametreler tanımlanır:

- q_j, $g_j(.)$ kriteri için farksızlık eşiğini gösterir: iki performans düzeyinin farkı q_j'e eşit veya daha az ise, ayırt edilemez oldukları söylenir.
- p_j, $g_j(.)$ kriteri için tercih eşiğini gösterir: Bir performans düzeyinin başka bir performans düzeyinden farkı p_j'e eşit veya daha fazla ise, kesin olarak daha iyi olduğu söylenir.
- v_j, $g_j(.)$ kriteri için veto eşiğini gösterir: Eğer bir karar seçeneği, bir referans profilden $g_j(.)$ kriterine göre v_j'e eşit veya daha fazla farkla kötü ise, diğer kriterler için çok iyi olsa bile, bu fark telafi edilemeyeceğinden bu kriter karar seçeneğinin en az bu profil kadar iyi olduğu çıkarımını veto eder.
- k_j, $g_j(.)$ kriterinin ağırlığını gösterir: Genel olarak, ağırlıklar negatif olmayan ve toplamı 1'e eşit olan sayısal değerlerdir.
- λ (kesme düzeyi) üstünlük çıkarımını garantilemek için gerekli baskınlık düzeyini gösterir. Örneğin, λ=0,67 olarak alındığında, veto durumu olmadığı takdirde üstün olan kriterlerin ağırlıkları toplamının en az 0,67 olmasını gerekli kılar.

Tanımlanan bu girdiler ve parametreler temelinde, bir karar seçeneğinin sınıflandırılması aşağıdaki hesaplamalar gerçekleştirilerek elde edilir:

- $c_j(a_i, b^h)$ tek bir $g_j(.)$ kriterinin, a_i karar seçeneğinin b^h profiline üstünlüğünü 0 (katılmıyor) ile 1 (tamamen katılıyor) arasında bir ölçekte ne ölçüde desteklediğini gösteren uyum endeksidir. Uyum endeksi, Eş. (5.13) ile verilmiştir:

$$c_j(a_i, b^h) = \begin{cases} 0 & , g_j(a_i) - g_j(b^h) < -p_j \; ise \\ \left(g_j(a_i) - g_j(b^h) + p_j\right), & -p_j \leq g_j(a_i) - g_j(b^h) < -q_j \; ise \\ 1 & , g_j(a_i) - g_j(b^h) \geq -q_j \; ise \end{cases} \quad (5.13)$$

- $d_j(a_i, b^h)$ tek bir $g_j(.)$ kriterinin, a_i karar seçeneğinin b^h profiline üstünlüğü çıkarımını 0 hayır, 1 evet olacak şekilde veto eden ve Eş. (5.14) ile gösterilen uyumsuzluk endeksidir.

$$d_j(a_i, b^h) = \begin{cases} 0, g_j(a_i) - g_j(b^h) > -v_j \; ise \\ 1, g_j(a_i) - g_j(b^h) \leq -v_j \; ise \end{cases} \quad (5.14)$$

- $c(a_i, b^h)$, a_i karar seçeneğinin b^h profiline üstünlüğü çıkarımı için kriter ağırlıklarını da dikkate alan genel uyum endeksidir. Genel uyum endeksi Eş. (5.15) ile hesaplanır:

$$c(a_i, b^h) = \sum_{j=1}^{n} k_j c_j(a_i, b^h) \quad (5.15)$$

- $s(a_i, b^h)$, a_i karar seçeneğinin b^h profiline üstünlüğü çıkarımına ve buna karşı argümanların toplamını içeren toplam güvenilirlik değeridir (Eş. (5.16)).

$$s(a_i, b^h) = c(a_i, b^h)\left[1 - \underset{j \in \{1,\ldots,n\}}{\text{enb}} d_j(a_i, b^h)\right] \quad (5.16)$$

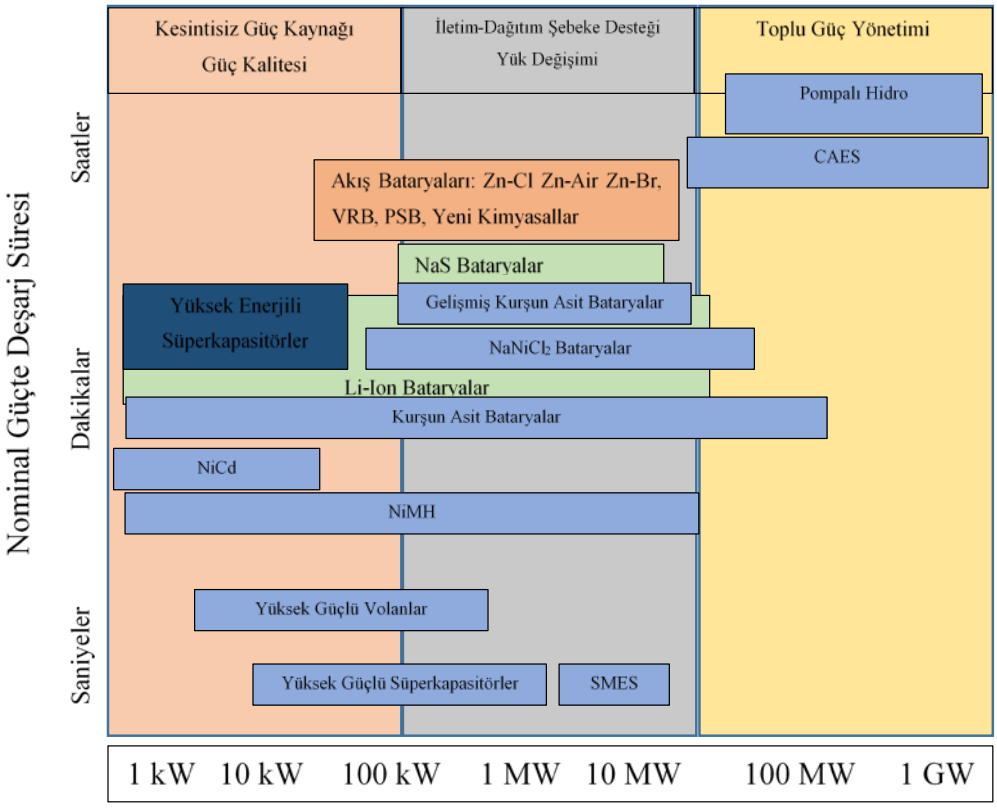
Yöntemin bu çalışmada kullanılan türevinde, bir karar seçeneği b^1 referans profiline üstün gelecek kadar iyi değilse C^1 sınıfına; b^1 referans profiline üstün gelecek kadar iyi ancak, b^2 referans profiline üstün gelecek kadar iyi değilse C^2 sınıfına atanır. Sınıf belirleme işlemi, her karar seçeneği için benzer şekilde üstün gelemediği ilk referans profile kadar referans profiller ile kıyaslamalar yapılarak gerçekleştirilir. Yani, sınıf belirleme kuralı aşağıda Eş. (5.17) ile verildiği gibidir:

$$a_i \text{ karar seçeneği } C^h \text{ sınıfına atanır } \Leftrightarrow s(a_i, b^{h-1}) \geq \lambda \; ve \; s(a_i, b^h) < \lambda \quad (5.17)$$

6. UYGULAMA

6.1. Enerji Depolama Teknolojilerinin Değerlendirilmesi

Ele alınan enerji ağında kullanılması mümkün olabilecek enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesinde beşinci bölümde anlatılan tereddütlü bulanık dilsel terimler kümeleri temelli grup karar verme yaklaşımı ve tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemi kullanılmıştır. Tereddütlü bulanık dilsel terimler kümeleri temelli grup karar verme yaklaşımı ile değerlendirme kriterlerinin öncelik değerleri hesaplanmış, tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemi ile de enerji depolama teknolojilerinin değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın yapılacağı bölgenin büyüklüğüne uygun olan enerji depolama teknolojileri için Rastler [64] tarafından yapılan Şekil 6.1 ile verilen sınıflandırmadan yararlanılmıştır.



Şekil 6.1. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması [64]

Bu sınıflandırmada şebeke desteği amacıyla kullanılan ve verilerine erişilebilen volan (A_1), süper kapasitör (A_2), hidrojen (A_3), lityum-iyon bataryalar (A_4), sodyum sülfür (NaS)

bataryalar (A_5) ve vanadyum redoks bataryalar (A_6) teknolojilerinin değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Tereddütlü bulanık sayılara dayalı grup karar verme yaklaşımından faydalanılarak enerji depolama teknolojilerinin seçiminde etki eden faktörlerin ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Bu sürece ilişkin işlem adımları bu kısımda verilmiştir.

Adım 1: Hedefin, kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi

Bu kısımda ele alınan karar probleminde, şebeke desteği sağlayacak en uygun enerji depolama teknolojisini belirlemek hedeflenmiştir. Bu kapsamda son 10 yılda enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesine yönelik yapılmış çok kriterli karar verme uygulamaları incelenerek ele alınan kriterler Çizelge 6.1 ile sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesinde kullanılan kriterler

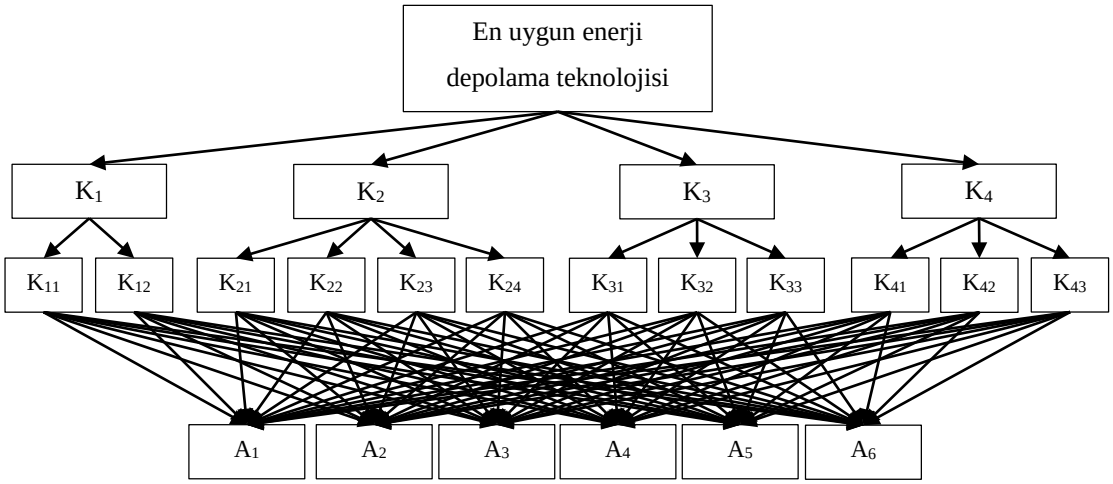
Kriterler	İncelenen Çalışmalar											
	[65]	[66]	[67]	[68]	[69]	[70]	[71]	[72]	[73]	[74]	[75]	*
CO_2 salınımı					+	+				+	+	+
Depolama kapasitesi		+	+	+	+		+	+			+	+
Ekolojik etki		+		+	+	+			+		+	+
Enerji maliyeti				+				+	+			
Enerji yoğunluğu			+			+			+	+	+	+
Erişilebilirlik								+				
Güvenilirlik			+								+	
Hava ve su kirliliği		+		+				+			+	+
İstihdam yaratma											+	+
İşletme ve bakım maliyetleri	+	+		+	+		+				+	+
Katı atık üretimi								+				
Kendiliğinden deşarj oranı							+			+		
Sağlık ve güvenlik	+	+		+			+		+	+	+	+
Teknolojik olgunluk	+	+		+		+					+	
Toplumsal kabul edilebilirlik				+		+		+			+	+
Üretim ve kurulum kolaylığı			+									
Verimlilik		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Yaşam ömrü		+		+		+		+	+	+	+	+
Yatırım maliyeti	+	+		+	+	+	+			+	+	+

* Bu çalışma

Bu inceleme sonunda 12 kriterin uygulama için uygun olduğuna karar verilmiş ve bu kriterler ekonomik, teknik, toplumsal ve çevresel kriterler olarak dört grupta toplanmıştır. Dikkate alınan kriterler aşağıda listelenmiştir.

- Ekonomik Kriterler (K_1)
    - Yatırım maliyeti (K_{11})
    - İşletme ve bakım maliyeti (K_{12})
- Teknik Kriterler (K_2)
    - Verimlilik (K_{21})
    - Enerji yoğunluğu (K_{22})
    - Depolama kapasitesi (K_{23})
    - Yaşam ömrü (K_{24})
- Toplumsal Kriterler (K_3)
    - Toplumsal kabul edilebilirlik (K_{31})
    - İstihdam yaratma (K_{32})
    - Sağlık ve güvenlik (K_{33})
- Çevresel Kriterler (K_4)
    - CO_2 yoğunluğu (K_{41})
    - Hava ve su kirliliği (K_{42})
    - Ekolojik etki (K_{43})

Şekil 6.1'de sunulan sınıflandırma doğrultusunda verileri elde edilebilen altı alternatif depolama teknolojisini de içerecek biçimde problem Şekil 6.2'de verilen hiyerarşik yapıda tanımlanmıştır.



Şekil 6.2. Enerji depolama teknolojisi belirleme problemi için hiyerarşik yapı

Adım 2: Dilsel terim kümesinin anlam ve söz dizimi sırasının tanımlanması

Yavuz ve diğerleri [58] tarafından önerilen ve Çizelge 5.1 ile sıralanmış halde verilen yedi dilsel terimin kullanılması uygun bulunmuştur.

Adım 3: İçerikten bağımsız gramerin tanımlanması

Gramerin tanımlamasında yine Yavuz ve diğerleri [58] tarafından tanımlanan tek terim veya birleşik terimler içeren gramer yapısının kullanılması uygun görülmüştür. X ve Y Çizelge 5.1'de verilen sıralı dilsel terimlerden ikisini göstermek üzere, değerlendirme ifadeleri oluşturulurken kullanılabilecek gramer yapıları aşağıda verilmiştir:

- En az X
- En çok X
- X'den büyük
- X'den küçük
- X ve Y arasında
- X'e eşit

Adım 4: Uzmanların kriterler ve alt kriterler için tercihlerinin toplanması

Enerji Bakanlığı'nda görevli bir uzman (U1) ile enerji depolama teknolojileri konusunda çalışan bir akademisyenden (U2) yukarıda belirtilen değerlendirme yapısından yararlanarak kriter ve alt kriter çiftlerini problemin hiyerarşik yapısı içerisinde değerlendirmesi istenmiştir. Ana kriterler arasındaki değerlendirmeler Çizelge 6.2'de, alt kriterler için

değerlendirmeler ise sırasıyla Çizelge 6.3, Çizelge 6.4, Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verildiği gibidir.

Çizelge 6.2. Ana kriterler için uzmanların değerlendirmeleri

	Kriter	K_1	K_2	K_3	K_4
U1	K_1	-	Yüksekten Az	En Az Orta	Orta İle Yüksek Arasında
	K_2	Düşükten Fazla	-	En Az Yüksek	Orta İle Çok Yüksek Arasında
	K_3	En Çok Orta	En Çok Düşük	-	En Çok Çok Düşük
	K_4	Düşük İle Orta Arasında	Çok Düşük İle Orta Arasında	En Az Çok Yüksek	-
U2	K_1	-	Düşük İle Orta Arasında	En Az Yüksek	Orta ile Çok Yüksek Arasında
	K_2	Orta ile Yüksek Arasında	-	Yüksekten Fazla	En Az Yüksek
	K_3	En Fazla Düşük	Düşükten Az	-	Önemsiz
	K_4	Çok Düşük İle Orta Arasında	En Çok Düşük	Mutlak Önemli	-

Çizelge 6.3. K_1 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri

	Kriter	K_{11}	K_{12}
U1	K_{11}	-	En Az Orta
	K_{12}	En Çok Orta	-
U2	K_{11}	-	Düşük İle Orta Arasında
	K_{12}	Orta ile Yüksek Arasında	-

Çizelge 6.4. K_2 kriterinin alt kriterler için uzmanların değerlendirmeleri

	Kriter	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
U1	K_{21}	-	Ortadan Fazla	Orta	Düşük İle Orta Arasında
	K_{22}	Ortadan Az	-	En Çok Orta	En Çok Düşük
	K_{23}	Orta	En Az Orta	-	Orta
	K_{24}	Orta ile Yüksek Arasında	En Az Yüksek	Orta	-
U2	K_{21}	-	En Az Çok Yüksek	Ortadan Az	En Çok Orta
	K_{22}	En Çok Çok Düşük	-	Çok Düşük ile Düşük Arasında	En Çok Düşük
	K_{23}	Ortadan Fazla	Yüksek İle Çok Yüksek Arasında	-	Orta
	K_{24}	En Az Orta	En Az Yüksek	Orta	-

Çizelge 6.5. K_3 kriterinin alt kriterleri için uzmanların değerlendirmeleri

	Kriter	K_{31}	K_{32}	K_{33}
U1	K_{31}	-	En Çok Düşük	Düşükten Az
	K_{32}	En Az Yüksek	-	En Çok Düşük
	K_{33}	Yüksekten Fazla	En Az Yüksek	-
U2	K_{31}	-	Düşükten Az	En Çok Orta
	K_{32}	Yüksekten Fazla	-	En Az Yüksek
	K_{33}	En Az Orta	En Çok Düşük	-

Çizelge 6.6. K_4 kriterinin alt kriterler için uzmanların değerlendirmeleri

	Kriter	K_{41}	K_{42}	K_{43}
U1	K_{41}	-	Orta	Orta
	K_{42}	Orta	-	Orta
	K_{43}	Orta	Orta	-
U2	K_{41}	-	Çok Düşük İle Orta Arasında	En Çok Orta
	K_{42}	Orta ile Çok Yüksek Arasında	-	Orta
	K_{43}	En Az Orta	Orta	-

Adım 5: Uzman tercihlerinin tereddütlü bulanık dilsel terim kümelerine dönüştürülmesi

Uzmanların değerlendirmeleri, dilsel ifadenin kapsadığı dilsel terimleri içeren kümeler şekline dönüştürülür. Daha sonra, bu kümeler kümelerdeki en düşük ve en yüksek öneme sahip elemanları içeren dilsel terim aralıkları halinde ifade edilir.

Çizelge 6.7. Ana kriterlerin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri

	Kriter	K_1	K_2	K_3	K_4
U1	K_1	-	[öd, oö]	[oö, mö]	[oö, yö]
	K_2	[oö, mö]	-	[yö, mö]	[oö, çy]
	K_3	[öd, oö]	[öd, dö]	-	[öd, çd]
	K_4	[dö, oö]	[çd, oö]	[çy, mö]	-
U2	K_1	-	[dö, oö]	[yö, mö]	[oö, çy]
	K_2	[oö, çy]	-	[çy, mö]	[yö, mö]
	K_3	[öd, dö]	[öd, çd]	-	[öd, öd]
	K_4	[çd, oö]	[öd, dö]	[mö, mö]	-

Çizelge 6.8. K_1 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri

	Kriter	K_{11}	K_{12}
U1	K_{11}	-	[oö, mö]
	K_{12}	[öd, oö]	-
U2	K_{11}	-	[dö, oö]
	K_{12}	[oö, yö]	-

Çizelge 6.9. K_2 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri

	Kriter	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
U1	K_{21}	-	[yö, mö]	[oö, oö]	[dö, oö]
	K_{22}	[öd, dö]	-	[öd, oö]	[öd, dö]
	K_{23}	[oö, oö]	[oö, mö]	-	[oö, oö]
	K_{24}	[oö, yö]	[yö, mö]	[oö, oö]	-
U2	K_{21}	-	[çy, mö]	[öd, dö]	[öd, oö]
	K_{22}	[öd, çd]	-	[çd, dö]	[öd, dö]
	K_{23}	[yö, mö]	[yö, çy]	-	[oö, oö]
	K_{24}	[oö, mö]	[yö, mö]	[oö, oö]	-

Çizelge 6.10. K_3 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri

	Kriter	K_{31}	K_{32}	K_{33}
U1	K_{31}	-	[öd, dö]	[öd, çd]
	K_{32}	[yö, mö]	-	[öd, dö]
	K_{33}	[çy, mö]	[yö, mö]	-
U2	K_{31}	-	[öd, çd]	[öd, oö]
	K_{32}	[çy, mö]	-	[yö, mö]
	K_{33}	[oö, mö]	[öd, dö]	-

Çizelge 6.11. K_4 kriterinin alt kriterlerinin değerlendirmesi için dilsel terim kümeleri

	Kriter	K_{41}	K_{42}	K_{43}
U1	K_{41}	-	[oö, oö]	[oö, oö]
	K_{42}	[oö, oö]	-	[oö, oö]
	K_{43}	[oö, oö]	[oö, oö]	-
U2	K_{41}	-	[çd, oö]	[öd, oö]
	K_{42}	[oö, çy]	-	[oö, oö]
	K_{43}	[oö, mö]	[oö, oö]	-

Adım 6: Kötümser ve iyimser birleştirilmiş tercihlerin dilsel bütünleştirme operatörü yardımıyla elde edilmesi

U1 ve U2'den alınan görüşlerden elde edilen dilsel terim kümeleri aritmetik ortalama ile iyimser ve kötümser tercihleri belirlemek için bütünleştirilmiştir. Aşağıda ana kriterlerden K_1 ile K_2 kıyaslaması için yapılan kötümser ve iyimser birleştirilmiş tercihlerin elde edilmesi işlemi Eş. (6.1) ve Eş. (6.2) ile örnek olarak gösterilmiş, tüm kriter ve alt kriterlere ilişkin hesaplama sonuçları Çizelge 6.12, Çizelge 6.13, Çizelge 6.14, Çizelge 6.15 ve Çizelge 6.16 ile sunulmuştur.

$$Kötümser_{K_1,K_2} = \frac{öd + dö}{2} = \frac{0+2}{2} = 1 = çdö \tag{6.1}$$

$$İyimser_{K_1,K_2} = \frac{oö + oö}{2} = \frac{3+3}{2} = 3 = oö \tag{6.2}$$

Çizelge 6.12. Ana kriterler için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler

İyimser Birleştirilmiş Tercihler				
Kriter	K_1	K_2	K_3	K_4
K_1	-	3,000	6,000	4,500
K_2	5,000	-	6,000	5,500
K_3	2,500	1,500	-	0,500
K_4	3,000	2,500	6,000	-

Kötümser Birleştirilmiş Tercihler				
Kriter	K_1	K_2	K_3	K_4
K_1	-	1,000	3,500	3,000
K_2	3,000	-	4,500	3,500
K_3	0,000	0,000	-	0,000
K_4	1,500	0,500	5,500	-

Çizelge 6.13. K_1 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler

İyimser Birleştirilmiş Tercihler		
Kriter	K_{11}	K_{12}
K_{11}	-	6,000
K_{12}	2,500	-

Kötümser Birleştirilmiş Tercihler		
Kriter	K_{11}	K_{12}
K_{11}	-	3,500
K_{12}	0,000	-

Çizelge 6.14. K_2 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler

İyimser Birleştirilmiş Tercihler				
Kriter	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
K_{21}	-	4,000	1,667	2,000
K_{22}	1,000	-	1,667	1,333
K_{23}	3,000	3,667	-	2,000
K_{24}	3,333	4,000	2,000	-

Kötümser Birleştirilmiş Tercihler				
Kriter	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
K_{21}	-	3,000	1,000	0,667
K_{22}	0,000	-	0,333	0,000
K_{23}	2,333	2,333	-	2,000
K_{24}	2,000	2,667	2,000	-

Çizelge 6.15. K3 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler

İyimser Birleştirilmiş Tercihler			
Kriter	K_{31}	K_{32}	K_{33}
K_{31}	-	1,500	2,000
K_{32}	6,000	-	4,000
K_{33}	6,000	4,000	-

Kötümser Birleştirilmiş Tercihler			
Kriter	K_{31}	K_{32}	K_{33}
K_{31}	-	0,000	0,000
K_{32}	4,500	-	2,000
K_{33}	4,000	2,000	-

Çizelge 6.16. K4 kriterinin alt kriterleri için iyimser ve kötümser birleştirilmiş tercihler

İyimser Birleştirilmiş Tercihler			
Kriter	K_{41}	K_{42}	K_{43}
K_{41}	-	3,000	3,000
K_{42}	4,000	-	3,000
K_{43}	4,500	3,000	-

Kötümser Birleştirilmiş Tercihler			
Kriter	K_{41}	K_{42}	K_{43}
K_{41}	-	2,000	1,500
K_{42}	3,000	-	3,000
K_{43}	3,000	3,000	-

Adım 7: Birleştirilmiş tercihler için aralık vektörlerinin oluşturulması

Kötümser ve iyimser birleştirilmiş tercih matrislerinde satırların aritmetik ortalamaları hesaplanmış ve bu ortalamalar alt ve üst sınırlara karşılık gelecek şekilde aralık vektörleri oluşturulmuştur. K1 ana kriteri için aralık vektörünün hesaplaması örnek olarak Eş. (6.3) ve Eş. (6.4) ile sunulmuş, ana kriter ve alt kriterlere ait aralık vektörleri Çizelge 6.17, Çizelge 6.18, Çizelge 6.19, Çizelge 6.20 ve Çizelge 6.21'de Adım 8'de yapılan işlemlerle birlikte verilmiştir.

$$Alt\ Değer_{K1} = \frac{1{,}00 + 3{,}50 + 3{,}00}{3} = 2{,}50 \tag{6.3}$$

$$Üst\ Değer_{K1} = \frac{3{,}00 + 6{,}00 + 4{,}50}{3} = 4{,}50 \tag{6.4}$$

Adım 8: Öncelik değerlerinin aralık değerlerinin normalizasyonu ile elde edilmesi

Bu adımda, aralık vektörlerinin alt ve üst sınırlarının aritmetik ortalaması hesaplanarak orta noktalar belirlenmiş ve orta nokta değerlerinin oluşturduğu vektör, vektör elemanlarının toplamına göre normalize edilerek ve öncelik değerleri hesaplanmıştır. K1 kriteri için orta noktanın hesaplanması ve kriter ağırlığının hesabı örnek olarak Eş. (6.4) ve Eş. (6.5) ile verilmiş, tüm kriter ve alt kriterlere ilişkin değerler Çizelge 6.17, Çizelge 6.18, Çizelge 6.19, Çizelge 6.20 ve Çizelge 6.21'de verilmiştir.

$$Orta\ Nokta_{K1} = \frac{2{,}50 + 4{,}50}{2} = 3{,}50 \tag{6.4}$$

$$Ağırlık_{K1} = \frac{3{,}500}{3{,}500 + 4{,}583 + 0{,}750 + 3{,}167} = 0{,}292 \tag{6.5}$$

Çizelge 6.17. Ana kriterler için aralık vektörü ve ağırlık değerleri

Kriter	Aralık Vektörü		Orta Nokta	Kriter Ağırlığı
K_1	2.500	4.500	3.500	0.292
K_2	3.667	5.500	4.583	0.382
K_3	0.000	1.500	0.750	0.063
K_4	2.500	3.833	3.167	0.264

Çizelge 6.18. K_1 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri

Kriter	Aralık Vektörü		Orta Nokta	Kriter Ağırlığı
K_{11}	3,500	6,000	4,750	0,792
K_{12}	0,000	2,500	1,250	0,208

Çizelge 6.19. K_2 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri

Kriter	Aralık Vektörü		Orta Nokta	Kriter Ağırlığı
K_{21}	2,333	3,833	3,083	0,257
K_{22}	0,167	2,000	1,083	0,090
K_{23}	3,333	4,333	3,833	0,319
K_{24}	3,333	4,667	4,000	0,333

Çizelge 6.20. K_3 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri

Kriter	Aralık Vektörü		Orta Nokta	Kriter Ağırlığı
K_{31}	0,000	1,750	0,875	0,097
K_{32}	3,250	5,000	4,125	0,458
K_{33}	3,000	5,000	4,000	0,444

Çizelge 6.21. K_4 kriterinin alt kriterleri için aralık vektörü ve ağırlık değerleri

Kriter	Aralık Vektörü		Orta Nokta	Kriter Ağırlığı
K_{41}	1,750	3,000	2,375	0,264
K_{42}	3,000	3,500	3,250	0,361
K_{43}	3,000	3,750	3,375	0,375

Bu tez çalışmasında enerji depolama teknolojilerini seçme faktörlerinin önem derecelerini belirlemek için Tereddütlü Bulanık Dilsel Terimler Kümelerine Dayalı Grup Karar Verme yöntemine başvurulduğundan, yöntemin son adımı olan alternatif değerlendirmesi adımı bu kısımda uygulanmamıştır. Hesaplanan önem dereceleri Tereddütlü Bulanık Dilsel VIKOR uygulamasında, ağırlıklı normalize karar matrisini elde etme aşamasında kullanılmıştır. Enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesi için kullanılacak genel kriter ağırlık değerleri Çizelge 6.22 ile verilmiştir.

Çizelge 6.22. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmede kullanılacak kriter ağırlıkları

Kriter	Alt Kriter	Kriter Ağırlığı	Alt Kriter Ağırlığı	Genel Ağırlık
Ekonomik (K_1)	Yatırım maliyeti (K_{11})	0,292	0,792	0,2309
	İşletme ve bakım maliyeti (K_{12})		0,208	0,0608
Teknik (K_2)	Verimlilik (K_{21})	0,382	0,257	0,0981
	Enerji yoğunluğu (K_{22})		0,090	0,0345
	Depolama kapasitesi (K_{23})		0,319	0,1220
	Yaşam ömrü (K_{24})		0,333	0,1273
Toplumsal (K_3)	Toplumsal kabul edilebilirlik (K_{31})	0,063	0,097	0,0061
	İstihdam yaratma (K_{32})		0,458	0,0286
	Sağlık ve güvenlik (K_{33})		0,444	0,0278
Çevresel (K_4)	CO_2 yoğunluğu (K_{41})	0,264	0,264	0,0696
	Hava ve su kirliliği (K_{42})		0,361	0,0953
	Ekolojik etki (K_{43})		0,375	0,0990

İki uzmanın görüşleri doğrultusunda elde edilen ağırlık değerlerine bakıldığında, ana kriterler açısından en önemli olanın teknik kriterler olduğu görülür. Teknik kriterler, sırasıyla ekonomik ve çevresel kriterler tarafından takip edilmektedir. Toplumsal kriterler ise, oldukça düşük öneme sahip görülmektedir.

Alt kriterlerin genel ağırlıkları açısından bakıldığında ise, enerji depolama teknolojilerinin seçiminde yatırım maliyeti en önemli faktördür. Teknik kriterlerden yaşam ömrü ve depolama kapasitesi, yatırım maliyetinden sonraki en önemli faktör olarak

değerlendirilmiştir. Toplumsal kriterlerden toplumsal kabul edilebilirlik kriteri ise, en düşük öneme sahip kriter olarak göze çarpmaktadır.

6.1.2. Alternatiflerin değerlendirilmesi

Tereddütlü bulanık dilsel VIKOR yöntemi ile ilçe büyüklüğünde bir enerji ağına uygun olan altı enerji depolama teknolojisi değerlendirilmiştir. Değerlendirmede izlenen yol bu kısımda açıklanmıştır.

Adım 1: Karar probleminin hedefinin, kriterlerinin ve alternatiflerinin belirlenmesi
Bu uygulama ile bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanan altı enerji depolama teknolojisi alternatifi, dört ana kritere bağlı 12 alt kriter temelinde değerlendirilerek ilçe büyüklüğünde bir enerji ağı için en uygun enerji depolama teknoloji seçeneği belirlenmiştir.

Adım 2: Dilsel terimlerin tanımlanması ve karar matrisinin oluşturulması
Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmek için uzman grubu bir araya gelmiş ve görüşlerini beyin fırtınası yoluyla tereddütlü bulanık dilsel ifadeler kullanarak ifade etmişlerdir. Uzman görüşleri için ana kriterlere göre değişen ve Çizelge 6.23 ile verilen iki farklı dilsel değişken kümesi kullanılmıştır.

Çizelge 6.23. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmede kullanılan dilsel değişkenler

Kriter \ Değer	-3	-2	-1	0	1	2	3
Ekonomik (K_1)	çok düşük (çd)	düşük (d)	düşük orta (do)	orta (o)	orta yüksek (oy)	yüksek (y)	çok yüksek (çy)
Teknik (K_2)	çok zayıf (çz)	zayıf (z)	zayıf orta (zo)	orta (o)	orta iyi (oi)	iyi (i)	çok iyi (çi)
Toplumsal (K_3)	çok düşük (çd)	düşük (d)	düşük orta (do)	orta (o)	orta iyi (oi)	iyi (i)	çok iyi (çi)
Çevresel (K_4)	çok zayıf (çz)	zayıf (z)	zayıf orta (zo)	orta (o)	orta yüksek (oy)	yüksek (y)	çok yüksek (çy)

Adım 3: Dilsel bulanık değerlendirmelerin tereddütlü bulanık dilsel terimler kümelerine dönüştürülmesi
Adım 2'de uzmanlardan alınan tereddütlü bulanık dilsel ifadeler, içerdikleri en düşük değere ve en yüksek değere sahip iki dilsel terimden oluşan kümeler şeklinde yazılarak tereddütlü bulanık dilsel değerlendirme matrisi oluşturulur. Uzman grubunun görüşlerinin gösterildiği karar matrisi Çizelge 6.24 ile verilmiştir:

Çizelge 6.24. Enerji depolama teknolojilerini değerlendirme matrisi

	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
A_1	{o, çy}	{çd, y}	{çz, i}	{oz, oi}	{çz, çi}	{çz, oi}
A_2	{d, oy}	{çd, o}	{çz, çi}	{çz, o}	{çz, oz}	{çz, i}
A_3	{od, oy}	{çd, oy}	{z, i}	{z, çi}	{çz, oz}	{z, çi}
A_4	{d, o}	{çd, o}	{oz, oi}	{z, i}	{oz, oi}	{ z, oi}
A_5	{d, o}	{çd, oy}	{çz, i}	{z, oi}	{z, o}	{oz, çi}
A_6	{çd, o}	{od, o}	{oz, i}	{çz, o}	{oz}	{çz, o}
	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}	K_{43}
A_1	{od, oi}	{d, oi}	{od, o}	{oz, çy}	{o, y}	{çz, o}
A_2	{od, i}	{çd, çi}	{çd, oi}	{z, oy}	{çz, o}	{çz, çy}
A_3	{d, oi}	{çd, çi}	{d, çi}	{z, çy}	{z, çy}	{o, çy}
A_4	{d, oi}	{çd, oi}	{d, çi}	{z, o}	{z, çy}	{z, oy}
A_5	{çd, oi}	{çd, oi}	{çd, o}	{z, o}	{z, oy}	{z, o}
A_6	{d, i}	{od, çi}	{od, o}	{çz, oy}	{çz, o}	{z, oy}

Adım 4: İdeal çözümlerin belirlenmesi

İdeal çözümleri belirlemek için tereddütlü bulanık dilsel değerlendirme matrisinin her bir sütununda elemanlar arasında Eş. (5.1) ve Eş. (5.2) ile hesaplanan skor ve varyans değerleri kullanılarak en iyi ve en kötü çözümler belirlenmiştir. A_1 alternatifi için K_{11} kriteri temelindeki değerlendirmeye ait skor ve varyans hesapları aşağıda örnek olarak verilmiş, değerlendirme matrisi elemanlarının tümüne ait değerler Çizelge 6.25 ile sunulmuştur.

$$\rho(H_s) = \frac{1}{\#H_s} \sum_{s_{\delta_l} \epsilon H_s} s_{\delta_l} = s_{\frac{1}{\#H_s}\sum_{l=1}^{\#H_s} \delta_l} = s_{\frac{1}{4}(0+1+2+3)} = s_{1,50} \tag{6.6}$$

$$\sigma(H_s) = \frac{1}{\#H_s} \sqrt{\sum_{s_{\delta_l}, s_{\delta_k} \epsilon H_s} \left(s_{\delta_l} - s_{\delta_k}\right)^2} = s_{\frac{1}{4}\sqrt{(0-1)^2+(0-2)^2+(0-3)^2+(1-2)^2+(1-3)^2+(2-3)^2}} = s_{1,118} \tag{6.7}$$

Çizelge 6.25. Alternatiflere ait skor ve varyans değerleri

		K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
A_1	Skor	1,500	-0,500	-0,500	0,000	0,000	-1,000
	Varyans	1,118	1,708	1,708	0,816	2,000	1,414
A_2	Skor	-0,500	-1,500	0,000	-1,500	-2,000	-0,500
	Varyans	1,118	1,118	2,000	1,118	0,816	1,708
A_3	Skor	0,000	-1,000	0,000	0,500	-2,000	0,500
	Varyans	0,816	1,414	1,414	1,708	0,816	1,708
A_4	Skor	-1,000	-1,500	0,000	0,000	0,000	-0,500
	Varyans	0,816	1,118	0,816	1,414	0,816	1,118
A_5	Skor	-1,000	-1,000	-0,500	-0,500	-1,000	1,000
	Varyans	0,816	1,414	1,708	1,118	0,816	1,414
A_6	Skor	-1,500	-0,500	0,500	-1,500	-1,000	-1,500
	Varyans	1,118	0,500	1,118	1,118	0,000	1,118

Çizelge 6.25. Alternatiflere ait skor ve varyans değerleri (devamı)

		K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}	K_{43}
A_1	Skor	0,000	-0,500	-0,500	1,000	1,500	-1,500
	Varyans	0,816	1,118	0,500	1,414	0,500	1,118
A_2	Skor	0,500	0,000	-1,000	-0,500	-1,500	0,000
	Varyans	1,118	2,000	1,414	1,118	1,118	2,000
A_3	Skor	-0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	1,000
	Varyans	1,118	2,000	1,708	1,708	1,708	1,118
A_4	Skor	-0,500	-1,000	0,500	-1,000	0,500	0,500
	Varyans	1,118	1,414	1,708	0,816	1,708	0,500
A_5	Skor	-1,000	-1,000	-1,500	-1,000	-0,500	-1,000
	Varyans	1,414	1,414	1,118	0,816	1,118	0,816
A_6	Skor	0,000	1,000	-0,500	-1,000	-1,500	-1,000
	Varyans	1,414	1,414	0,500	1,414	1,118	0,816

Skor ve varyans değerlerine göre her bir sütundaki en iyi ve en kötü alternatif ideal ve anti-ideal çözüm olarak belirlenir. İdeal ve anti-ideal çözümler Çizelge 6.26 ile verilmiştir.

Çizelge 6.26. İdeal ve anti-ideal çözümler

	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
İdeal çözüm	{o, çy}	{od, o}	{oz, i}	{z, çi}	{oz, oi}	{oz, çi}
Anti-ideal çözüm	{çd, o}	{çd, o}	{çz, i}	{çz, o}	{çz, oz}	{çz, o}
	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}	K_{43}
İdeal çözüm	{od, i}	{od, çi}	{d, çi}	{oz, çy}	{o, y}	{o, çy}
Anti-ideal çözüm	{çd, oi}	{çd, oi}	{çd, o}	{çz, oy}	{çz, o}	{çz, o}

Adım 5: Grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütlerinin her bir alternatif için tespit edilmesi

Bu adımda, grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütlerinin hesaplanabilmesi için, öncelikle her bir alternatifin ideal çözüme uzaklığı Eş. (5.5) kullanılarak bulunmuştur. A2 alternatifinin K_{11} kriteri temelinde değerinin ideal çözüme uzaklığının hesabı örnek olarak aşağıda Eş. (6.8) ile verilmiş, her bir alternatif için kriterler bazında yapılan ideal çözüme uzaklık değeri hesaplamaları Çizelge 6.27 sunulmuştur. Çizelge 6.27'de d(+,-) ile ifade edilen değerler ideal çözüm ile anti-ideal çözüm arasındaki uzaklığı göstermektedir.

$$d_{ed}\left(A_2^{K_{11}}, PIS^{K_{11}}\right) = \left(\frac{1}{4}\left(\frac{|-2-0|}{7}\right)^2 + \left(\frac{|-1-1|}{7}\right)^2 + \left(\frac{|0-2|}{7}\right)^2 + \left(\frac{|1-3|}{7}\right)^2\right)^{1/2}$$
$$= \left(\frac{1}{4}\left(\left(\frac{2}{7}\right)^2 + \left(\frac{2}{7}\right)^2 + \left(\frac{2}{7}\right)^2 + \left(\frac{2}{7}\right)^2\right)\right)^{1/2} = \left(\frac{4}{49}\right)^{1/2} = \frac{2}{7} = 0{,}2857 \quad (6.8)$$

Çizelge 6.27. İdeal çözüme uzaklık değerleri

	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
Ağırlık	0,2309	0,0608	0,0981	0,0345	0,1220	0,1273
A_1	0,0000	0,2857	0,4432	0,1934	0,2291	0,2857
A_2	0,2857	0,1821	0,1928	0,3113	0,2857	0,2259
A_3	0,2259	0,1779	0,0958	0,0000	0,2857	0,1010
A_4	0,3642	0,1821	0,1010	0,1010	0,0000	0,2236
A_5	0,3642	0,1779	0,4432	0,1890	0,1429	0,0000
A_6	0,4286	0,0000	0,0000	0,3113	0,1844	0,3628
d(+,-)	0,4286	0,1821	0,4432	0,3113	0,2857	0,3628

	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}	K_{43}
Ağırlık	0,0052	0,0208	0,0365	0,0746	0,0861	0,1033
A_1	0,1010	0,2236	0,2542	0,0000	0,0000	0,4286
A_2	0,0000	0,1947	0,2259	0,2236	0,4432	0,2793
A_3	0,1429	0,1947	0,0000	0,1010	0,2542	0,0000
A_4	0,1429	0,2857	0,0000	0,3130	0,2542	0,1821
A_5	0,2236	0,2857	0,3113	0,3130	0,3072	0,3642
A_6	0,0958	0,0000	0,2542	0,2857	0,4432	0,3642
d(+,-)	0,2236	0,2857	0,3113	0,2857	0,4432	0,4286

Hesaplanan uzaklık değerleri kullanılarak Eş. (5.3) ve Eş. (5.4) yardımıyla alternatiflere ait grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütleri hesaplanır. A1 alternatifi için her iki ölçütün hesaplaması aşağıda Eş. (6.9) ve Eş. (6.10) ile örnek olarak verilmiş, tüm alternatiflere ilişkin değerler Çizelge 6.28 ile sunulmuştur.

$$\begin{aligned} HFLGU_{A_1} = {} & 0{,}2309 \times \frac{0{,}0000}{0{,}4286} + 0{,}0608 \times \frac{0{,}2857}{0{,}1821} + 0{,}0981 \times \frac{0{,}4432}{0{,}4432} \\ & + 0{,}0345 \times \frac{0{,}1934}{0{,}3113} + 0{,}1220 \times \frac{0{,}2291}{0{,}2857} + 0{,}1273 \times \frac{0{,}2857}{0{,}3628} \\ & + 0{,}0052 \times \frac{0{,}1010}{0{,}2236} + 0{,}0208 \times \frac{0{,}2236}{0{,}2857} + 0{,}0365 \times \frac{0{,}2542}{0{,}3113} \\ & + 0{,}0746 \times \frac{0{,}0000}{0{,}2857} + 0{,}0861 \times \frac{0{,}0000}{0{,}4432} + 0{,}1033 \times \frac{0{,}4286}{0{,}4286} = 0{,}4997 \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$HFLIR_{A_1} = \text{enb}\left\{ \begin{matrix} 0{,}2309 \times \frac{0{,}0000}{0{,}4286}; 0{,}0608 \times \frac{0{,}2857}{0{,}1821}; 0{,}0981 \times \frac{0{,}4432}{0{,}4432}; \\ 0{,}0345 \times \frac{0{,}1934}{0{,}3113}; 0{,}1220 \times \frac{0{,}2291}{0{,}2857}; 0{,}1273 \times \frac{0{,}2857}{0{,}3628}; \\ 0{,}0052 \times \frac{0{,}1010}{0{,}2236}; 0{,}0208 \times \frac{0{,}2236}{0{,}2857}; 0{,}0365 \times \frac{0{,}2542}{0{,}3113}; \\ 0{,}0746 \times \frac{0{,}0000}{0{,}2857}; 0{,}0861 \times \frac{0{,}0000}{0{,}4432}; 0{,}1033 \times \frac{0{,}4286}{0{,}4286} \end{matrix} \right\} = 0{,}0981 \tag{6.10}$$

Çizelge 6.28. Fayda değerleri

	Grup Faydası	Bireysel Pişmanlık
A_1	0,4997	0,0981
A_2	0,7514	0,1539
A_3	0,5410	0,1220
A_4	0,4616	0,1962
A_5	0,7516	0,1962
A_6	0,6529	0,2309

Grup faydası ölçütü açısından en düşük değere sahip alternatif A_4 iken, bireysel pişmanlık ölçütü açısından en düşük değeri olan alternatif A_1'dir. Dolayısıyla, enerji depolama teknolojileri açısından bu iki ölçütten birisi ile karar vermek mümkün değildir. Bu nedenle, uzlaşı ölçütünün hesaplanması nihai kararı vermeye yardımcı olacaktır.

Adım 6: Uzlaşı ölçütünün hesaplanması

Bir önceki adımda hesaplanan grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütleri, Eş. (5.7)'de uygun yerlere yazılarak uzlaşı ölçütü hesaplanır. A_1 alternatifi için yapılan hesaplama Eş. (6.11) ile aşağıda örnek olarak gösterilmiş, tüm alternatiflere ilişkin değerler Çizelge 6.29 ile verilmiştir.

$$HFLC_{A_1} = 0{,}5 \times \frac{0{,}4997 - 0{,}4616}{0{,}7516 - 0{,}4616} + 0{,}5 \times \frac{0{,}0981 - 0{,}0981}{0{,}2309 - 0{,}0981} = 0{,}0656 \qquad (6.11)$$

Çizelge 6.29. Değerlendirme ölçüt değerleri

	Grup Faydası	Sıralama	Bireysel Pişmanlık	Sıralama	Uzlaşı Ölçütü	Sıralama
A_1	0,4997	2	0,0981	1	0,0656	1
A_2	0,7514	5	0,1539	3	0,7097	4
A_3	0,5410	3	0,1220	2	0,2267	2
A_4	0,4616	1	0,1962	4	0,3694	3
A_5	0,7516	6	0,1962	4	0,8694	6
A_6	0,6529	4	0,2309	6	0,8298	5

Elde edilen ölçüt değerlerine göre, grup faydası ölçütü açısından A_4 alternatifi, bireysel pişmanlık ve uzlaşı ölçütleri açısından ise A_1 alternatifi en uygun alternatif olarak görülmektedir.

Adım 7: Uzlaşık çözümün elde edilmesi

Üç ölçüt için de en iyi alternatif aynı çıkmadığından, uzlaşık çözümü bulmak için aşağıdaki koşullar incelenmiştir:

- Koşul 1: Kabul edilebilir avantaj

  En düşük $HFLC_i$ değerine sahip A_1 ile en düşük ikinci $HFLC_i$ değerine sahip A_3 arasındaki $HFLC_i$ değeri farkı 0,2267 – 0,0656 =0,1611'dir. Kararı etkileyen kriter sayısı 12 olduğundan, DQ = 1/12=0,0833'tür. 0,1611 > 0,0833 olduğundan, kabul edilebilir avantaj koşulu sağlanmıştır.
- Koşul 2: Karar vermede kabul edilebilir istikrar

  En düşük $HFLC_i$ değerine sahip A_1 alternatifi aynı zamanda bireysel pişmanlık ölçütü açısından da en iyi alternatif olduğundan, bu koşul da sağlanmıştır.

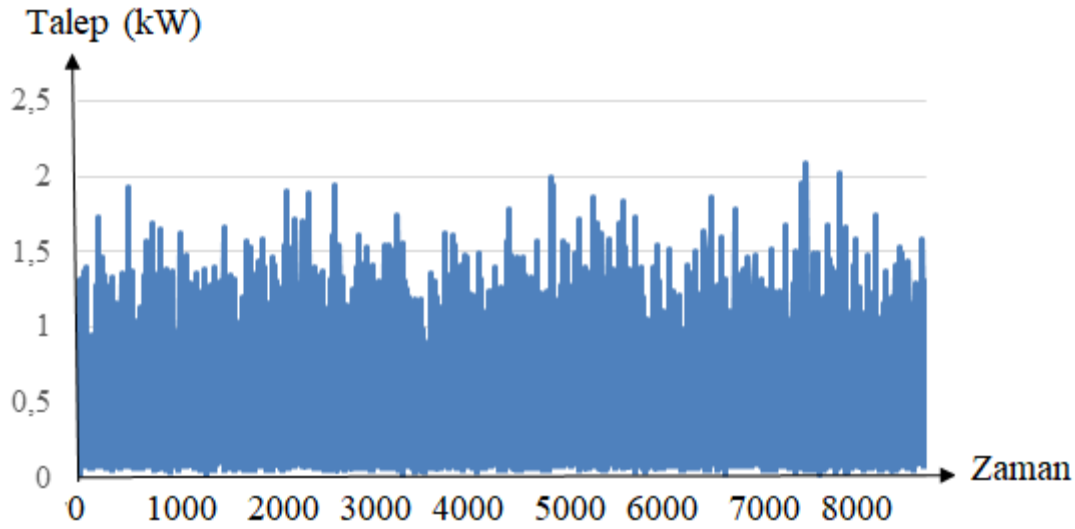
Dolayısıyla, ilçe büyüklüğünde bir enerji ağına destek olması için kullanılabilecek en uygun enerji depolama teknolojisi A_1 ile gösterilen volandır.

6.2. Üretim, İletim ve Depolama Kararlarının Belirlenmesi

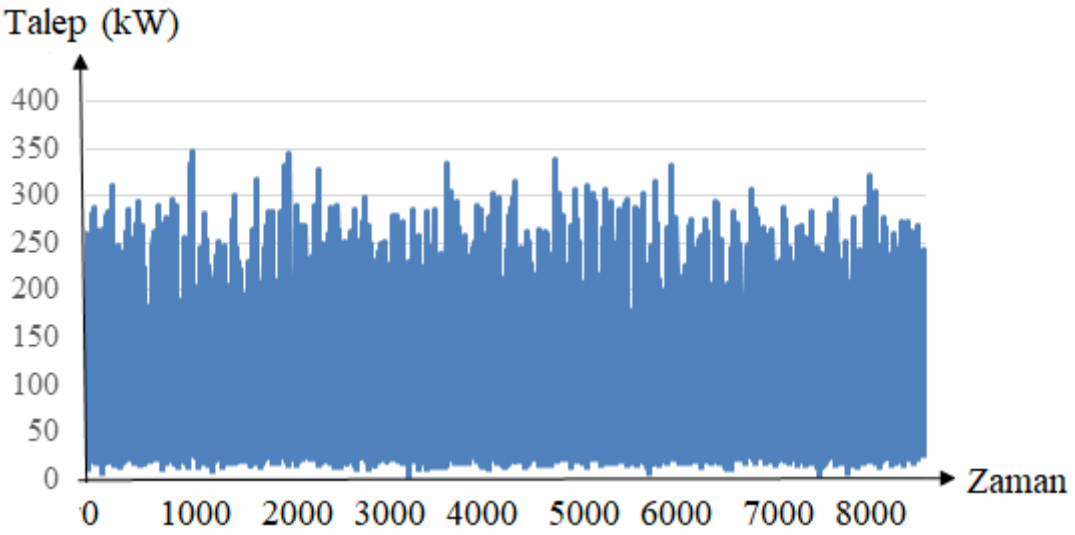
Model sonuçlarını incelemek için yerleşim, ticaret, kamu binaları ve endüstri bölgesi içeren bir ilçe kurgulanmıştır. Belirtilen dört farklı talep grubu için 10 yerleşim bölgesi, 10 kamu binası, 3 ticari bölge ve 2 endüstriyel tesis olacak şekilde toplam 25 talep noktası tanımlanmıştır. İlçede güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimini sağlayan kurulu ve çalışır durumda tesisler var olduğu kabul edilecektir. Bu tesislerin 5 tanesi her biri 4,5 MW gücünde Nordex N147 modeli rüzgâr türbini içeren rüzgâr santrali ve 5 tanesi her biri 10 MW gücünde güneş enerjisi santralinden oluşmaktadır. Ayrıca, yenilenebilir kaynakların kapasitesinin talepten fazla olduğu dönemlerde fazla enerjiyi depolayıp ihtiyaç anında talep noktalarına iletmek üzere 5 enerji depolama tesisinin var olduğu kabul edilmiştir. İfade edilen arz ve talep mekanizmaları için sisteme önerilecek çalışma stratejileri karma tamsayılı programlama modeli ile tespit edilmiştir.

Sayısal çalışmalar için talep verilerinin oluşturulmasında HOMER yazılımından [76] elde edilen ve Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 ile gösterilen saatlik talep değerleri kullanılmıştır. Bu verilerdeki değerler yıllık toplamlar üzerinden normalize edilmiş ve Ok

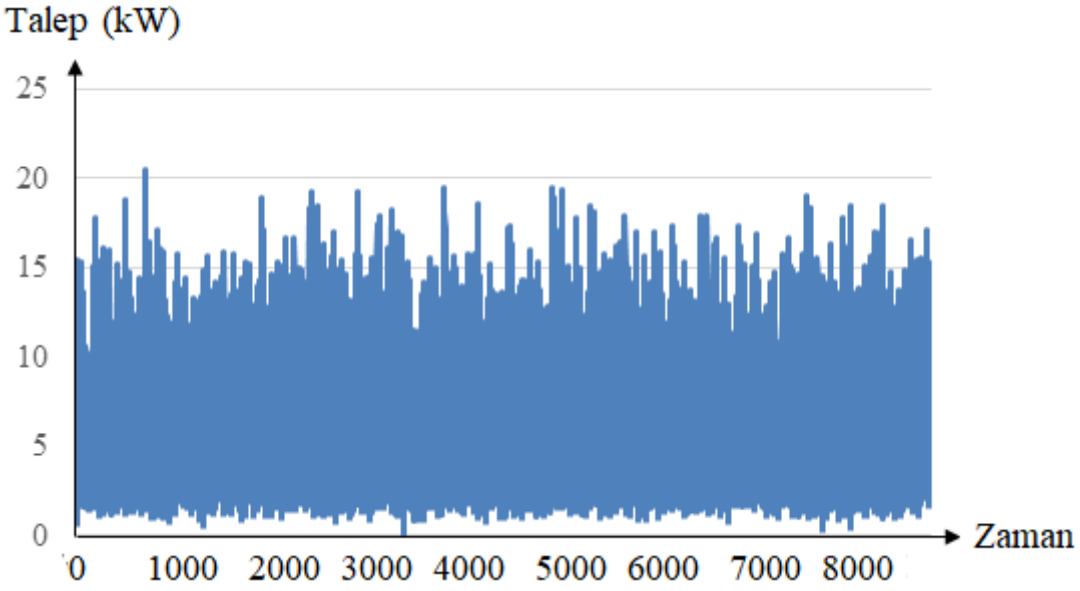
ve Atak [77] tarafından kullanılan yıllık elektrik talep değerlerine yakın değerler ile çarpılarak saatlik talep değerlerini gösteren yeni bir veri seti elde edilmiştir.



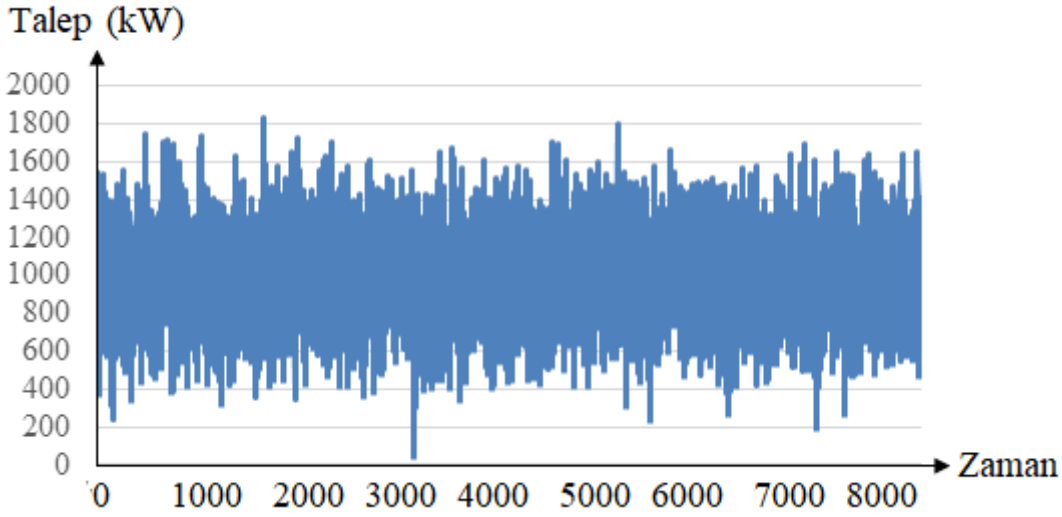
Şekil 6.3. Konut talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri



Şekil 6.4. Ticari bina talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri

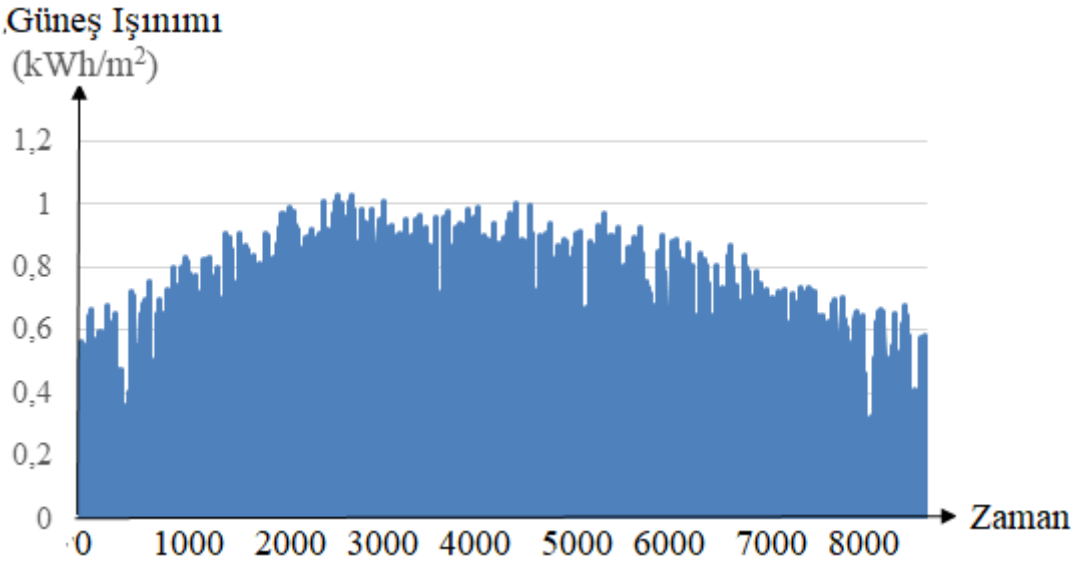


Şekil 6.5. Toplumsal bina talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri

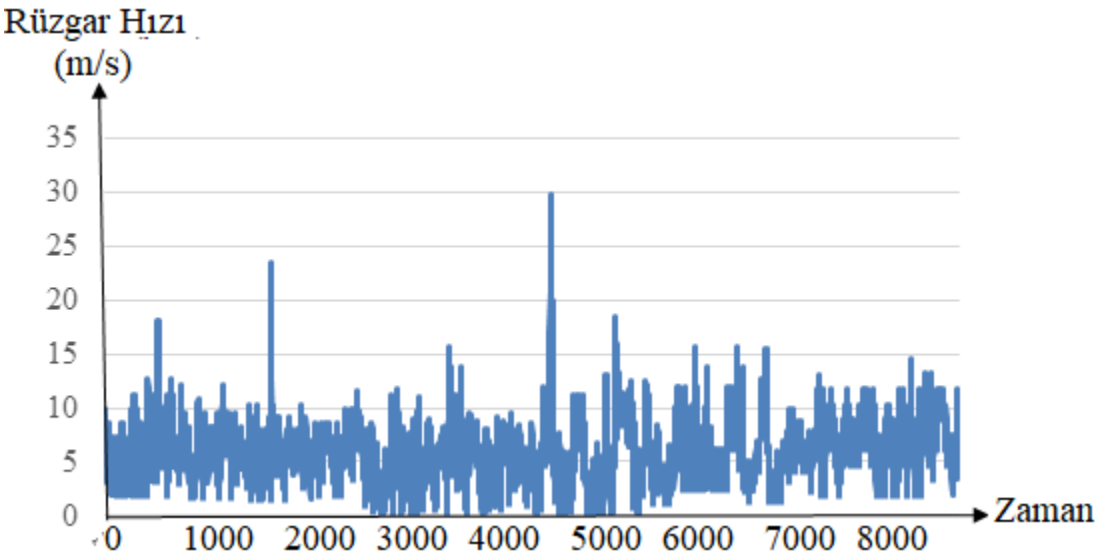


Şekil 6.6. Endüstri talep noktası grubu için saatlik elektrik enerjisi talep değerleri

Benzer şekilde, yenilenebilir enerji tesislerinin üretim kapasitesi değerleri de HOMER yazılımından elde edilen, Şekil 6.7'de sunulan güneş panelinin m^2 cinsinden alanı başına elde edilen kWh cinsinden elektrik enerjisi miktarının Eş. (6.12)'de kullanılması ve Şekil 6.8'de m/s cinsinden verilen rüzgâr hızı değerlerinin Eş. (6.13)'de kullanılması yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 6.7. Bölgenin saat bazında güneş enerjisi potansiyeli



Şekil 6.8. Bölgede gerçekleşen rüzgâr hızı

$$cap_{güneş} = A \times R \times H \times PR \tag{6.12}$$

$$cap_{rüzgar} = \frac{1}{2}\rho \times \pi \times r^2 \times v^3 \times cp \tag{6.13}$$

Eş. (6.12)'de yer alan terimlerden *A* güneş panelinin m^2 cinsinden alanını, *R* güneş panelinin verimini, *H* güneş paneline düşen güneş ışığı miktarını (kWh/m^2), *PR* ise güneş panelinin performans oranını göstermektedir. Genel olarak Türkiye için *R* değerinin 0,2 ve *PR*

değerinin 0,8 olduğu kabul edilmektedir. Saatlik güneş ışığı verisi kullanıldığı için kapasite değerinin birimi kW olarak hesaplanmaktadır.

Eş. (6.13) ile verilen ρ terimi, değeri 1,225 kg/m^3 olan hava yoğunluğunu, π x r^2 rüzgâr türbininin m^2 cinsinden süpürdüğü alanı, v m/s cinsinden rüzgâr hızını ve cp rüzgâr türbininin etkinliğini göstermektedir. cp değeri Türkiye için 0,3 olarak kabul edilmektedir.

Maliyet, gaz salınımı değerleri ve depolama tesislerine ilişkin veriler kaynak araştırması sonucunda Çizelge 6.30'da verildiği şekilde tespit edilmiştir.

Çizelge 6.30. Parametre değerleri

Parametre	Değer	Kaynak
D_{jt}	Saatlik bazda türetilen değerler	[76, 76]
cap_{it}	Saatlik bazda türetilen değerler	[76]
e	0,0004836 ton/kWh	[44]
c_i	Rüzgâr için 4c$/kWh, Güneş için 7c$/kWh	[78]
pc	9 c$/kWh	[79]
AP_i	1 MW rüzgâr santrali için 28776,6 $/yıl; 1 MW güneş santrali için 33204,78 $/yıl	[78]
δ_k	0,87	[80]
$smin_k$	0	Varsayım
$smax_k$	1000 kW	Varsayım
T	672	[37, 43]

Modelin çözümüne geçmeden önce, model doğrulanması için iki üretim tesisi, dört talep noktası ve iki depolama tesisi içeren üç dönemlik örnek bir problem oluşturularak karar değişkenlerinin aldığı değerlerin ve çözüm sonuçlarının incelemesi yapılmıştır. Bu örnek problemin çözümü ile modelin karar değişkenlerinin aldığı değerlerin birbirleriyle tutarlı oldukları gözlenmiş ve modelde mantık hatası olmadığı teyit edilmiştir. Model verileri ve elde edilen çözüme ait sonuçlar, EK-2'de sunulmuştur.

Enerji sistemlerinde saatlik bazda üretim, iletim ve depolama kararlarını belirlemeye odaklanan bazı çalışmalarda [37, 43], dönem sayısının artışı ile problemin çözümüne ulaşmanın zorlaştığı ve bu nedenle planlama döneminde arz ve talepteki değişimleri yansıtan daha kısa uzunlukta dönem sayısı içeren veri ile problemin çözümüne ulaşılabileceği ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında da çözümlerin elde edilmesi için bu yol izlenerek yılın dört mevsiminde haftanın farklı günlerinde saatlik değişimleri gösteren 672 saatlik bir veri

seti kullanılmıştır. Ağralı [43] tarafından dört mevsimi yansıttığı iddia edilen dönemler olan kış mevsimi için 21 Aralık, ilkbahar mevsimi için 21 Mart, yaz mevsimi için 21 Haziran ve sonbahar mevsimi için 23 Eylül tarihleri ile başlayan haftalar dikkate alınmıştır. Optimum çözüm sonuçlarını elde etmek için, önerilen karma tamsayılı programlama modeli GAMS paket programında kodlanmış ve CPLEX çözücüsü yardımıyla Intel ® Core™ i7-7500U 2,70 GHz işlemciye ve 8 GB belleğe sahip kişisel bilgisayarda çözdürülmüştür.

Çözüm işlemi yapılırken öncelikle, üç amaç fonksiyonunun her biri için tek amaçlı olarak çözülerek çözüm sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlarda amaç fonksiyonlarının değerleri, referans noktaları ve nadir noktaları belirlemede kullanılmıştır. Elde edilen çözüm sonuçları Çizelge 6.31 ile aşağıda verilmiştir:

Çizelge 6.31. Tek amaçlı modeller için çözüm sonuçları

Optimizasyon Yönü	Amaç Fonksiyonu Değeri		
	Toplam Maliyet ($)	Emisyon (ton)	Yenilenebilir Kullanım Oranı
Toplam Maliyet	2 840 915,418	9280,883	0,452
Emisyon	2 843 222,543	9226,374	0,456
Yenilenebilir Kullanım Oranı	2 847 531,789	9254,995	0,468

Modelin çok amaçlı çözümü için, her bir amaç fonksiyonu için ilgili referans noktaya uzaklıklardan en büyük olanını en küçüklemek amacıyla modelin çözümü elde edilmiştir. Referans nokta toplam maliyet amaç fonksiyonu için en küçük değer olan 2 840 915,418; emisyon amaç fonksiyonu için en küçük değer olan 9 226,374 ve yenilenebilir kullanım oranı amaç fonksiyonu için en büyük değer olan 0,468'dir. Benzer şekilde, nadir noktalar toplam maliyet amaç fonksiyonu için en büyük değer olan 2 847 531,789; emisyon amaç fonksiyonu için en büyük değer olan 9280,883 ve yenilenebilir kullanım oranı amaç fonksiyonu için en küçük değer olan 0,452 olarak tespit edilmiştir.

Referans nokta yöntemi ile bulunacak çözümlerde amaç fonksiyonu değerlerini [0, 1] aralığında ölçeklendirmek için her bir amaç için ideal çözüme uzaklıklar, ağırlık değerleri $\lambda = 1 \,/\, |referans\ nokta - nadir\ nokta|$ olacak şekilde ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklı

uzaklık değerlerinin en büyük olanını en küçüklemek üzere yapılan çözümden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.32 ile aşağıda verilmiştir:

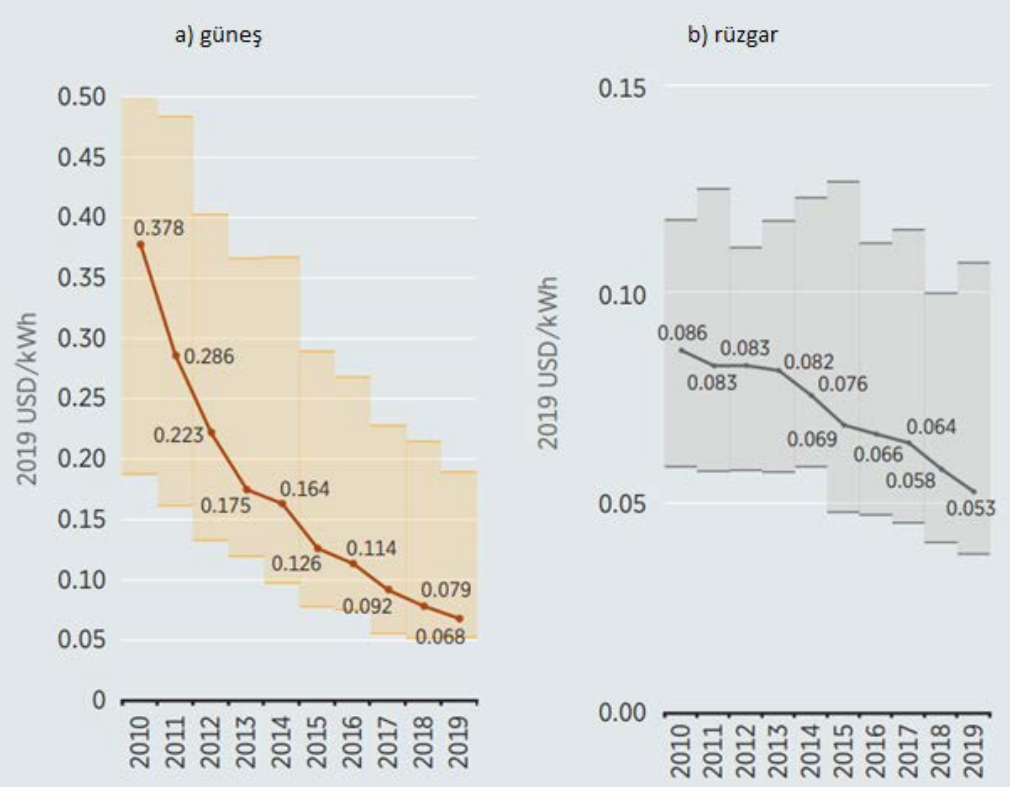
Çizelge 6.32. Referans noktaya uzaklık yöntemi için çözüm sonuçları

Amaç Fonksiyonu	Çözüm Değeri	Ağırlık	Ağırlıklı Uzaklık
Toplam Maliyet ($)	2 841 784,010	0,00015	0,131
Emisyon (ton)	9232,084	0,01835	0,105
Yenilenebilir Kullanım Oranı (%)	0,466	0,09393	0,131

Çözüm sonucunda referans noktaya en büyük ağırlıklı uzaklığın değeri 0,131 olarak çözüm elde edilmiştir. Bu çözüme göre enerji sisteminin toplam maliyeti 2 841 784,010 $, şebekeden alınan enerjinin sebep olduğu zararlı gaz salınımı 9232,084 kg ve yenilenebilir enerji kullanım oranı 0,466 olarak hesaplanmıştır. Bu değerleri sağlayan üretim, iletim ve depolama değerleri saatlik bazda elde edilmiştir.

6.3. Senaryo Analizi

Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi konusunda sürekli olarak yeni teknolojik gelişmeler görülmektedir. Bu gelişmeler enerji üretim maliyetlerinin azalmasını sağlamakta ve teknolojik olgunlaşma sayesinde yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi uygulamalarının gerçekleştirilmesi konusunda cesaret vermektedir. Şekil 6.9'da verilen IRENA raporundan [81] alınmış verilerden de görülebileceği gibi, güneş ve rüzgâr enerjisinden elde edilen elektriğin birim maliyeti son on yılda önemli ölçüde azalmıştır. Maliyet eğrilerinin grafiğinden maliyetlerdeki azalma eğiliminin gelecek yıllarda da süreceği öngörülebilir.



Şekil 6.9. Yenilenebilir enerji birim üretim maliyetlerindeki değişim [81]

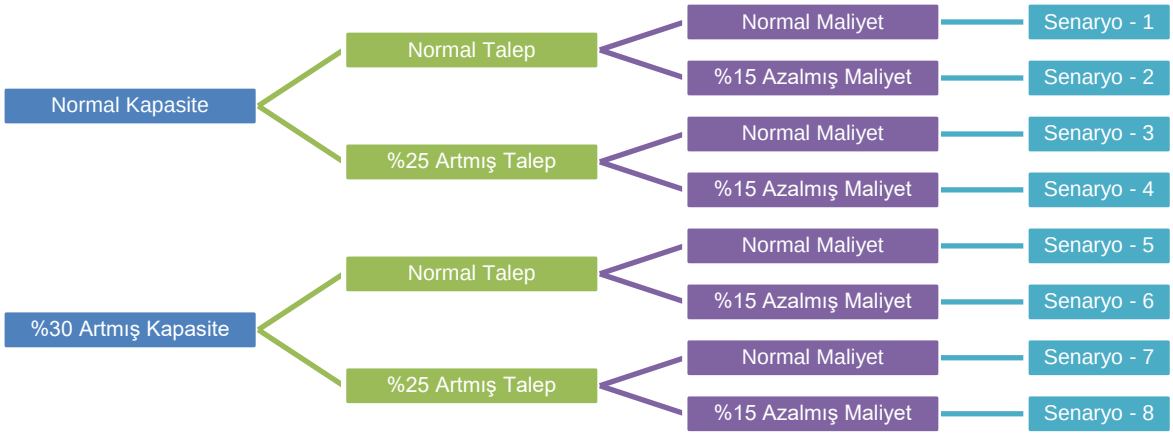
Elektrik üretimi konusunda yeni ürün ve yöntemlerin geliştirilmesi, geliştirilen teknolojilerin olgunlaşması ve maliyetlerin azalması sayesinde, her geçen yıl üretim kapasitesine eklemeler yapılmaktadır. Türkiye'de de enerji üretim kapasitesi yıllar bazında sürekli artmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre [82], Türkiye'de 2014 yılında 69519,8 MW seviyesinde olan kurulu güç, %30'dan fazla artış göstererek 2019 yılında 91267,0 MW seviyesine ulaşmıştır.

Diğer taraftan, daha kalabalık hâle gelen nüfus ve gelişen teknolojik imkânlar nedeniyle dünya üzerinde elektrik enerjisi talebi hızla artmaktadır. Türkiye'de elektrik tüketimi de benzer şekilde her geçen yıl daha da artmaktadır. Çizelge 6.33'de de görüleceği üzere, 2014 yılından 2019 yılında karar elektrik tüketimi yaklaşık %25 artış göstermiş ve 257 273,1 GWh seviyesine ulaşmıştır.

Çizelge 6.33. Türkiye'de kurulu güç ve net elektrik tüketimi değerleri [82]

Yıl	Kurulu güç (MW)	Net elektrik tüketimi (GWh)
2014	69519,8	207 375,1
2015	73146,7	217 312,3
2016	78497,4	231 203,7
2017	85200,0	249 022,6
2018	88550,8	258 232,2
2019	91267,0	257 273,1

Yukarıda bahsedilen bilgiler ışığında, problemde kullanılan talep, kapasite ve maliyet değerlerindeki değişim açısından senaryo analizleri yapılarak bu parametrelerdeki değişimin çözüm sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Problemin 6.2 başlığında verilen çözümünde kullanılan verilerin temel senaryo olduğu kabul edilerek talebin %25 artması, kapasitenin %30 artması ve maliyetlerin %15 azalması durumlarını içeren kombinasyonlar için sekiz farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryolarda ele alınan durumlar Şekil 6.10 ile verilmiştir.



Şekil 6.10. İncelenen senaryolar

Kapasite artışını sağlamak için enerji ağı içinde yer alan güneş enerjisi santrallerinin her birinin güçlerinin 13 MW olduğu durum ele alınmış, rüzgâr santralleri için ise 4,5 MW gücündeki Nordex N147 modeli rüzgâr türbinleri yerine, 8 MW gücündeki Vestas V164 modeli rüzgâr türbinlerinin kurulu olduğu varsayımı dikkate alınmıştır. Talep artışını ifade etmek için ise, saatlik talep değerleri 1,25 ile çarpılmıştır. Maliyet azalışı için, şebekeden

alınan enerjinin birim maliyeti değişmezken yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ve yenilenebilir enerji tesislerinin işletme ve bakım maliyetleri 0,85 ile çarpılmıştır.

Senaryo analizi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.34 ile verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde;

- Senaryolar için elde edilen çözümlerde, ideal çözüme en büyük ağırlıklı uzaklığın 0,069 ile 0,227 arasında değiştiği görülmektedir. Yani, çok amaçlı optimizasyon ile ideal çözümlere yakın iyi çözümler elde edilmiştir.
- Talep artışının dikkate alındığı senaryolarda, sistemin toplam maliyetinin artış gösterdiği, daha fazla zararlı gaz salınımının gerçekleştiği ve yenilenebilir enerji kullanım oranının azaldığı görülmektedir. Yani, artan talebi karşılamada yenilenebilir kaynakların yetersiz kaldığı ve şebeke bağlantısı üzerinden enerji talebinin karşılandığı anlaşılmaktadır. Elektrik enerjisi talebindeki artışın devam edeceği düşünüldüğünde, şebekeden alınan enerjiye, yani yoğunlukla ithal kaynaklardan elde edilen enerjiye ihtiyaç artarak devam edecektir. Enerji verimini artırıcı politikaların uygulanması veya talep tarafının yönetimine yönelik politikaların geliştirilmesi enerjideki dışa bağımlılığı daha da artırmamak adına verimli olacaktır.
- Kapasite artışının söz konusu olduğu senaryolardan elde edilen sonuçlarda ise, toplam maliyetin ve zararlı gaz salınımının azalması ile birlikte yenilenebilir enerji kullanım oranlarının yükseldiği görülmektedir. Artan üretim kapasitesi sayesinde, sistem içinde talep noktalarına iletilen ekonomik ve çevre dostu yenilenebilir enerji miktarı yükselmiştir. Böylece, talep daha düşük maliyetle karşılanırken şebekeden alınan enerjinin sebep olduğu zararlı gaz salınımı da daha düşük düzeyde kalmış ve miktar artışına bağlı olarak yenilenebilir enerji kullanım oranı yükselmiştir.
- Maliyetlerdeki düşüş sonucunda, özellikle tek amaçlı çözümlerden maliyet amacını optimize eden çözümlerin olumlu etkilendiğini görmek mümkündür. Şebekenin ekonomik olarak daha kötü bir tercih hâline gelmesi nedeniyle, yenilenebilir kaynakların tercih edilebilirliği artmıştır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin olgunlaşması ve buna bağlı maliyetlerdeki azalış sayesinde, yakın gelecekte yenilenebilir enerjinin kullanımının daha da yaygınlaşması mümkündür. Yenilenebilir enerjinin daha küçük ölçekli enerji sistemlerinde kullanımını kolaylaştırıcı politikalar ile şebekeden alınan enerji miktarının azaltılması mümkün olabilir.

Çizelge 6.34. Senaryolara göre çözüm sonuçları

		Amaç Fonksiyonu Değeri			Referans ve Nadir Noktalar, Ağırlık Değerleri ve Ağırlıklı Uzaklık			
Senaryo	Optimizasyon Yönü	Maliyet	Emisyon	Yenilenebilir Oranı		Maliyet	Emisyon	Yenilenebilir Oranı
S1	Maliyet	2840915,418	9280,883	0,4520	En Büyük	2847531,789	9280,883	0,468
	Emisyon	2843222,543	9226,374	0,4560	En Küçük	2840915,418	9226,374	0,452
	Yenilenebilir Oranı	2847531,789	9254,995	0,4680	Ağırlık	0,00015	0,01835	0,09393
	İdeal Çözüme Uzaklık	2841784,01	9232,084	0,4660	Ağırlıklı Uzaklık	0,131	0,105	0,131
S2	Maliyet	2677806,155	9226,374	0,4550	En Büyük	2684006,959	9254,995	0,468
	Emisyon	2679561,361	9226,374	0,4560	En Küçük	2677806,155	9226,374	0,455
	Yenilenebilir Oranı	2684006,959	9254,995	0,4680	Ağırlık	0,00016	0,03494	0,1146
	İdeal Çözüme Uzaklık	2678609,759	9230,084	0,4664	Ağırlıklı Uzaklık	0,13	0,13	0,13
S3	Maliyet	3612773,587	13232,839	0,3790	En Büyük	3620005,045	13242,403	0,392
	Emisyon	3613553,746	13206,876	0,3800	En Küçük	3612773,587	13206,876	0,379
	Yenilenebilir Oranı	3620005,045	13242,403	0,3920	Ağırlık	0,00014	0,02815	0,11806
	İdeal Çözüme Uzaklık	3614228,37	13213,977	0,3894	Ağırlıklı Uzaklık	0,201	0,2	0,201
S4	Maliyet	3445084,769	13206,876	0,3800	En Büyük	3452478,371	13243,825	0,392
	Emisyon	3445214,867	13206,876	0,3810	En Küçük	3445084,769	13206,876	0,381
	Yenilenebilir Oranı	3452478,371	13243,825	0,3920	Ağırlık	0,00014	0,02706	0,12908
	İdeal Çözüme Uzaklık	3446766,475	13215,28	0,3893	Ağırlıklı Uzaklık	0,227	0,227	0,227
S5	Maliyet	2825753,922	8691,589	0,4910	En Büyük	2842035,636	8691,589	0,539
	Emisyon	2833709,881	7903,457	0,5280	En Küçük	2825753,922	7903,457	0,491
	Yenilenebilir Oranı	2842035,636	7927,12	0,5390	Ağırlık	0,00006	0,00127	0,03107
	İdeal Çözüme Uzaklık	2829303,142	7944,757	0,5290	Ağırlıklı Uzaklık	0,218	0,052	0,21
S6	Maliyet	2631743,558	7903,457	0,5270	En Büyük	2643176,083	7927,12	0,539
	Emisyon	2635373,609	7903,457	0,5280	En Küçük	2631743,558	7903,457	0,527
	Yenilenebilir Oranı	2643176,083	7927,12	0,5390	Ağırlık	0,000087	0,04226	0,119933
	İdeal Çözüme Uzaklık	2632524,581	7905,099	0,5382	Ağırlıklı Uzaklık	0,068	0,069	0,069
S7	Maliyet	3581984,715	11483,193	0,4540	En Büyük	3590447,296	11483,193	0,467
	Emisyon	3584314,781	11423,738	0,4580	En Küçük	3581984,715	11423,738	0,454
	Yenilenebilir Oranı	3590447,296	11451,962	0,4670	Ağırlık	0,00012	0,01682	0,11515
	İdeal Çözüme Uzaklık	3582899,41	11427,013	0,4653	Ağırlıklı Uzaklık	0,108	0,055	0,108
S8	Maliyet	3370548,795	11423,738	0,4560	En Büyük	3377857,946	11451,962	0,467
	Emisyon	3374388,564	11423,738	0,4570	En Küçük	3370548,795	11423,738	0,456
	Yenilenebilir Oranı	3377857,946	11451,962	0,4670	Ağırlık	0,00014	0,03543	0,13837
	İdeal Çözüme Uzaklık	3371443,368	11427,192	0,4654	Ağırlıklı Uzaklık	0,122	0,122	0,122

Senaryolara bağlı olarak elde edilen çözüm sonuçlarının sınıflandırılması için ELECTRE – TRI yöntemi ile çok kriterli bir analiz gerçekleştirilmiştir. Her bir senaryoda, ideal çözüme uzaklığın en küçüklenmesi için elde edilen çözümdeki amaç fonksiyonu değerleri ile senaryoda tanımlanan enerji ağındaki yenilenebilir enerji tesisi kapasitesini oluşturmak için gereken ilk yatırım maliyetinin yıllık eşdeğeri ve bu kapasite düzeyindeki tesislerin yarattığı istihdam değerleri ile birleştirilmiştir. Diğer bir ifadeyle yenilenebilir enerji sistemini değerlendirmek için ele alınan ekonomik, çevresel ve teknik değerlere bir ekonomik, bir de sosyal faktör eklenmiş ve senaryoların farklı bakış açılarını birleştiren bir değerlendirmesi yapılmıştır.

1 MW gücünde bir güneş enerjisi santralinin ilk yatırım maliyetinin 820 000 $ ile 1 360 000 $ arasında olduğu tahmin edilmektedir [83]. Aynı büyüklükte güce sahip bir rüzgâr enerjisi santrali için ise bu değerin 1 300 000 $ ile 2 200 000 $ arasında olduğu ifade edilmektedir [84]. Bu incelemede, ilk yatırım maliyeti güneş enerjisi santrali için 1 000 000 $/MW ve rüzgâr enerjisi santrali için 1 500 000 $/MW olarak alınmıştır. İstihdam yaratma değerleri ise, Özenç ve Özen [85] tarafından belirtildiği şekilde güneş santrali için 2,46 iş /MW ve rüzgâr santrali için 6,34 iş/MW olarak kabul edilmiştir. Bu bilgiler ışığında, ELECTRE – TRI yöntemi ile yapılacak çok kriterli analiz için oluşan karar matrisi Çizelge 6.35 ile verilmiştir. Sütün başlıklarında verilen AF1 çözümden elde edilen toplam maliyet, AF2 şebekeden alınan sebep olduğu zararlı gaz salınımı, AF3 çözüm sonuçlarına göre oluşan yenilenebilir enerji kullanım oranı, YEİYM yıllık eşdeğer ilk yatırım maliyeti ve İY istihdam yaratma değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.35. Senaryo değerlendirme için karar matrisi

Senaryo	AF1	AF2	AF3	YEİYM	İY
S1	2 841 784,010	9232,084	0,4660	3 803 153,33	265,65
S2	2 678 609,759	9230,084	0,4664	3 803 153,33	265,65
S3	3 614 228,370	13213,977	0,3894	3 803 153,33	265,65
S4	3 446 766,475	13215,280	0,3893	3 803 153,33	265,65
S5	2 829 303,142	7944,757	0,5290	5 676 348,25	413,50
S6	2 632 524,581	7905,099	0,5382	5 676 348,25	413,50
S7	3 582 899,410	11427,013	0,4653	5 676 348,25	413,50
S8	3 371 443,368	11427,192	0,4654	5 676 348,25	413,50

ELECTRE – TRI ile yapılan değerlendirme için açık kaynak bir yazılım olan j-ELECTRE-3.0 [85]'dan yararlanılmıştır. Yazılımda değerlendirmenin yapılabilmesi için alternatif

değerlerinin tüm kriterler için fayda temelli yapıya dönüştürülmesi istenmektedir. Bu nedenle, maliyet temelli kriterler olan AF1, AF2 ve YEİYM kriterleri temelinde senaryolara ilişkin değerler çarpmaya göre tersi alınarak değerlendirmeye alınmıştır. Yapılan değişim sonucu oluşan karar matrisi Çizelge 6.36'da verilmiştir.

Çizelge 6.36. Değerlendirmede kullanılan karar matrisi

Senaryo	AF1 (x 10^{-8})	AF2 (x 10^{-5})	AF3	YEİYM (x 10^{-8})	İY
S1	35,18916	10,83179	0,46600	26,29397	265,65
S2	37,33280	10,83414	0,46640	26,29397	265,65
S3	27,66842	7,56774	0,38940	26,29397	265,65
S4	29,01270	7,56700	0,38930	26,29397	265,65
S5	35,34439	12,58692	0,52900	17,61696	413,50
S6	37,98635	12,65006	0,53820	17,61696	413,50
S7	27,91036	8,75119	0,46530	17,61696	413,50
S8	29,66089	8,75106	0,46540	17,61696	413,50

ELECTRE – TRI yönteminin değerlendirme için ihtiyaç duyduğu diğer veriler olan sınıf profilleri Çizelge 6.37'de, tercih, farksızlık, veto değerleri ile kriterlere ilişkin ağırlık değerleri Çizelge 6.38'de sunulmuştur.

Çizelge 6.37. Sınıf profilleri

Sınıf	AF1	AF2	AF3	YEİYM	İY
Makul	30	9	0,43	20	300
İyi	34	11	0,50	24	400

Çizelge 6.38. Parametre değerleri

Parametre	AF1	AF2	AF3	YEİYM	İY
Farksızlık (*q*)	0,50	0,25	0,005	0,50	10,00
Tercih (*p*)	2,50	1,00	0,025	1,00	50,00
Veto (*v*)	1,00	5,00	0,150	9,00	150,00
Ağırlık (*w*)	0,25	0,25	0,250	0,15	0,10

Verilen karar matrisi, sınıf profilleri ve parametre değerleri ve $\lambda=0,67$ kabul edilerek yapılan değerlendirme sonucunda hesaplanan uyum, uyumsuzluk ve güvenilirlik değerleri Çizelge 6.39, Çizelge 6.40 ve Çizelge 6.41 ile verilmiştir. $\lambda=0,67$ kabul edilmesinin gerekçesi, değerlendirmenin kriterlerin çoğunu kapsamasını sağlama düşüncesidir [86].

Çizelge 6.39. Senaryolar ile sınıf profillerinin uyum değerleri

Senaryo – profil çifti	Uyum değeri	Profil – senaryo çifti	Uyum değeri
S1→İyi	0,6500	İyi→S1	0,7639
S2→İyi	0,6500	İyi→S2	0,6000
S3→İyi	0,1500	İyi→S3	0,8500
S4→İyi	0,1500	İyi→S4	0,8500
S5→İyi	0,8500	İyi→S5	0,3857
S6→İyi	0,8500	İyi→S6	0,2413
S7→İyi	0,1000	İyi→S7	0,9913
S8→İyi	0,1000	İyi→S8	0,9913
S1→Makul	0,9391	Makul→S1	0,1000
S2→Makul	0,9391	Makul→S2	0,1000
S3→Makul	0,2101	Makul→S3	0,8500
S4→Makul	0,3782	Makul→S4	0,8500
S5→Makul	0,8500	Makul→S5	0,1500
S6→Makul	0,8500	Makul→S6	0,1500
S7→Makul	0,6512	Makul→S7	0,6500
S8→Makul	0,8500	Makul→S8	0,6500

Çizelge 6.40. Senaryolar ile sınıf profillerinin uyumsuzluk değerleri

Senaryo – profil çifti	AF1	AF2	AF3	YEİYM	İY
S1→İyi	0,0000	0,0000	0,0720	0,0000	0,8435
S2→İyi	0,0000	0,0000	0,0688	0,0000	0,8435
S3→İyi	0,5109	0,6081	0,6848	0,0000	0,8435
S4→İyi	0,3316	0,6083	0,6856	0,0000	0,8435
S5→İyi	0,0000	0,0000	0,0000	0,6729	0,0000
S6→İyi	0,0000	0,0000	0,0000	0,6729	0,0000
S7→İyi	0,4787	0,3122	0,0776	0,6729	0,0000
S8→İyi	0,2452	0,3122	0,0768	0,6729	0,0000
S1→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
S2→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
S3→Makul	0,0000	0,1081	0,1248	0,0000	0,0000
S4→Makul	0,0000	0,1082	0,1256	0,0000	0,0000
S5→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,1729	0,0000
S6→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,1729	0,0000
S7→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,1729	0,0000
S8→Makul	0,0000	0,0000	0,0000	0,1729	0,0000
İyi→S1	0,0000	0,0000	0,0000	0,1618	0,0000
İyi→S2	0,1111	0,0000	0,0000	0,1618	0,0000
İyi→S3	0,0000	0,0000	0,0000	0,1618	0,0000
İyi→S4	0,0000	0,0000	0,0000	0,1618	0,0000
İyi→S5	0,0000	0,1467	0,0320	0,0000	0,0000
İyi→S6	0,1981	0,1625	0,1056	0,0000	0,0000
İyi→S7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
İyi→S8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Makul→S1	0,3585	0,2079	0,0880	0,6617	0,0000
Makul→S2	0,6444	0,2085	0,0912	0,6617	0,0000
Makul→S3	0,0000	0,0000	0,0000	0,6617	0,0000
Makul→S4	0,0000	0,0000	0,0000	0,6617	0,0000
Makul→S5	0,3792	0,6467	0,5920	0,0000	0,6350
Makul→S6	0,7315	0,6625	0,6656	0,0000	0,6350
Makul→S7	0,0000	0,0000	0,0824	0,0000	0,6350
Makul→S8	0,0000	0,0000	0,0832	0,0000	0,6350

Çizelge 6.41. Senaryolar ile sınıf profillerinin güvenilirlik değerleri

Senaryo – profil çifti	Güvenilirlik değeri	Profil – senaryo çifti	Güvenilirlik değeri
S1→İyi	0,2906	İyi→S1	0,7639
S2→İyi	0,2906	İyi→S2	0,6000
S3→İyi	0,0027	İyi→S3	0,8500
S4→İyi	0,0037	İyi→S4	0,8500
S5→İyi	0,8500	İyi→S5	0,3857
S6→İyi	0,8500	İyi→S6	0,2413
S7→İyi	0,0161	İyi→S7	0,9913
S8→İyi	0,0233	İyi→S8	0,9913
S1→Makul	0,9391	Makul→S1	0,0236
S2→Makul	0,9391	Makul→S2	0,0131
S3→Makul	0,2101	Makul→S3	0,8500
S4→Makul	0,3782	Makul→S4	0,8500
S5→Makul	0,8500	Makul→S5	0,0094
S6→Makul	0,8500	Makul→S6	0,0032
S7→Makul	0,6512	Makul→S7	0,6500
S8→Makul	0,8500	Makul→S8	0,6500

Güvenilirlik değerleri $\lambda=0,67$ olarak belirlenen eşik değeri dikkate alındığında, iyi sınıf profilinin üstünde kalmayı başaran S5 ve S6 senaryolarının iyi çözümler olduğu, iyi sınıf profilinin üstünde olmayıp orta sınıf profilini geçebilen S1, S2 ve S8 çözümlerinin makul derecede olduğu ve orta sınıf profiline üstün gelemeyen diğer senaryolar olan S3, S4 ve S7 senaryolarının kötü çözümler olduğu yorumlanır.

Diğer bir ifade ile kapasite arttığında talep temel senaryoda belirtilen düzeyde kaldığında maliyet artışına bakılmaksızın iyi bir durum gerçekleşmiş kabul edilmelidir. Enerji sistemi içinde üretilen enerji miktarının artırımının sağlanmasına yönelik teşvik edici uygulamaların geliştirilmesi ve yürütülmesinin bu noktada faydalı olacağı açıktır. Talep artışı söz konusu olduğunda, ancak kapasite artırılır ve maliyetler azalırsa mevcut duruma benzer makul bir durum olacağı anlaşılmaktadır. Talebin arttığı durumda, kapasite artırılmazsa ya da maliyetler azaltılmazsa kötü olarak nitelenen bir enerji sistemi durumu ortaya çıkacaktır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelişen teknoloji ve artan nüfusun doğal bir sonucu olarak dünya genelinde enerji talebi her geçen gün daha da artmaktadır. Enerji elde etmek için yaygın olarak kullanılan fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması, insanları yeni enerji kaynakları bulmaya zorlamıştır. Araştırmalar, fosil yakıtlara alternatif olarak nükleer enerji ve yenilenebilir enerjinin ekonomik olarak son derece uygun seçenekler olabileceğini göstermiştir.

Nükleer ve yenilenebilir enerjinin her birinin ekonomik bir şekilde sürdürülebilir enerji arzı sağlayabileceği görülse de her iki seçenek için de olumsuz durumlar söz konusudur. Nükleer enerjiyle ilgili temel olumsuzluk, olası bir sızıntı olduğu takdirde, çevreye vereceği kalıcı zararın büyüklüğüdür. Son yıllarda çevreye zarar veren uygulamalardan kaçınılması ile birlikte, pek çok ülkede olası zararı çok büyük olan nükleer enerjiden elektrik üretimini azaltmaya ve devre dışı bırakmaya yönelik planlar geliştirilmektedir. Yenilenebilir enerjinin kullanımında karşılaşılan en önemli olumsuzluk ise, yenilenebilir kaynakların zaman içinde değişen miktarlarda enerji arzı sağlayabilmesidir. Yalnızca tek bir yenilenebilir kaynağa bağlı kalmak, enerji kesintilerine ve voltaj dalgalanmalarına bağlı hizmet kalitesi düşüklüğüne yol açmaktadır.

Birden fazla enerji kaynağının enerji arzını birlikte sağladığı enerji sistemleri olarak tanımlanan melez enerji sistemleri, yenilenebilir kaynakların temel olumsuz özelliklerinden kaynaklanan hizmet kalitesi sorunlarına bir çözüm olarak görülebilir. Birden fazla yenilenebilir kaynağın enerji arzı sağlamak için birlikte kullanılması yoluyla enerji kesintisi ve voltaj dalgalanması gibi sorunlar engellenebilir.

Bu tez çalışması, enerji depolama, yenilenebilir kaynaklar ve şebeke bağlantısı içeren melez enerji sistemlerinin üretim, dağıtım, depolama ve şebekeden satın alma kararlarının belirlenmesine yönelik bir karar modeli oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu karar modelinin ilk aşaması, enerji ağı için uygun enerji depolama teknolojisinin belirlenmesidir. Bunun için tereddütlü bulanık dilsel terimlere dayalı melez bir karar yaklaşımından yararlanılmaktadır. İlçe büyüklüğündeki bir ağ için yapılan uygulamada, öncelikle tereddütlü bulanık dilsel elemanlarla ifade edilen ve uzman görüşlerini gösteren ikili kıyaslama ifadeleri kullanılarak enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesine etki

eden faktörlerin ağırlık değerleri belirlenmiştir. Daha sonra tereddütlü bulanık dilsel elemanlara dayalı VIKOR yöntemi ile ilçe büyüklüğünde bir ağa uygun görünen altı farklı enerji depolama teknolojisi değerlendirilmiş ve en uygun teknoloji olarak volan tespit edilmiştir.

Uygun enerji depolama teknolojisi belirlendikten sonra, saatlik detay seviyesinde üretim, dağıtım, depolama ve şebekeden satın alma kararlarını belirleyecek çok amaçlı optimizasyon modeli çözülmektedir. Modelde sistemin toplam maliyeti, şebekeden alınan enerjiden kaynaklanan zararlı gaz salınımı ve yenilenebilir enerji kullanım oranı amaçları dikkate alınmıştır. Modelin çözümü için tek amaçlı çözümlerle belirlenen ideal çözümlere en büyük uzaklığın en küçüklenmesini hedefleyen referans nokta yöntemi kullanılmaktadır. Problemde bütün bir yıl için saatlik düzeyde kararları belirlemeye çalışmak büyük bir hesaplama zorluğu ile karşı karşıya kalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, benzer çalışmalarda araştırmacılar tarafından önerilen, yılın farklı dönemlerinde arz ve kapasite karakteristiğini yansıtacak dört haftalık bir temsili veri seti için çözüm elde edilmiştir.

Modelin çözümü elde edildikten sonra, kapasite, talep ve maliyet değişimlerinin çözüme etkisini incelemek için senaryo analizi yapılmıştır. Kapasite artışı, talep artışı ve maliyet azalışının mevcut durumla kombinasyonları üzerinden oluşturulan sekiz senaryo için çözüm sonuçları elde edilmiş ve senaryolarda kurgulanan enerji sistemi için yıllık eşdeğer ilk yatırım maliyeti ve istihdam yaratma değerlerini de içeren çok kriterli analiz yoluyla senaryolar değerlendirilmiştir. Senaryo analizi sonuçları yenilenebilir enerji ile elektrik üretim kapasitesinin artırılmasını ve tüketimi azaltıcı yolların bulunmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma şu yönleriyle literatüre katkı sağlamaktadır:

- Enerji depolama teknolojilerini değerlendirmede kullanılan çok kriterli yaklaşım literatüre ilk kez sunulmaktadır.
- Melez enerji sistemleri üzerine baz istasyonu, bina, kampüs gibi daha küçük ölçekli uygulamalar yapılmış olsa da, bu çalışma ilçe büyüklüğünde melez enerji ağlarının kurulmasını öneren ilk karar modelidir.
- Modelin farklı senaryolar ile çözümü sonrasında ELECTRE-TRI ile çözüm sonuçlarının sınıflandırılması yapılmaktadır.

Ülkemizde elektrik enerjisi çoğunlukla ithal kaynaklardan elde edildiği için dışa bağımlılık oldukça yüksektir. Buna karşın, yenilenebilir enerji kaynakları açısından da son derece yüksek bir potansiyel mevcuttur. Kayıp ve kaçak kullanım oranlarının yüksek olması ve önlenememesinden ötürü, bölgesel ölçekli ağların oluşturulması ve bölgelerin kendi bölgesinde yer alan yenilenebilir kaynaklardan karşılayamadığı enerjiyi ithal kaynaklara dayalı şebekeden temin etmesi bir çözüm olarak düşünülmektedir. Bu yönüyle, politika geliştiricilere bu tez çalışması ile önerilen ağ yapısının ilham vermesi mümkündür. Mevcut durum analizlerinde, yenilenebilir enerji kapasitesinin üretim tesisleri kurularak enerjiye dönüştürülmesinin ülkedeki enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayacağı tahmin edilmektedir.

Çalışmadaki temel kısıtlılık, optimizasyon aşamasında ele alınan problemde verilmesi gereken kararın 8760 saatlik bir dönemi kapsaması gerekirken, 672 saatlik temsili veri üzerinden çözümün elde edilmiş olmasıdır. Kullanılan optimizasyon yazılımının 8760 saatlik veri için çözümü alması saatler sürdüğünden, gelecek çalışmalarda tüm yıl için üretim planını oluşturmayı sağlayacak sezgisel veya metasezgisel çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi üzerine odaklanılabilir.

Ayrıca, uygulama çalışmasında yenilenebilir kaynaklardan yalnızca güneş ve rüzgâr enerjisinin dikkate alınmış olması da bir diğer kısıtlılık olarak değerlendirilebilir. Küçük ölçekli hidroelektrik santraller, biokütle ve jeotermal enerji gibi farklı yenilenebilir kaynakların bulunduğu durumları değerlendirmek üzere modele ek kısıtların geliştirilmesi üzerine gidilebilecek kıymetli bir araştırma konusu olacaktır. Buna benzer şekilde, karar üzerinde etkili olabilecek farklı değerlendirme kriterlerini ifade eden amaç fonksiyonlarının modellenmesi de incelemeye değer bir konu olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Aktaş, A. ve Kabak, M. (2019). A Hybrid Hesitant Fuzzy Decision-Making Approach for Evaluating Solar Power Plant Location Sites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(8), 7235-7247.

2. Güven, A. (2015). *Şebekeden Bağımsız Yenilenebilir Hibrit Enerji Sistemlerinin Boyutlandırmasında Yük Modelinin Etkisi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2.

3. Kabak, M. ve Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management*, 79, 25-33.

4. Şengül, Ü., Eren, M., Eslamian Shiraz, S., Gezder, V. ve Şengül, A. B. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, 75, 617–625.

5. Aktaş A. ve Kabak, M. (2020). A goal programming model for grid-connected hybrid energy system operations. *SN Applied Sciences*, 2(1), 71.

6. Kekezoğlu, B. (2007). *Şebekeden bağımsız çalışan hibrid enerji sistemlerinde risk değerlendirmesi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28-29.

7. Kabak, M., Sağlam, F. ve Aktaş, A. (2017). Farklı uzaklık hesaplama yaklaşımlarının TOPSIS üzerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 35-43.

8. Strantzali, E. and Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 885-898.

9. Zhou, P., Ang, B. W. and Poh, K. L. (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. *Energy*, 31, 2604-2622.

10. Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E. and Kiosses, I. (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37, 1587-1600.

11. Aydin, N. Y., Kentel, E. ve Duzgun, H. S. (2013). GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy Conversion and Management*, 70, 90-106.

12. Boran, F. E., Menlik, T. ve Boran, K. (2010). Multi-criteria Axiomatic Design Approach to Evaluate Sites for Grid-connected Photovoltaic Power Plants: A Case Study in Turkey. *Energy Sources Part B: Economics, Planning and Policy*, 5(3), 290-300.

13. Theodorou, S., Florides, G. and Tassou, S. (2010). The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. *Energy Policy*, 38, 7783-7792.

14. Mourmouris, J. C. and Potolias, C. (2013). A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. *Energy Policy*, 52, 522-530.

15. Perera, A. T. D., Attalage, R. A., Perera, K. K. C. K. and Dassanayake, V. P. C. (2013). A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems. *Applied Energy*, 107, 412-425.

16. Wu, Y. and Geng, S. (2014). Multi-criteria decision making on selection of solar–wind hybrid power station location: A case of China. *Energy Conversion and Management*, 81, 527–533.

17. Streimikiene, D., Sliogeriene, J. and Turskis, Z. (2016). Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania. *Renewable Energy*, 85, 148-156.

18. Perera, A. T. D., Nik, V. M., Mauree, D. and Scartezzini, J. L. (2017). An integrated approach to design site specific distributed electrical hubs combining optimization, multi-criterion assessment and decision making. *Energy*, 134, 103-120.

19. Maghsoodi, A. I., Maghsoodi, A. I., Mosavi, A., Rabczuk, T. and Zavadskas, E. K. (2018). Renewable Energy Technology Selection Problem Using Integrated H-SWARA-MULTIMOORA Approach. *Sustainability*, 10, 4481.

20. Babatunde, O. M., Munda, J. L. and Hamam, Y. (2019). Selection of a Hybrid Renewable Energy Systems for a Low-Income Household. *Sustainability*, 11, 4282.

21. Marcelino, C., Baumann, M., Carvalho, L., Chibeles-Martins, N., Weil, M., Almeida, P. and Wanner, E. (2020). A combined optimisation and decision-making approach for battery-supported HMGS. *Journal of the Operations Research Society*, 71(5), 762-774.

22. Das, S., Ray, A. and De, S. (2020). Optimum combination of renewable resources to meet local power demand in distributed generation: A case study for a remote place of India. *Energy*, 209, 118473.

23. Ali, T., Ma, H. and Nahian, A. J. (2020). A Multi-Criteria Decision-Making Approach to Determine the Optimal Hybrid Energy System in Coastal Off-Grid Areas: A Case Study of Bangladesh. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4, 265–277.

24. Ali, T., Aghaloo, K., Nahian, A. J., Chiu, Y. R. and Ahmad, M. (baskıda). Exploring the best hybrid energy system for the off-grid rural energy scheme in Bangladesh using a comprehensive decision framework, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-21.

25. Mahesh, A. and Sandhu, K. S. (2015). Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1135-1147.

26. Sinha, S. and Chandel, S. S. (2015). Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 755-769.

27. Fathima, A. H. and Palanisamy, K. (2015). Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 431-446.

28. Chedid, R. and Rahman, S. (1997). Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 12(1), 79-85.

29. Senjyu, T., Hayashi, D., Urasaki, N. and Funabashi, T. (2006). Optimum Configuration for Renewable Generating Systems in Residence Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 459-466.

30. Cai, Y. P., Huang, G. H., Yang, Z. F., Lin, Q. G. and Tan, Q. (2009). Community-scale renewable energy systems planning under uncertainty – An interval chance-constrained programming approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 721-735.

31. Wang, L. and Singh, C. (2007). *PSO-Based Multi-Criteria Optimum Design of A Grid-Connected Hybrid Power System With Multiple Renewable Sources of Energy*, IEEE Swarm Intelligence Symposium, Honolulu, 250-257.

32. Ardakani, F. J., Riahy, G. and Abedi, M. (2010). *Optimal sizing of a grid-connected hybrid system for North-west of Iran-case study*. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prag, 29-32.

33. Niknam, T., Kavousifard, A., Tabatabaei, S. and Aghaei, J. (2011). Optimal operation management of fuel cell/wind/photovoltaic power sources connected to distribution networks. *Journal of Power Sources*, 196, 8881-8896.

34. Asrari, A., Ghasemi, A. and Javidi, M. H. (2012). Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran-A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3123-3130.

35. Hafez, O. and Bhattacharya, K. (2012). Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renewable Energy*, 45, 7-15.

36. Kumaravel, S., Ashok, S. and Balamurugan, P. (2012). *Techno-Economic Feasibility Study of Biomass Based Hybrid Renewable Energy System for Microgrid Application*. International Conference on Green Technologies (ICGT), Trivandrum, 107-110.

37. Safaei, A., Freire, F. and Antunes, C. H. (2013). A model for optimal energy planning of a commercial building integrating solar and cogeneration systems. *Energy*, 61, 211-223.

38. Amirioun, M. H., Pourbabak, H. and Kazemi, A. (2013). *An economic study to investigate the impacts of energy policy changes on renewable contribution in power systems*. 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, Mashhad, 1-6.

39. Bortolini, M., Gamberi, M. and Graziani, A. (2014). Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 86, 81-92.

40. Gonzalez, A., Riba, J. R. and Rius, A. (2015). Optimal Sizing of a Hybrid Grid-Connected Photovoltaic-Wind-Biomass Power System. *Sustainability*, 7, 12787-12806.

41. Sharafi, M. and ElMekkawy, T. Y. (2015). Stochastic optimization of hybrid renewable energy systems using sampling average method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1668-1679.

42. Sharafi, M., ElMekkawy, T. Y. and Bibeau, E. L. (2015). Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio. *Renewable Energy*, 83, 1026-1042.

43. Ağralı, C. (2016). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanıldığı Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama ve Dağıtım Operasyonu Kararları Optimizasyonu*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 24.

44. Altıntaş, O. (2016). *Bi-Objective Optimization of Grid-Connected Decentralized Energy Systems*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33.

45. Abuelrub, A. and Singh, C. (2017). *Planning of a hybrid energy system connected to a distribution system*. IEEE Manchester PowerTech Conference, Manchester, 1-6.

46. Nojavan, S., Majidi, M., Najafi-Ghalelou, A., Ghahramani, M. and Zare, K. (2017). A cost-emission model for fuel cell/PV/battery hybrid energy ststem in the presence of demand response program: ε-constraint method and fuzzy satisfying approach. *Energy Conversion and Management*, 138, 383-392.

47. Rajbongshi, R., Borgohain, D. and Mahapatra, S. (2017). Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER. *Energy*, 126, 461-474.

48. Pereira, S., Ferreira, P. and Vaz, A. I. F. (2016). Optimization modeling to support renewables integration in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 316-325.

49. Altıntaş, O., Okten, B., Karsu, Ö. ve Kocaman, A. S. (2018). Bi-objective optimization of a grid-connected decentralized energy system. *International Journal of Energy Research*, 42, 447-465.

50. Beraldi, P., Violi, A., Carrozzino, G. and Bruni, M. E. (2018). A stochastic programming approach for the optimal management of aggregated distributed energy resources. *Computers and Operations Research*, 96, 199-211.

51. Vaccari, M., Mancuso, G. M., Riccardi, J., Cantù, M. and Pannocchia, G. (2019). A Sequential Linear Programming algorithm for economic optimization of Hybrid Renewable Energy Systems. *Journal of Process Control*, 74, 189-201.

52. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.

53. Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87-96.

54. Yager, R. R. (2014). Pythagorean Membership Grades in Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Sets*, 22(4), 958-965

55. Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences*, 8(3), 199-249.

56. Torra, V. (2010). Hesitant Fuzzy Sets. *International Journal of Intelligent Systems*, 25, 529-539.

57. Rodriguez, R. M., Martinez, L. and Herrera, F. (2012). Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets for Decison Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(1), 109-119.

58. Yavuz, M., Oztaysi, B., Onar, S. C. ve Kahraman, C. (2015). Multi-criteria evaluation of alternative-fuel vehicles via a hierarchical hesitant fuzzy linguistic model. *Expert Systems with Applications*, 42, 2835-2848.

59. Opricovic, S. and Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445-455.

60. Liao, H., Xu, Z. and Zeng, X. J. (2014). Hesitant Fuzzy Linguistic VIKOR Method and Its Application in Qualitative Multiple Criteria Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(5), 1343-1355.

61. Antunes, C. H., Alves, M. J. and Climaco, J. (2016). *Multiobjective Linear and Integer Programming*. İsviçre: Springer International Publishing, 9-48.

62. Mousseau, V. and Dias, L. (2004). Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 467-482.

63. Dias, L. C. and Mousseau, V. (2003). IRIS: A DSS for Multiple Criteria Sorting Problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12, 285-298.

64. EPRI. (2010). *Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits*. (1020676). Web: http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/doshay1/docs/EPRI.pdf, Erişim tarihi: 10.06.2021

65. Cavallaro, F. (2010). Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems. *Applied Energy*, 87, 496-503.

66. Daim, T. U., Li, X., Kim, J. and Simms, S. (2012). Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 3, 29-49.

67. Raza, S. S., Janajreh, I. and Ghenai, C. (2014). Sustainability index approach as a selection criteria for energy storage system of an intermittent renewable energy source. *Applied Energy*, 136, 909-920.

68. Özkan, B., Kaya, İ., Cebeci, U. ve Başlıgil, H. (2015). A Hybrid Multicriteria Decision Making Methodology Based on Type-2 Fuzzy Sets For Selection Among Energy Storage Alternatives. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(5), 914-927.

69. Vo, T. T. Q., Xia, A., Rogan, F., Wall, D. M. and Murphy, J. D. (2017). Sustainability assessment of large-scale storage technologies surplus electricity using group multi-criteria decision analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 689-703.

70. Ren, J. (2018). Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: A novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach. *Renewable Energy*, 121, 666-676.

71. Zhao, H., Guo, S. and Zhao, H. (2018). Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems. *Energies*, 11, 2841.

72. Acar, C., Beskese, A. ve Temur, G. T. A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems. *International Journal of Energy Research*, 43, 6419-6441.

73. Zhang, C., Chen, C., Streimikiene, D. and Balezentis, T. (2019). Intuitionistic fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria assessment of the energy storage technologies. *Applied Soft Computing*, 79, 410-423.

74. Zhao, H., Guo, S. and Zhao, H. (2019). Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences. *Energy*, 168, 450-461.

75. Çolak, M. and Kaya, İ. (2020). Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey. *Journal of Energy Storage*, 28, 101211.

76. İnternet: HOMER Pro. Web: https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html, Erişim Tarihi: 08.06.2021.

77. Ok, Y. ve Atak, M. (2018). Allocation of Distributed Energy Systems at District-Scale over Wide Areas for Sustainable Urban Planning with a MILP Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 4208415.

78. Yurdakul, M. ve İç, Y. T. (2019). Development of a New Support Mechanism to Calculate Feed-in Traiffs for Electricity Generation from Renewable Energy Sources in Turkey. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3, 423-436.

79. İnternet: Türkiye elektrik fiyatları, Eylül 2020. Web: https://tr.globalpetrolprices.com/Turkey/electricity_prices/, Erişim Tarihi: 08.06. 2021.

80. Li, X. (2019). *Evaluation and Design of a Flywheel Energy Storage System*. Yayımlanmamış Doktora Tezi, Graduate School of Energy Science and Engineering Technical University of Darmstat, Darmstat, Almanya, 21.

81. IRENA. (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 47-61.

82. İnternet: TÜİK. Web: https://data.tuik.gov.tr/Bulten/DownloadIstatistikselTablo?p=CwmQwf3cvq5s3ZBQl4mO3y4Ill3NArxGpSSowv26sLXigWb5C/mkNpLBX6RitrjV, Erişim Tarihi: 08.06.2021.

83. İnternet: What Is a Solar Farm? Cost, Land Needs & More. Web: https://www.solarreviews.com/blog/what-is-a-solar-farm-do-i-need-one#:~:text=How%20much%20does%20a%20solar,between%20%24820%2C000%20and%20%241.36%20million, Erişim Tarihi: 08.06.2021.

84. İnternet: Wind Turbine Cost: Worth The Million-Dollar Price In 2020? Web: https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/, Erişim Tarihi: 08.06.2021.

85. Özenç, B. ve Özen, E. N. (2020). *Türkiye'de Yenilenebilir Enerjiyle Beceri Ve İstihdam Gelişimi: Elektrik Sektörünü Karbonsuzlaştırmanın Yan Faydalarının Analizi*. İstanbul: Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi, 27-31.

86. Dias, L. C., Antunes, C. H., Dantas, G., de Castro, N. and Zamboni, L. (2018). A multi-criteria approach to sort and rank policies based on Delphi qualitative assessments and ELECTRE TRI: The case of smart grids in Brazil. *Omega*, 76, 100–111.

EKLER

EK-1. GAMS kodu

```
sets i üretim noktası /i1*i10/
    j talep noktası /j1*j25/
    k depolama /k1*k5/
    t planlama dönemi /1*672/;

Parameter eff efficiency / 0.87/
Parameter Scmin /0/
Parameter Scmax /1000/
parameter c(i) enerji üretim maliyeti
/
...
/
;
parameter cch(i) depolama maliyeti
/
...
/
;
Parameter AP(i) üretim tesislerinin o&m maliyetleri
/
...
/
;
Parameter pc şebekeden satın alma maliyeti /0.09/;
Parameter cap(i,t) capacity values
/
...
/
;
parameter D(j,t) demand values
/
...
```

EK-1. (devam) GAMS kodu

```
/
;
Parameter e emission /0.0004836/;
variables tcost, emission, rup;
positive variables x, xc, xd, xg, s, ru;
binary variables QP, y, f, fc, fd;

equations obj2, obj3, cost, dem1, dem2, dem3, dem4, cappek, capp, ren, plant, ch2ek, ch2,
ch3ek, ch3, ch4, ch5, ch61, ch62;

obj2.. emission=e=sum((j,t),e*xg(j,t));
obj3.. 672*rup=e=sum(t,ru(t));
cost..
tcost=e=sum(t,(sum(i,c(i)*(sum(j,x(i,j,t))+sum(k,xc(i,k,t))))+sum(j,pc*xg(j,t))))+sum(i,AP
(i)*QP(i));
dem1(j,t).. sum(i,x(i,j,t))+sum(k,xd(k,j,t))+xg(j,t)=E=D(j,t);
dem2(j,t).. sum(i,x(i,j,t))=G=D(j,t)*f(j,t)-1000000*(1-f(j,t));
dem3(j,t).. sum(k,xd(k,j,t))+xg(j,t)=L=1000000*(1-f(j,t));
dem4(j,t).. sum(k,xd(k,j,t))+xg(j,t)=G=0.01*(1-f(j,t));
cappek(i,t).. sum(j,x(i,j,t))+sum(k,xc(i,k,t))=G=0.01*y(i,t);
capp(i,t).. sum(j,x(i,j,t))+sum(k,xc(i,k,t))=L=cap(i,t)*y(i,t);
ren(t).. sum((i,j),x(i,j,t))+sum((k,j),xd(k,j,t))=E=ru(t)*sum(j,D(j,t));
plant(i).. sum(t,y(i,t))=L=10000*QP(i);
ch2ek(k,t).. sum(i,xc(i,k,t))=G=0.01*fc(k,t);
ch2(k,t).. sum(i,xc(i,k,t))=L=1000*fc(k,t);
ch3ek(k,t).. sum(j,xd(k,j,t))=G=0.01*fd(k,t);
ch3(k,t).. sum(j,xd(k,j,t))=L=1000*fd(k,t);
ch4(k,t).. fc(k,t)+fd(k,t)=l=1;
ch5(k,t)$(ord(t) ge 1).. s(k,t)=e=s(k,t-1)+eff*sum(i,xc(i,k,t))-sum(j,xd(k,j,t))/eff;
ch61(k,t).. s(k,t)=g=scmin;
ch62(k,t).. s(k,t)=l=scmax;
```

EK-1. (devam) GAMS kodu

```
model aaktasphd /all/;
aaktasphd.optcr=0.0000000;
aaktasphd.reslim=7200;
solve aaktasphd using mip minimizing tcost;
display tcost.l, emission.l, rup.l;

set obj /cost1, emission1, rup1/;
parameter refpoints(obj);
parameter nadirpoints(obj);
refpoints('cost1')=tcost.l;
nadirpoints('emission1')=emission.l;
nadirpoints('rup1')=rup.l;

solve aaktasphd using mip minimizing emission;
refpoints('emission1')=emission.l;
nadirpoints('cost1')=tcost.l;
nadirpoints('rup1')=min(nadirpoints('rup1'),rup.l);
display tcost.l, emission.l, rup.l;

solve aaktasphd using mip maximizing rup;
refpoints('rup1')=rup.l;
nadirpoints('cost1')=max(nadirpoints('cost1'),tcost.l);
nadirpoints('emission1')=max(nadirpoints('emission1'),emission.l);
display tcost.l, emission.l, rup.l;

parameter w(obj);
w(OBJ)=1/(refpoints(OBJ)-nadirpoints(OBJ));
display w;
scalar ro /0.00000000000001/;

positive variable v;
variable best;
```

EK-1. (devam) GAMS kodu

```
equations newobj, distance, distance1, distance2;
newobj.. best=e=v-sum(obj,ro*refpoints(obj));
distance.. v=g=w('cost1')*(refpoints('cost1')-tcost);
distance1.. v=g=w('emission1')*(refpoints('emission1')-emission);
distance2.. v=g=w('rup1')*(refpoints('rup1')-rup);
model refpoint /all/;
refpoint.optfile=1;
refpoint.optcr=0.000;
refpoint.reslim=14400;
refpoint.iterlim=1e9;
refpoint.limrow=0;
refpoint.limcol=0;
$onecho>cplex.opt
nodefileind 3
$offecho
solve refpoint using mip minimizing best;
display refpoints, nadirpoints, v.l;
```

EK-2. Model doğrulamasında kullanılan parametre değerleri ve elde edilen çözüm sonuçları

cap(i,t)	t=1	t=2	t=3
i=1	0	3000	2750
i=2	2350	1700	1200

AP(i)	i=1	i=2
	57.7	50

c(i)	i=1	i=2
	0.07	0.04

D(j,t)	t=1				t=2				t=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
	600	550	450	650	350	600	500	850	500	750	550	750

pc	Scmin	Scmax	eff	e
0.09	0	1000	0.87	0.06

x(i,j,t)	t=1				t=2				t=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
i=1												
i=2	600	550	450	650	350	600	500	250			450	750

xc(i,k,t)	t=1		t=2		t=3		t=4	
	k=1	k=2	k=1	k=2	k=1	k=2	k=1	k=2
i=1								
i=2	100							

s(k,t)	t=1	t=2	t=3
k=1	87	87	
k=2			

xd(k,j,t)	t=1				t=2				t=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
k=1												
k=2											75.69	

x(j,t)	t=1				t=2				t=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
								600	500	750	24.31	

ru(t)	t=1	t=2	t=3
	1.000	0.739	0.500

Q(i)	i=1	i=2
		1

y(i,t)	t=1	t=2	t=3
i=1			
i=2	1	1	1

f(j,t)	t=1	t=2	t=3
j=1	1	1	
j=2	1	1	
j=3	1	1	
j=4	1		1

fc(k,t)	t=1	t=2	t=3
k=1	1		
k=2			

fd(k,t)	t=1	t=2	t=3
k=1			1
k=2			

tcost	emission	rup
428.688	112.459	2.239



GAZİ GELECEKTİR...