

T.C
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TEKNOLOJİK
PERFORMANSLARININ VE DOĞAL GAZ KOMBİNE ÇEVİRİM
SANTRALLARINA ENTEGRASYONUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Merve BULUT

KIRIKKALE 2021

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Merve BULUT tarafından hazırlanan “BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TEKNOLOJİK PERFORMANSLARININ VE DOĞAL GAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLARINA ENTEGRASYONUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN

Üye : Prof. Dr. Tamer EREN

17/06/2021

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TEKNOLOJİK PERFORMANSLARININ VE DOĞAL GAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLARINA ENTEGRASYONUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

BULUT, Merve

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN

Mayıs 2021, 166 sayfa

Ülkelerin küresel rekabet gücünü artıran sürdürülebilir enerji politikaları yenilenebilir kaynaklı enerji üretiminin şebekedeki paylarının da artmasını sağlamıştır. Ancak bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli çalışma rejimi göstermesinden dolayı şebekedeki arz-talep dengeleme faaliyetlerinde konvansiyonel santrallerin görevini ağırlaştırmıştır. Dolayısıyla, konvansiyonel santrallerin rekabet yeteneğinin geliştirilmesi, diğer bir deyişle bu santrallara operasyonel esneklik kazandırılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu noktada yüksek termik verim ve güç ile işletme kolaylığı ve düşük çevresel emisyon avantajları sunan doğal gaz kombine çevrim santralleri (DGKÇS) dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, enerji arz-talep arasındaki zaman ve oran dengesizliğini gideren enerji depolama sistemleri (EDS) santral esnekliğini artıracak etkili çözümlerdir. Ancak bu çözümler hem santraldaki operasyonel kararlara hem de düşük atalet gösteren piyasaların kararlı hale geçmesine yönelik esnek çözümler olmalıdır. Batarya enerji depolama sistemleri (BEDS) ise, hızla gelişmekte olan bu endüstriye çevresel, verimli ve modüler anlamda ivme kazandırabilen, güç sistemlerinin farklı düzeylerine entegre edilebilir formlarının bulunduğu elektrokimyasal enerji depolama çözümleri olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, BEDS'in DGKÇS'ye entegrasyonu ile operasyonel esnekliğinin artırılması literatürde ilk kez bu tez kapsamında ele alınmıştır. Bununla birlikte, farklı kimyasal tiplere sahip BEDS'in ortak teknik özelliklere sahip olmaları, bu teknolojiler için performans değerlendirmesi yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Buradan hareketle, bu tez kapsamında ilk olarak entegrasyon için seçilen alternatif BEDS'in ortak teknolojik performans değerlendirmesi yapılmıştır. İkinci aşamada ise, santral entegrasyonu için bulanık bir ortamda karar vericiye yön bulmasını sağlayacak metodolojik bir bütün önerilmiştir. Her iki uygulamanın da şebeke paydaşlarınca değerlendirilen yüksek belirsizlik ve karmaşıklık içeren bir karar problemi olması ve karar vericilerin dilsel değerlendirmelerini ve deneyimlerini dikkate alan bulanık küme teorisi (BKT)'nin problem tipine uygunluğu dikkate alınarak uygulamanın birinci aşamasında, Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (PBAHP) ve Pisagor Bulanık TOPSIS (PBTOPSIS)'ten oluşan kombine çok kriterli karar verme modeli BEDS'in teknolojik performans değerlendirmesi için önerilmiştir. Önerilen bulanık temelli metodolojinin sonuçlarını analiz etmek ve geçerliliğini doğrulamak açısından PBAHP ile hesaplanan kriter ağırlıkları sırasıyla BTOPSIS ve BCOPRAS yöntemleri ile de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, önerilen modelin geçerliliğini ve sağlamlığını ölçmek ve olası koşullar altında sıralamanın stabilitesini gözlemlemek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, batarya performansında en önemli kriterler sırasıyla ekonomik ömür, deşarj süresi/enerji oranı ve yaşam döngüsü parametreleridir. Gelecek projeksiyonlarında hızla gelişmekte olan lityum-iyon bataryalar ilk sırada yer alırken, olgunlaşmış teknoloji olarak görülen kurşun-asit bataryaların da ikinci sırada yer aldığı uygulamanın diğer bir sonucudur.

Tezin ikinci aşaması olan entegrasyonun değerlendirilmesinde ilk olarak, santral için operasyonel amaçların önceliklendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, PBAHP ve PBTOPSIS yöntemlerinin kombinasyonu kullanılmıştır. Ardından, bu tezin ana amacı olan söz konusu öncelikli amaçlar altında sürdürülebilir bir projeksiyon oluşturulabilmesi için farklı koşullardaki BEDS'in sıralaması fazına geçilmiştir. Bu kapsamda, gelişmekte olan BEDS'in sıralaması için COPRAS yöntemi kullanılmıştır. Bu aşamanın sonucunda ise, lityum-iyon bataryaların ekonomik getiri ve teknolojik yeterlilikleri göz önüne alındığında, büyük ölçekli santrallarda etkili ikame teknoloji alternatifi olabileceği kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Batarya Enerji Depolama Sistemleri, Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralları, Bulanık Çok Kriterli Karar Verme

ABSTRACT

EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL PERFORMANCES OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS AND THEIR INTEGRATION INTO NATURAL GAS COMBINED CYCLE POWER PLANTS

BULUT, Merve

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, M.Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Evrencan ÖZCAN

May 2021, 166 pages

Sustainable energy policies, which increase the global competitiveness of countries, have increased the share of renewable energy generation in the grid. However, this circumstance has aggravated the role of conventional power plants in supply-demand balancing activities owing to the intermittent operation regimes of renewable energy sources. Therefore, the need to improve the competitiveness of conventional power plants, in other words, to provide operational flexibility to these power plants has emerged. At this point, natural gas combined cycle power plants (NGCCPs), which offer high thermal efficiency and power, ease of operation and low environmental emission advantages, draw attention. On the other hand, energy storage technologies (ESTs) that eliminate the time and ratio imbalance between energy supply and demand are effective solutions that can be increase plant flexibility. However, these solutions should be flexible solutions for both operational decisions in the power plant and stabilization of low inertia markets. Battery energy storage systems (BESSs) are defined as electrochemical energy storage solutions that can accelerate this rapidly developing industry in an environmental, efficient, and modular sense, and have forms that can be integrated into different levels of power systems. In this context, this study is the first in the literature to focus on the integration of BESSs in the power plants and increasing the operational flexibility. In addition, although BESSs have different operating regimes, common technological features made it possible for these systems to be comparable with each other.

In this thesis, a joint technological performance evaluation of alternative BESSs selected for integration was first made. In the second stage, a methodology that will enable the decision maker to find direction in a fuzzy environment is proposed for the integration. In the first phase of the application, Pythagorean Fuzzy Analytical Hierarchy Process (PFAHP) and Pythagorean Fuzzy TOPSIS (PFTOPSIS), a combined multi-criteria decision-making model has been proposed for the technological performance evaluation of BESSs, considering that both applications are a decision problem with high uncertainty and complexity evaluated by the grid stakeholders and the suitability of the fuzzy set theory (FST), which takes into account the linguistic evaluations and experiences of decision makers, to the problem type. To analyze the results of the proposed fuzzy-based methodology and verify its validity, the criteria weights calculated with PFAHP are presented comparatively with the Fuzzy TOPSIS and Fuzzy COPRAS methods, respectively. In addition, sensitivity analysis was conducted to measure the validity and robustness of the model and to observe the stability of the ranking under possible conditions. The results show that the most important criteria in battery performance are lifetime calendric, energy rating/discharge time and life cycle criteria, respectively. Another conclusion of the case study is that while the rapidly developing lithium-ion battery takes the first place in future projections, it takes the second place in lead-acid batteries, which are seen as mature technology.

In the evaluation of integration, which is the second stage of the thesis, the prioritization of operational objectives for the power plant has been realized firstly. At this phase, the combination of PFAHP and PFTOPSIS methods was used. Then, in order to create a sustainable projection under these priority purposes, which is the main purpose of this thesis, the ranking phase of BESSs in different conditions has been started. In this context, the COPRAS method was used to rank the developing battery storage technologies. The results of the proposed methodology show that lithium-ion batteries given their economic return and technological capabilities can be an effective substitution technology alternative in NGCCPPs.

Keywords: Battery Energy Storage Systems, Natural Gas Combined Cycle Power Plants, Fuzzy Multi-Criteria Decision Making

TEŞEKKÜR

Tezimin oluşumundan tamamlanmasına kadar geçen sürecin her aşamasında başarı duygusunun birleştiriciliğini öğrendiğim, bilim insanı kişiliği ve insanîyetini her zaman örnek alacağım, değerli fikirleri ile benzersiz destek ve rehberliğini hiçbir zaman eksik etmeyerek, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım, kıymetini birkaç kelime ile açıklamakta güçlük yaşadığım ve yollarımızın tekrar tekrar kesişmesini dilediğim tez yöneticisi Sayın Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN' a, şimdiye kadar bana olan sevgilerini, emeklerini ve özverilerini esirgemeyen, ne kadar teşekkür etsem de haklarını ödeyemeyeceğim değerli babam Necmi BULUT, annem Hülya BULUT ve abim Emre BULUT' a, lisans ve lisansüstü eğitimimde birçok şey öğrendiğim Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine, 2020/080 numaralı proje ile bu tezi destekleyen Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve son olarak hür bir yaşam ile çalışma ortamı sunduğu için Türkiye Cumhuriyeti' ne ve Ulu Önder Mustafa Kemal ATATÜRK' e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEZİN ARKA PLANI	7
3. DGKÇS VE BEDS ENTEGRASYONU	9
3.1. DGKÇS İşletme Esasları.....	9
3.2. BEDS Alternatifleri.....	11
3.2.1. Kurşun-Asit Bataryalar	13
3.2.2. Lityum-İyon Bataryalar.....	14
3.2.3. Vanadyum-Redoks Akış Bataryalar.....	15
3.2.4. Sodyum-Sülfür Bataryalar	16
3.2.5. Sodyum-Nikel Klorür (ZEBRA) Bataryalar	17
3.3. Entegrasyonun Elektriksel Altyapısı.....	21
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	24
5. MATERYAL VE METOT	50
5.1. Çok Kriterli Karar Verme	50
5.1.1. COPRAS	50
5.2. Bulanık Çok Kriterli Karar Verme.....	51
5.2.1. Bulanık Kümeler	51

5.2.2.	Bulanık COPRAS	52
5.2.3.	Bulanık TOPSIS.....	54
5.2.4.	Pisagor Bulanık Kümeler	57
5.2.5.	Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi.....	59
5.2.6.	Pisagor Bulanık TOPSIS.....	61
6.	UYGULAMA	64
6.1.	Veri Toplama	65
6.2.	BEDS'in Ortak Teknolojik Performans Değerlendirmesi	68
6.2.1.	Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklandırması	71
6.2.2.	BEDS Alternatiflerinin Önceliklendirilmesi.....	73
6.3.	Karşılaştırmalı Analiz	75
6.4.	Duyarlılık Analizi.....	76
6.5.	DGKÇS'ye Operasyonel Esneklik Kazandırmak İçin BEDS Entegrasyonu 79	
6.5.1.	DGKÇS'de Enerji Depolama Amaçlarının Önceliklendirilmesi	80
6.5.2.	DGKÇS'ye Entegrasyon İçin BEDS Seçimi	84
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	99
8.	ÇIKARIMLAR	104
	KAYNAKLAR	108
	EKLER.....	122

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

3.1. Farklı batarya teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları.....	19
3.2. Farklı batarya teknolojilerinin karakteristik performans ölçümleri	20
4.1. Büyük ölçekli yanmalı termik santrallerle enerji depolama entegrasyonunun literatür özeti	27
4.2. Enerji depolama sistemleri ile ilgili literatür özeti.....	31
4.3. Enerji depolama sistemlerinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi.....	34
5.1. Üçgensel bulanık sayılardan oluşan dil ölçeği	52
5.2. Yamuksal bulanık sayılardan oluşan dil ölçeği.....	55
5.3. Pisagor bulanık AHP için dil ölçeği.....	59
5.4. Pisagor bulanık TOPSIS için dil ölçeği	61
6.1. Uzman ekip bilgileri.....	66
6.2. Batarya enerji depolama sistemi ortak teknoloji performansı değerlendirme kriterleri.....	69
6.3. Uzman değerlendirmeleriyle oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi.....	72
6.4. PBTOPSIS için uzman değerlendirmeleriyle oluşturulmuş karar matrisi	74
6.5. Pozitif ve negatif ideal çözümler.....	74
6.6. PBTOPSIS yakınlık $\xi(X_i)$ değerleri	74
6.7. Performans kriter ağırlıklarına göre duyarlılık analizi sonuçları	78
6.8. Operasyonel amaçlar için ikili karşılaştırma matrisi.....	81
6.9. PBTOPSIS için uzman değerlendirmeleriyle oluşturulmuş karar matrisi	83
6.10. Pozitif ve negatif ideal çözümler	84
6.11. Amaçların önceliklendirilmesi için hesaplanan PBTOPSIS yakınlık $\xi(X_i)$ değerleri.....	84
6.12. BEDS seçimi için değerlendirme kriterleri ve tanımları.....	85
6.13. Y1 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi	86
6.14. Y1 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları	87
6.15. BEDS'e ait güncel veriler	87
6.16. BEDS seçimi için düzenlenen karar matrisi	88

6.17. Y2 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi	89
6.18. Y2 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları	90
6.19. Y3 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi	91
6.20. Y3 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları	92
6.21. Y4 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi	94
6.22. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları	95
6.23. Y5 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi	96
6.24. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları	97



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. Farklı enerji depolama teknolojilerinin kapasite ve deşarj süreleri	3
3.1. Doğal gaz kombine çevrim santralında elektrik üretimi	11
3.2. Batarya enerji depolama sistemleri sınıflandırması	13
3.3. Kombine çevrim gaz türbini için temel tek hat şeması	21
3.4. BEDS'nin uyarma sistemi ile entegrasyonu: a) seri b) paralel.....	23
4.1. Literatürde dikkate alınan enerji depolama sistemleri	48
4.2. Literatürde dikkate alınan ana kriter oranları.....	48
4.3. İncelenen akademik çalışmalardaki duyarlılık analizi oranı	49
6.1. Uygulamanın kavramsal çerçevesi.....	65
6.2. BEDS teknoloji performans değerlendirmesinin hiyerarşik yapısı.....	69
6.3. PBAHP ile hesaplanmış kriterlerin ağırlıkları	72
6.4. BEDS alternatiflerinin teknolojik performansları.....	75
6.5. Karşılaştırılan yöntemlerin sıralama sonuçları.....	76
6.6. Entegrasyon değerlendirmesinin hiyerarşik yapısı	79
6.7. PBAHP ile hesaplanmış kriterlerin ağırlıkları	81
6.8. Y1 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları	86
6.9. Y1 amacı için BEDS sıralaması.....	88
6.10. Y2 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları.....	89
6.11. Y2 amacı için BEDS sıralaması.....	91
6.12. Y3 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları.....	92
6.13. Y3 amacı için BEDS sıralaması.....	93
6.14. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları.....	94
6.15. Y4 amacı için BEDS sıralaması.....	95
6.16. Y5 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları.....	96
6.17. Y4 amacı için BEDS sıralaması.....	98
7.1. Ana kriterlerin farklı operasyonel amaçlardaki ağırlıkları.....	101
7.2. Alt kriterlerin farklı operasyonel amaçlardaki sıralaması.....	102
7.3. DGKÇS'de operasyonel esneklik için BEDS sıralaması	103

KISALTMALAR DİZİNİ

BCOPRAS	Bulanık COPRAS
BEDS	Batarya Enerji Depolama Sistemleri
BKT	Bulanık Küme Teorisi
BTOPSIS	Bulanık TOPSIS
CODAS	COmbinative Distance-based ASsessment
COPRAS	COmplex PROportional Assessment
DC	Direkt Akım
DGKÇS	Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralleri
EDS	Enerji Depolama Sistemleri
FBWM	Bulanık Best-Worst Metodu
FBWP	Bulanık Best-Worst Projection
FGRA	Fuzzy Grey Relational Analysis
GP	Goal Programming
GRA	Grey Relational Analysis
GSUT	Generator Step-Up Transformer
HFAHP	Hesitant Fuzzy AHP
HFLTS	Hesitant Fuzzy Linguistic Terms Set
HFVIKOR	Hesitant Fuzzy VIKOR
HRSG	Isı Geri Kazanımlı Buhar Jeneratörü
HV	Yüksek Gerilim
IF	Interval Fuzzy
IFAWA	Intuitionistic Fuzzy Arithmetic Weighted Averaging
IFN	Intuitionistic Fuzzy Number
IIFAHP	Interval Intuitionistic Fuzzy AHP
IMADA	Interval Multi-Attribute Decision Analysis
Li-iyon	Lityum-İyon
LV	Düşük Gerilim
MAVT	Multiple Attribute Value Theory
MV	Orta Gerilim
NaNiCl ₂	Sodyum-Nikel Klorür/ZEBRA

NaS	Sodyum-Sülfür
NLFP	Non-Linear Fuzzy Prioritization
Pb-acid	Kurşun-Asit
PBAHP	Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi
PBK	Pisagor Bulanık Kümeler
PBTOPSIS	Pisagor Bulanık TOPSIS
PDH	Pompaj Depolamalı Hidroelektrik
PI-BESS	Plant Integrated Battery Energy Storage Systems
SHED	Sıkıştırılmış Hava Enerjisi Depolama
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UAT	Unit Auxiliary Transformer
VRFB	Vanadyum-Redoks Akış Batarya
WSM	Weighted Sum Method
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

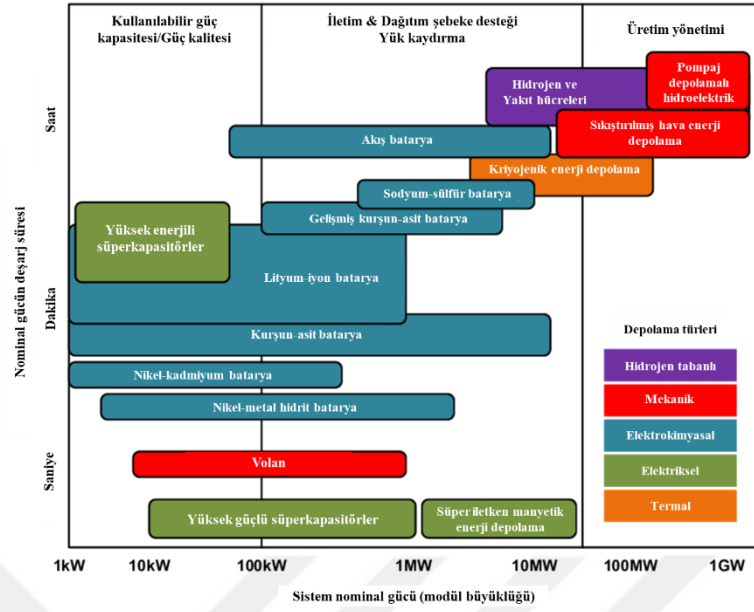
1. GİRİŞ

Ekonomik büyümede, ülkelerin kişi başına düşen gayri safi milli hasılası ile enerji tüketimi arasındaki pozitif korelasyon, enerjinin mevcudiyetine ve kullanılabilirliğine olan önemini güçlü bir şekilde yansıtmaktadır [1]. Ülkelerin daha iyi bir yaşam kalitesi inşa etme çabasına ek olarak sosyal ve ekonomik ilerlemeyi sağlama hedefleri, enerjiye artan miktarlarda ihtiyaç olduğunu da net bir şekilde göstermektedir. Bu artışın istikrarlı, güvenilir ve ekonomik bir şekilde karşılanabilir olması, kaynakların yerleştirilmesi ve bu kaynakların en verimli şekilde kullanılması ile mümkündür [2]. Bu doğrultuda, elektrik üretiminde yerleşmeyi merkez noktasına alarak güçlü bir enerji stratejisi geliştirmeyi hedefleyen Türkiye, tarihinin en büyük doğal gaz keşfini 21 Ağustos 2020’de gerçekleştirmiştir. Bu keşfe, Türkiye’nin kuzey bölgesinde yaklaşık 1.600 kilometre kıyı uzunluğu bulunan Karadeniz’in Tuna-1 olarak da bilinen Sakarya Gaz Sahası’nda ulaşılmıştır. Bu keşif sonucunda, 405 milyar metre küp doğal gaz rezervine ulaşıldığı duyurulmuştur. Ulaşılan bu rezervin 2023 yılına kadar üretime geçirilmesi planlanmaktadır [3]. Böylece, 2020 yılı Temmuz ayı sonu itibarıyla Türkiye’nin toplam elektrik enerjisi kurulu gücünde %27,79 oranında büyük paya sahip doğal gaz santrallerinde %99’u ithal edilen doğal gaz için Türkiye’nin enerjideki dışa bağımlılığını azaltma konusunda kuvvetli bir hamle gerçekleştirilmiştir [4]. Cari açık sorunun başlıca nedenlerinden biri olan enerji ithalatını azaltabilecek bu hamle, elektrik üretim sektöründe de hem fosil kaynaklı santraller hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) şebeke entegrasyonu için büyük önem arz etmektedir.

Enerji ihtiyacının sürekli karşılanabilir olması için elektrik üretim altyapısının güçlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye için bu altyapı geleneksel bir seviyede olup, büyük ve merkezileştirilmiş elektrik üretim santrallerinde üretimin gerçekleştirilmesi ve son kullanıcılara iletim-dağıtım yapılması üzerine kurulmuştur [4]. Ancak bu sistemler elektrik talebindeki artış, yeni teknolojilerinin sebebiyet verdiği yük profillerindeki değişim, YEK’in (özellikle güneş ve rüzgâr) hızlı penetrasyonu ve bu kaynakların kesikli çalışma rejimlerine karşı sınırlı bir esneklik göstermektedir. Bu nedenle, sınırlı esnekliğe sahip bir elektrik sistemini işletmek için gerekli olan altyapı değişim ihtiyacı, ilave maliyetleri de beraberinde getirmektedir [5]. Tam olarak bu

noktada, enerji arz güvenliği, hızlı devreye girebilme ve çevresel emisyon limitleri göz önüne alındığında doğal gaz kombine çevrim santrallerinin (DGKÇS) teknolojik yapısı diğer termik santraller ile kıyaslandığında aralarındaki fark bir avantaj olarak görülebilir. Çünkü, özellikle DGKÇS'nin çevresel açıdan zararlı madde emisyonları oldukça düşük seviyededir. Katı atıkların olmamasının yanı sıra NO_x salınımı da düşük seviyededir. Ayrıca, bu santrallerin diğer termik santrallara göre ilk yatırım maliyetleri düşüktür. Bir diğer avantaj ise, bu santraller baz ve puant yük ihtiyacını karşılamak için gaz türbinlerini tek başlarına ya da buhar türbinleri ile birlikte kullanılmaktadır. Gaz türbinleri üç frekans kontrol hizmetini de (birincil rezerv, acil durum rezervi, regülasyon) sağlamakta görevlidirler. Dolayısıyla bu görev, YEK'in şebekedeki dengesizliklerine çözüm olmakla beraber elektrik piyasalarındaki teklif stratejilerine göre santrale ekonomik getiri sağlayabilecek bir destek konumundadır [6–9]. Dolayısıyla, bu desteğin hem yerli kaynak kullanımı hem de operasyonel esnekliğe sahip güçlü santraller ile birleştirilmesi sadece enerji dönüşümündeki ivmeyi hızlandırmayacak, aynı zamanda sınırlı miktardaki yerli kaynakları uzun süreli ve verimli kullanmaya da teşvik edecektir.

DGKÇS'nin operasyonel esnekliğinin artırılması basit santral iyileştirmelerinden elektrik üretiminde kullanılabilecek sentetik yakıtların geliştirilmesi gibi ilerici ve çeşitli seçenekler ile mümkün olabilmektedir [10]. Ancak bu esneklik seçenekleri için enerji sistemindeki operasyonel kararlara uygun farklı değişken sürelerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu nedenledir ki, modern güç sistemlerinde enerji arz-talep arasındaki farkları dengelemek ve istikrarı sağlamak, enerjinin depolanmasını önemli kılmakla birlikte, şebeke paydaşlarına da stratejik kararlar almaları için operasyonel esneklik kolaylığı sunmaktadır. Bu stratejik kararlar enerji depolama sistemlerinin (EDS) sınıflandırılmasına da izin vermektedir. Örneğin, frekans için birkaç saniyeden, mevsimsel arbitraj için aylar süren uygulamalara kadar uzanan bir aralıkta olması gibi durumlar dikkate alınmalıdır. Bu kapsamlı ve çelişen amaçlara uygun EDS'ler gerekli açıkları kapatabilecek kabiliyete sahiptir. Farklı şebeke hizmetleri için kategorize edilen EDS'ler milisaniyeden saate kadar kısa vadeli depolama, 8 saate kadar orta vadeli depolama ve birkaç günden haftalara kadar süren uygulamalar ise uzun vadeli depolama olarak bilinmektedir (Şekil 1.1). Bu doğrultuda, şebekede birçok karara uygun farklı kapasite boyutlarına sahip EDS bulunmaktadır [11,12].



Şekil 1.1. Farklı enerji depolama teknolojilerinin kapasite ve deşarj süreleri [1]

Enerji şebekelerindeki farklı amaçlara yönelik uygulama olanaklarının, elektrokimyasal enerji depolamada batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) güçlü pazar büyümesi ile birleşmesi hem santrallerin hem de şebekelerin modernizasyonunda kritik rol oynamaktadır. Bu kritik görev, BEDS'in geniş çalışma aralıklarına sahip olması, diğer bir deyişle ölçeklenebilirlikleri ve bunun sonucu olarak da çeşitli şebeke hizmetlerini yerine getirme kabiliyetlerinde diğer depolama teknolojilerine göre daha esnek ve modüler uygulanabilirliği gerçeklerini kapsamaktadır [13]. Diğer bir yandan, şebekeye bağlı BEDS'in uygulama amacıyla ilişkili olarak arbitraj, iletim sıkışıklığı ve frekans regülasyonu gibi şebeke hizmetlerinde potansiyel bir gelir kaynağı fırsatı oluşturabileceği ayrıca bilinmektedir [14]. Uygulanabilirliği derinden etkileyen farklı maliyet ve teknolojik parametreler ise, depolama teknolojilerinin analiz edilmesindeki en önemli sac ayaklarını oluşturmaktadır. Bu uygunluğun ekonomik boyuttaki analizi, BEDS'in finansal potansiyellerini ölçmek için yapılan çeşitli çalışmaları kapsamaktadır [15–17]. Bu kapsam, doğru gelir tahminleri ile BEDS'in ekonomik değerleri hakkında stratejik değerlendirilmelerinin yapılabilirdiği ve bir paradigma değişikliği yorumu ile

sonuçlanabildiği çalışmaları içermektedir. Bir diğer etkili analiz ise, BEDS'in sahip oldukları ortak parametrelerin, birbirleri ile rekabet içinde olması sebebiyle yapılan değerlendirmelerdir. Bu durum teknolojilerin kıyaslanabilir olması fırsatını da ortaya koymaktadır [18]. Dolayısıyla bu çalışmada, şebeke hizmetlerinde hızlı ve etkin çalışma kabiliyeti olan DGKÇS ile BEDS'in kapsamlı bir konfigürasyonu araştırılmıştır.

Bununla birlikte, Türkiye'deki fiziksel ve finansal elektrik ticareti mekanizmasındaki belirsizliğin de dikkate alınması gerekmektedir. Buna ek olarak, farklı operasyonel amaçlar altında faaliyet gösteren DGKÇS için depolama amaçlarının belirlenmesi dikkate alınması gereken bir diğer husustur. DGKÇS ve BEDS'in kapsamlı araştırıldığı bu çalışma, gelişmekte olan depolama teknolojisinin santral entegrasyonu için seçimini de içermektedir. Bahsedilen problemin bu kapsamlı yapısı dikkate alındığında, insan tecrübe ve görüşleriyle harmonize edilmiş, gerçekçi ve pragmatik açıdan değerlendirilmesi birçok ortak kriterin çatıştığı ortamda karar vermeyi kolaylaştıran hem geleneksel hem de bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerine uygun bir problemin varlığı dikkat çekmektedir. Ancak problemin karar verme süreci hem nitel hem de nicel kriterleri içermektedir. Bu nedendir ki, geleneksel çok kriterli karar verme yöntemlerinin aksine Zadeh tarafından geliştirilen ve insan yargılarının hatta tecrübelerinin modellenmesini mümkün kılan bulanık küme teorisini (BKT) bu problem için çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte kullanmak, hesaplama ve analizleri en uygun çözüme ulaştıracaktır [19]. Bununla birlikte, karar vericilere bulanık ortamdaki belirsizlik ve kararsızlıklarla başa çıkabilme kolaylığı sağlamak için son zamanlarda sıradan bulanık kümelerin bazı uzantıları (Sezgisel [20], Nötrosofik [21], Kararsız [22], Pisagor [23] vb.) geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, bu çalışmada da kullanılan Pisagor bulanık kümeler (PBK), diğer bulanık uzantılı kümelerin aksine karar vericiler için toplamı en fazla 1 olan üyelik ve üyelik dışı dereceler atama zorunluluğunu, bu derecelerın karelerinin toplamının en fazla 1 olması şartına esnetmiştir. Bu sayede, karar vericilerin fikirlerini ifade etmekteki özerklik sağlanmıştır.

Tüm bu bilgiler ışığında, enerji arz güvenliğine sürdürülebilir, modern ve modüler çözümler sunan, kritik derecede önemli gelecek projeksiyonu vaat eden 5 BEDS

alternatifinin bulanık ortamda daha hassas ve doğru sonuçlara ulaştıracağı görüşüyle teknoloji performans değerlendirilmesi, bu çalışmanın kavramsal çerçevesindeki ilk aşamayı oluşturmaktadır. Bu alternatifler sırasıyla kurşun-asit (Pb-acid), lityum-iyon (Li-ion), vanadyum redoks akış bataryası (VRFB), sodyum-nikel klorür (NaNiCl_2) ve sodyum-sülfür (NaS) teknolojileridir. Spesifik performans değerlendirmesi için teknoloji geliştirilmesinde doğrudan ve dolaylı olarak etki sağlayan şebekedeki 10 paydaş görüşü alınmıştır. Ardından literatür kıyaslaması yapılarak nihai performans kriterleri alternatifler açısından değerlendirilmiştir. Bu aşamaya kadar önerilen bulanık tabanlı çok kriterli karar verme modelinin hiyerarşik yapısının ilk aşamasında, kriterlerin şebeke paydaşlarından oluşan uzman grup tarafından değerlendirilmesi yapılmıştır. Ardından Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (PBAHP) ile kriterlerin önceliklendirilmesi yapılmış ve hesaplanan ağırlıklar ile batarya enerji depolama alternatiflerinin Pisagor bulanık TOPSIS (PBTOPSIS) ile sıralaması elde edilmiştir. Önerilen modelin geçerliliğini doğrulamak için PFAHP ile ağırlıklandırılmış kriterler sırasıyla Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) ve Bulanık COPRAS (BCOPRAS) yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın uygulama bölümündeki ilk aşama, modelin geçerliliğini ve sıralamaların kararlılığını ölçmek için olası senaryolar altında yapılan duyarlılık analizi hesapları ile sonlandırılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, batarya performansında en önemli kriterler sırasıyla ekonomik ömür, deşarj süresi/enerji oranı ve yaşam döngüsü parametreleridir. Gelecek projeksiyonlarında hızla gelişmekte olan lityum-iyon bataryalar ilk sırada yer alırken, olgunlaşmış teknoloji olarak görülen Kurşun-asit bataryaların da ikinci sırada yer aldığı uygulamanın diğer bir sonucudur.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, santrallara batarya depolama entegrasyonu amaçlarının (spark spread- birim elektrik satış fiyatı ile birim elektrik üretimi için kullanılan doğal gaz maliyeti arasındaki fark-, sistem dengeleme maliyetlerinin azaltılması, emre amadelik, operasyonel verimlilik ve sera gazı emisyonları) önceliklendirilmesi için değerlendirme kriterleri (işletme güvenliği, karlılık, çevresel emisyonlar) uzmanlar tarafından oluşturulmuştur. Bu değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP, önceliklendirilmesi için ise PBTOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Dikkate alınan batarya depolama teknolojilerinin her bir amaç altındaki nihai sıralaması ise, COPRAS yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu aşamanın

sonucunda ise, Lityum-iyon bataryaların ekonomik getiri ve teknolojik yeterlilikleri göz önüne alındığında, büyük ölçekli santrallarda etkili ikame teknoloji alternatifi olabileceği kanıtlanmıştır.

Bu tez çalışması giriş bölümünden sonra 7 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, tezde ele alınan problemlerin gerçek hayattaki yansımalarına göre belirlendiği ve bu sayede kullanılan yöntem için gelecek projeksiyonlarına ışık tutacak motivasyon açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde ise, uygulama amacıyla belirlenen DGKÇS'nin BEDS entegrasyonunun teknik ve operasyonel detaylarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, problemin çok kriterli karar verme yöntemlerine uygunluğu göz önüne alınarak kapsamlı bir bakış açısı altında literatür özeti verilmiştir. Beşinci bölüm, tez çalışmasında önerilen metodolojiye göre geleneksel ve bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin algoritma adımlarını içermektedir. Uygulamaların yer aldığı altıncı bölümde, önerilen metodoloji ve tez çalışmasında ele alınan 2 uygulamanın detaylarıyla yoğunlaştırılmıştır. Sonuçların doğruluğu, modelin geçerliliği, karşılaştırmalar ve senaryo analizlerine dayalı duyarlılık analizi yedinci bölümde sunulurken, genel çıkarımlar ve çalışmanın literatüre katkılarından sekizinci bölümde bahsedilmiştir.

2. TEZİN ARKA PLANI

Modern ve temiz enerji idolü ile küresel bir enerji dönüşümü içerisine giren ülkelerden biri olan Türkiye'nin bu dönüşüme önemli kararlar ile katkı sağlayacağı bir gerçektir. Günümüzdeki elektrik arz fazlası ve Covid-19 salgınına bağlı yaşanan iktisadi durgunluğun orta vadede artış trendi yakalayacağı ve talebin hızlı bir şekilde yükseleceği öngörülmektedir [24,25]. Dolayısıyla, elektrik sistemindeki yenilikçi yatırımlara olan ihtiyacın gerekliliği gün geçtikçe daha da gün yüzüne çıkmaktadır. En faydalı sonuçlar için bu yatırımların, doğru alanlara yönlendirilmesi ve burada objektif karar araçlarının kullanılması gerektiği, cevaplanmaya muhtaç bir soru olarak durmaktadır. Bu kapsamda, alınacak kararların enerji sektörü üzerindeki etkisinin yıllarca sürecektir olacağı unutulmamalıdır. Dolayısıyla bu çalışma, bu bağlamda farklı koşullar ve tercihlerdeki etkiler üzerine kritik soruları cevaplayan ve karar vericilere sonuçları karşılaştırma olanağı sunan bir çalışma niteliği taşımaktadır.

Bu kapsamlı çerçevede ışığında hazırlanan bu tezin temel yaklaşımında, enerji sektöründe yerleşmeyi merkez noktasına alarak güçlü bir enerji stratejisi geliştirmeyi hedefleyen Türkiye, tarihinin en büyük doğal gaz keşfini 21 Ağustos 2020'de gerçekleştirmesi yer almaktadır. Böyle bir potansiyelin ithal doğal gaz kaynakları yerine ikame edildiği varsayıldığında Türkiye'nin mevcut doğal gaz tüketimi yaklaşık 7 yıl boyunca karşılanabilecektir. Bu durum ise, mevcut doğal gaz ithalat değerinde en az 80 milyar dolarlık bir ekonomik fayda sağlayabileceğini göstermektedir. Bu ekonomik fayda, Türkiye'nin doğal gaz konusunda dışa bağımlılığını azaltacağı yanı sıra doğal gaz zincirinde bulunan sektörlerin daha çok gelişmesini sağlayabilecek bir potansiyele sahip olacağını düşündürmektedir. Dolayısıyla, yerli doğal gaz kaynaklarının etkileyebileceği değişimleri anlamak büyük önem taşımaktadır [3].

Mevcut durumda doğal gaz tüketen sektörlerin başında elektrik üretiminde Türkiye toplam kurulu gücünün yüzde 26,77'lik kısmını oluşturan doğal gaz kaynaklı santraller gelmektedir. Bununla birlikte, Türkiye'nin 2020 yılındaki elektrik üretiminin (290.774.020 MWh) yüzde 23,4'ü, doğal gaz kaynaklı üretim tesisleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak Covid-19 salgının yaşandığı 2020 yılında arz ve

talebin gerçek zamanlı olarak dengelenmesi amacına hizmet eden dengeleme güç piyasası verilerine göre, yılın 8.784 saatinin 3528 saatinde enerji fazlalığı, 4.819 saatinde ise enerji açığı yaşanmıştır [26]. Tüm bu bilgilerin ortak bir çatıda birleştirilmesi sonucunda, Türkiye elektrik şebekelerinin geleneksel yapıda olduğu gerçeğinin geliştirilmesi ihtiyacı gün yüzüne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, enerji temini ve talebi arasındaki orantıdan doğabilecek farkı en aza indirebilecek teknolojiler arasında enerji depolama teknolojileri teknik ve ekonomik olarak önemli bir alternatiftir.

Geleneksel yapıda olan elektrik üretim tesisleri için güçlü bir alternatif olan EDS, günümüzde de teknik gelişimiyle umut verici forma sahip BEDS'in gelişimini yönlendirmektedir. Birçok varyasyonu olan BEDS'in yüksek enerji yoğunluğu, hafıza bulundurmaması, programlanmış döngü gerektirmemesi ve nispeten düşük kendi kendine deşarj oranı, elektrokimyasal depolamayı diğer depolama teknolojilerinden ayıran en temel teknik özellikleridir. Buna ek olarak, bataryaların modüler bir yapıda olması avantajı hibrit bir batarya depolama tesisi kurulabilmesine de olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, farklı uygulama amaçları için BEDS'in değerlendirilmesi hem enerji sektöründeki hem de elektrik piyasalarındaki yüksek belirsizliği, bu tez kapsamında önerilen hiyerarşik model ile rasyonel kılmanın yanı sıra enerjide yerlileşmeyi merkez noktasına alan Türkiye'deki DGKÇS için kapsamlı bir konfigürasyonunun araştırılmasına da önemli bir projeksiyon sunacaktır.

3. DGKÇS VE BEDS ENTEGRASYONU

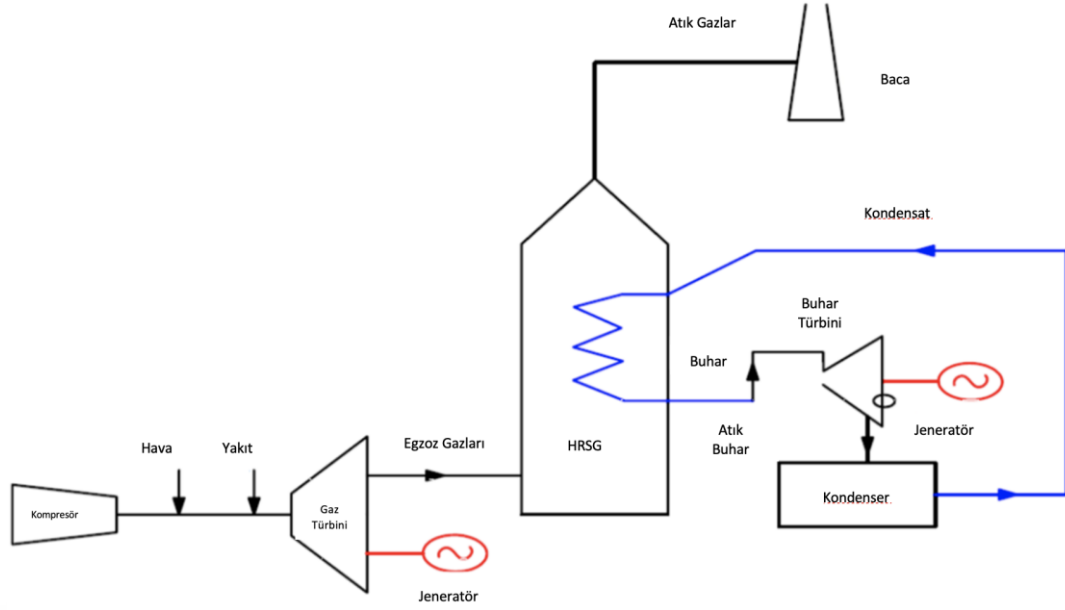
Sunulan kapsamlı konfigürasyon, büyük ölçekli konvansiyonel santrallarda EDS entegrasyonunun araştırılması ve enerji sistemlerindeki ihtiyaçlara göre seçiminde, gelecek projeksiyonlarının nasıl görüneceğine dair birçok beklentiyle çatışan ve yüksek belirsizlik altında karmaşık bir karar sorunu oluşturduğu hipotezine dayanmaktadır. Bu kavramsal çerçeve, günümüzde sağladığı yatırım faydaları, hızlı tepki ve yükselen ticarileşme potansiyelinin yanı sıra modülerleşme ile karakterize olan BEDS ile daraltılmıştır. Bunun temel sebebi, BEDS'in başarılı birçok teknik geliştirmelerinin gelecek için oldukça önemli bir potansiyeli işaret ettiği dünya çapındaki operasyonel ve büyük ölçekli kullanımları ile de kanıtlanmış olmasıdır [27]. Bir diğer kanıt ise, yeni bataryaların verimliliği, güç ve enerji yoğunlukları, çevrim ömrü gibi ortak teknik parametrelerinin önemli ölçüde iyileştirilmiş olmasıdır. Bununla birlikte, BEDS sağladığı bu faydaların yanı sıra esnek kurulum kolaylığı ve kısa kurulum süresi ile ilişkilendirildiğinde şebeke, EDS'in vazgeçilmez unsuru olmaya adaydır. Dolayısıyla, Türkiye'deki elektrik ticareti ve organize piyasalar göz önüne alındığında rüzgâr ve güneş enerjisi paylarının yüksek olması konvansiyonel santralların kapasite kullanım oranlarını büyük oranda düşürmektedir. Bu durum, santralların kârlılıklarını da olumsuz anlamda etkilemektedir. Bu kapsamda, konvansiyonel santrallara operasyonel esneklik kazandırılması piyasalardaki baskıyı azaltacaktır. Dolayısıyla, DGKÇS'ye elektrokimyasal enerji depolamasının entegre edilmesi seçeneği bir alternatif olarak düşünülebilir. Bu bölüm, önceki çalışmalardan bilindiği kadarıyla nadiren uygulama alanı olarak seçilen BEDS'in büyük ölçekli (özellikle DGKÇS) bir santrala entegrasyonunun hem santral hem de entegre edilebilecek batarya alternatiflerinin teknik ve operasyonel açıdan incelendiği alt bölümlerden oluşmaktadır.

3.1. DGKÇS İşletme Esasları

DGKÇS, elektrik üretiminde iki ayrı işlem kullanılmasından dolayı kombine çevrim elektrik santrali olarak adlandırılır. DGKÇS, birbirinden bağımsız üretim bloklarından

oluşmaktadır. Ancak bazı tesisler üretim blokları tarafından ortak kullanılır. Bu durumda elektrik üretimi iki farklı aşamada gerçekleştirilir. Genel olarak üretim bloklarında gaz türbini, kompresör, gaz türbini jeneratörü, atık ısı kazanı, kondenser birimi, buhar türbini ve buhar türbini jeneratörleri bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, deniz suyu soğutmalı ıslak tip veya kuru tip soğutma kuleleri, su arıtma tesisi, şalt tesisi, kumanda ve kontrol sistemleri de santralda yer almaktadır [28,29].

Elektrik üretiminin ilk aşamasında, hava ile gaz bir yanma odasında karıştırılarak yakılır. Bu sıcak yanan gaz, genişir ve gaz türbininden geçerek türbin kanatlarını döndürür. Bu dönüş aynı şaft üzerindeki jeneratörü de çevirmektedir. Bu döngü sonucunda birinci aşama elektrik üretimi gerçekleşir. İkinci aşama elektrik üretimi ise, yanmadan oluşan sıcak egzoz gazlarının yeniden kullanılmak üzere ısı geri kazanımlı buhar jeneratörüne (HRSG), diğer bir deyişle atık ısı kazanına gönderilmesi ile başlamaktadır. Kazan içindeki su gönderilen ısıdan dolayı buharlaşır. Buhar, gerekli basınç ve sıcaklığa ulaştığında buhar türbinine gönderilir. Türbin, buhar vasıtasıyla döner. Buhar türbininin dönüşü, aynı şaft üzerindeki bir diğer jeneratörü çevirerek ikinci aşama elektrik üretimi gerçekleştirilir. Buhar türbinlerinden çıkan atık buhar, soğutma kulelerinden gelen soğutma suyunu kullanarak kondenserde yoğunlaştırılır. Buhar, suya dönüştüğünde tekrar ısıtılmak için HRSG'ye gönderilir. Bu çevrim, kazanlarda üretilen buharın, buhar türbinine gönderilmesiyle tamamlanır. Sonuç olarak, elektrik tüketimini azaltmak ve verimliliği maksimum seviyede tutmak için kazanlardaki buhar üç farklı basınç düzeyinde (alçak, orta ve yüksek basınç) tutulmaktadır. Bu sayede, sıcak gazlardan en yüksek fayda sağlanmış olur [28,29]. Bahsedilen elektrik üretim prosesi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Doğal gaz kombine çevrim santralinde elektrik üretimi [30]

3.2. BEDS Alternatifleri

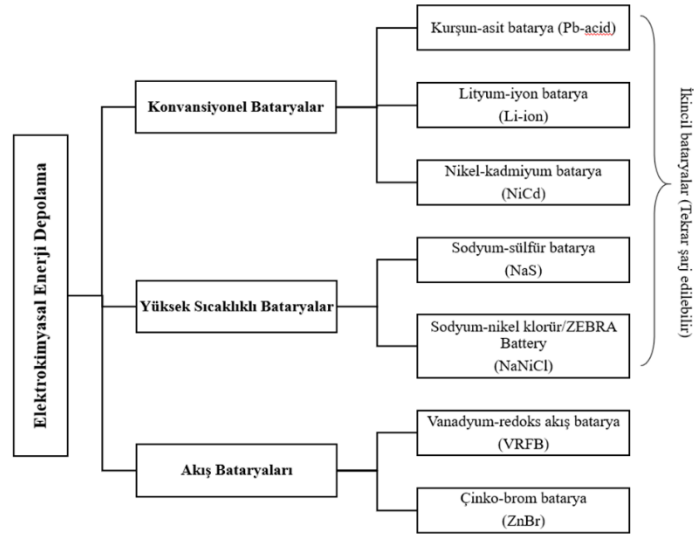
Güç sistemlerinden gelen elektrik enerjisini, ihtiyaç zamanında tekrar elektriğe dönüştürme işlemi enerji depolamanın doğasını oluşturmaktadır. Bu süreç, fizik ve kimya kanunlarından yararlanılan disiplinler arası bir oluşumun ürünüdür. Dolayısıyla, depolanma formuna göre enerji depolaması kendi içerisinde kategorize edilebilir [31]. Bu sınıflandırma kabaca şu şekildedir (Şekil 1.1):

- Mekanik Teknolojiler (volan, pompaj depolamalı hidroelektrik, sıkıştırılmış hava, sıvılaştırılmış hava)
- Elektriksel Teknolojiler (kapasitörler, süper iletken mıknatıs)
- Termal Teknolojiler (Erimiş tuz enerjisi depolama, termokimyasal, hissedilir ısı, gizli ısı)
- Elektrokimyasal Teknolojiler (Lityum-iyon bataryalar (Li-ion), kurşun asit bataryalar (Pb-acid), Nikel-kadmiyum bataryalar (NiCd), Sodyum sülfür bataryalar (NaS), ZEBRA (NaNiCl₂), Vanadyum redoks akış bataryalar (VRFB), Çinko bromin bataryalar (ZnBr)).
- Kimyasal Teknolojiler (Hidrojen (H₂), Sentetik doğal gaz (SNG)).

Bu çalışmada dikkate alınan EDS, elektrokimyasal teknolojiler içerisinde yer alan batarya teknolojileridir. Bataryalar, iki elektrolit malzemedeki depolanmış kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Basit batarya çalışma mantığında, iyonlar negatif elektrottan pozitif elektrota hareket ederken elektrik üretmek için harici bir devreyi kullanırlar. Bu tür bataryalar konvansiyonel batarya sınıfında yer almaktadır. Şarj süresince elektrolit iyonize edilirken, deşarj periyodunda elektrolit iyonlarda birikmiş kimyasal, potansiyel redoks reaksiyonları kullanılarak elektriğe dönüştürülür. Bu çalışma formları göz önüne alındığında bataryalar, elektrolit türlerine göre sınıflandırılırlar. Kurşun-asit, lityum-iyon ve nikel-kadmiyum bataryalar konvansiyonel batarya sınıfında yer almaktadır [32].

Diğer bir batarya sınıfı ise yüksek sıcaklıklı bataryalardır (high temperature batteries). Bu bataryaların çalışma rejimleri konvansiyonel olan bataryalara oldukça benzer. Ancak çok yüksek sıcaklıkta çalışma gerektirmesi sebebiyle bu bataryalarda katı elektrolitler kullanılır. Bu özellik, bu bataryaları konvansiyonel bataryalardan ayıran en önemli farktır. Sodyum-sülfür ve sodyum-nikel klorür bataryalar bu sınıfta yer almaktadır [33,34].

Son olarak hem geleneksel hem de yüksek sıcaklıktaki bataryaların elektrokimyasal reaksiyonlarına oldukça benzeyen diğer batarya sınıfı ise akış bataryalarıdır. Akış bataryaların ise her iki gruptan temel farkı, elektrolitlerin reaktörün hem içinde hem dışında harici ve devamlı olarak depolanmış bir şekilde olmasıdır. Bu temel fark, akış bataryalarına sürekli çalışma yeteneği, sıcaklık takibi ve kontrol kolaylığı, elektrolit konsantrasyonu, kolay elektrolit değiştirme prosedürleri gibi birçok avantaj sağlamıştır. Ancak bahsedilen avantajlar akış bataryalarının daha pahalı olmasını ve sürekli bakım gerektirmesi gibi bazı dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Aynı zamanda bu bataryaların birçok tamamlayıcı bileşeninin olması hem alan hem de enerji gereksinimlerini artırmaktadır. Enerji gereksinim fazlalığı, dolaylı olarak genel verimliliği de azaltmaktadır. Vanadyum-redoks akış ve çinko-brom bataryalar bu sınıfta yer almaktadır [35–37]. Bataryaların temel elektrolit ve çalışma reaksiyonlarına göre sınıflandırılması Şekil 3.2’de sunulmuştur.



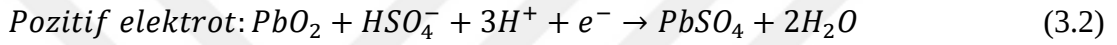
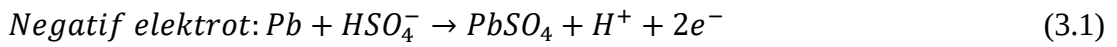
Şekil 3.2. Batarya enerji depolama sistemleri sınıflandırması [32–37]

Bu bilgiler ışığında değerlendirilen BEDS’in ayrıntılı olarak açıklanması aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

3.2.1. Kurşun-Asit Bataryalar

1859 yılında Gaston Plante tarafından icat edilen ilk ticari ve şarj edilebilir batarya türüdür. Kimyasal yapısı incelendiğinde, negatif elektrot kurşun dioksit (PbO_2), pozitif elektrot kurşun (Pb) yüklüdür [38]. Elektrolit, sülfürik asit solüsyonundan oluşmaktadır. Saf haldeki kurşunun yumuşak yapıda olması kolay dağılmasına sebebiyet verir. Batarya reaksiyonlarına ait basit kimyasal denklemler sırasıyla Eşitlik 3.1 – Eşitlik 3.3’te verilmiştir. Standart hücre voltajları (E_{battery}^0) 25°C ve 1 atmosferik basınçta 1 Molar iyon konsantrasyonu çözeltisi kullanılarak ölçülmüştür. Bu, kullanım açısından elverişli bir durum değildir. Bu nedenle hem mekanik kuvvet elde etmek için hem de elektriksel iyileştirme sağlamak için küçük miktarlarda metal ilavesi yapılmaktadır. En yaygın ilavelerin başında antimon, kalsiyum, kalay, selenyum, kadmiyum ve arsenik gelmektedir. Ancak bu ilavelerden bazıları iyileştirici etki yaparken diğer yandan dengeleme ihtiyacını da gerektirir. Başka bir ifadeyle, antimon ve kalay derin döngü üzerinde pozitif etki yaparken bu durum su tüketimine

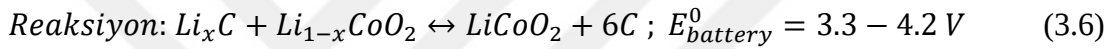
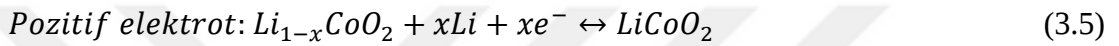
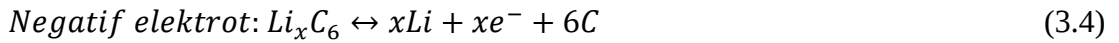
olan ihtiyacı arttırmaktadır. Dolayısıyla, dengeleme problemi oldukça önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorun mühürlü/valf ayarlı (sealed/valve regulated) kurşun asit batarya (SLA, VRLA) ile aşılmıştır. Çünkü VRLA bataryalar, pozitif plakalardaki oksijen ile negatif plakalardaki hidrojenin rekombinasyonunu kullanarak su üretir [32]. Böylece geleneksel kurşun asit bataryaların su ilave problemini ortadan kaldırır. Kurşun asit bataryaların, ağırlığın önem teşkil etmediği uygulamalarda kullanımı yaygındır. Mikro şebekelerde, enerji santralleri ve trafo merkezlerinde yedek batarya olarak kullanılırken, telekomünikasyon sistemleri ve statik cihazlarda da işlev görmektedir [38–41].



3.2.2. Lityum-İyon Bataryalar

1912 yılında G.N. Lewis tarafından ilk çalışmalarının yapıldığı lityum-iyon bataryaların şarj edilebilen versiyonları 70'li yılların başında üretilmiştir. Bir lityum-iyon batarya 3 kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar sırasıyla, pozitif-negatif elektrotlar ve ayırıcı plaka olan elektrolittir. Pozitif elektrot, lityum demir fosfat (LiFePO₄) ve lityum mangan oksit bileşiklerinden oluşmaktayken, negatif elektrot malzemesi grafitir [42]. Grafit elektrotlar bazı elektriksel avantajlar sağlarken, önemli potansiyel risklerin bulunduğu dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Bu elektrotların, yüksek gerilim ve yeterli özgül kapasiteye (specific capacity) (200 mA h/g) sahip olmaları hızlı şarj esnasında dendrit kristalinden dolayı kısa devre olmasına sebebiyet verir. Bu durum, grafit malzemesinin daha yüksek özgül kapasiteye sahip metalik kalay ve oksitlerinin kullanımı ile geliştirilmektedir. Lityum-iyon bataryaların çalışma prensibi elektronların hareketi ile elektromanyetik gücün oluşumundan güç üretilmesini içermektedir. Şarj sırasında, pozitif elektrotta ayrılan lityum iyonları elektrolit vasıtasıyla negatif elektrotta hareket eder. Bu esnada negatif elektrot lityum ile kaplıdır.

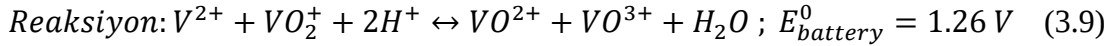
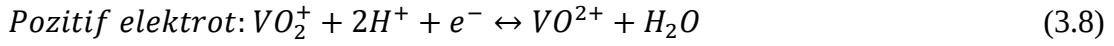
Lityum iyonlarının tersi yönde hareketi ise, deşarj olma durumunu ifade eder. Batarya reaksiyonlarına ait basit kimyasal denklemler sırasıyla Eşitlik 3.4 – Eşitlik 3.6’da verilmiştir. Bu eşitliklerdeki lityum yükü (x), 1 ya da 0 olabilir. Şarj-deşarj sıklığının önemli olduğu durumlarda, bu bataryaların çevrim ömrü yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla, elektrikli araçların gelişiminde önemli rol oynayan bu batarya türü, küçük ölçekli güç kaynağı olarak kullanılması durumunda idealdir. Ancak gelişmekte olan lityum batarya türleri artık yenilenebilir enerji kaynaklarında ve mikro şebekelerde de sıklıkla kullanılmaktadır [42–44].



3.2.3. Vanadyum-Redoks Akış Bataryalar

1984 yılında Avustralya’daki New South Wales Üniversitesinden Prof. Maria Kacos tarafından önerilen şarj edilebilen bir batarya türüdür. Vanadyumun sülfürik asitteki dört farklı oksidasyonunun çözeltideki bulunma durumundan yararlanır [45]. Diğer bir deyişle, pozitif ve negatif yarım hücreli elektrolitler solüsyondaki V^5/V^4 ve V^3/V^2 redoks çiftlerini kullanır. Çözeltideki değerlik durumu değiştirilerek kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü gerçekleştirilir. Şarj sırasında, pozitif elektrolit V^5 , negatif elektrolit V^2 iyon çözeltisidir. Deşarj durumundan sonra pozitif elektrolit V^4 , negatif elektrolit V^3 iyon çözeltisine dönüşür. Elektrik iletimi geçirgen bir membran kullanılarak H^+ iyonları ile sağlanır. Tek bir aktif malzemenin kullanılması elektrotlar (veya tanklar) arasındaki tehlikeli olan çapraz kirlenmeyi önlemektedir. Batarya reaksiyonlarına ait basit kimyasal denklemler sırasıyla Eşitlik 3.7 – Eşitlik 3.9’da verilmiştir. Membrandaki elektrik enerjisi şarj regülatörüne aktarılır [46]. Regülasyondan sonra inverter kısmına aktarılarak istenilen güçte enerji dönüşümü yapılır. Son zamanlarda bataryanın kritik malzemeleri olan elektrolitler, iyon çözeltiler

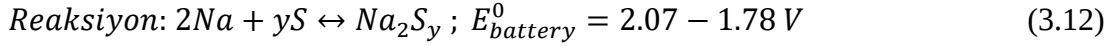
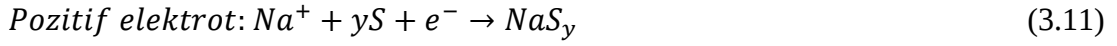
ve elektrotlar üzerine geliştirmeler yapılmaktadır. Sistem performansının arttırılması için elektrolit depolayan tankların eklenmesi yeterlidir [47,48].



3.2.4. Sodyum-Sülfür Bataryalar

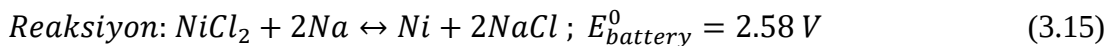
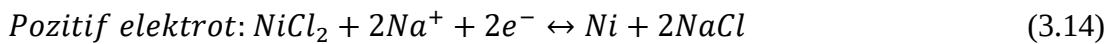
1966 yılında N. Weber ve J.T. Kummer tarafından Ford Araştırma Laboratuvarı'nda geliştirilen sodyum sülfür bataryalar, elektrikli araçların bataryası için yüksek enerji ve güç yoğunluğu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [49]. Yüksek sıcaklıklı bir batarya olan sodyum sülfür, erimiş tuz teknolojisinin temel reaksiyonunu kullanmaktadır. Pozitif ve negatif elektrotlarında sırasıyla erimiş kükürt ve erimiş sodyum bulunmaktadır. Katı beta alümina seramik (β'' -Al₂O₃) elektrolite sahiptir. Bu nedenle, sistemin yaklaşık 300-350°C'de tutulması şartı gereklidir. Ancak bu sıcaklık aralığında elektrik üretimi ve reaksiyonlar gerçekleşmektedir. şarj sırasında, elektrolitin içinden pozitif sodyum iyonlarının geçmesi sonucunda sülfür ile reaksiyon gerçekleşir. Deşarj anında, pozitif sodyum iyonlar elektrolit içinden geçerek, elektronların batarya dışına akması sağlanır [50]. Batarya reaksiyonlarına ait basit kimyasal denklemler sırasıyla Eşitlik 3.10 – Eşitlik 3.12'de verilmiştir. Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12'deki kükürt yükü (y), 3,4 ve 5 olabilir. Yüksek sıcaklıkta iki elektrotun aktif malzemeleri sıvı haldedir. Bu nedenle, bu bataryanın katı elektrot ve sıvı elektrolite sahip diğer bataryaların aksine ters bir yapıyla çalışması, diğer bataryalardan temel farkıdır. Bu temel fark, sıvı sodyumun hava ile temas etmesi anında ciddi tehlikelere yol açmaktadır. Ancak bu sorun, modern bataryalarda bir ucu kapalı silindirik bir tüp formu ile kullanılması ile aşılmıştır [50,51].





3.2.5. Sodyum-Nikel Klorür (ZEBRA) Bataryalar

Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Projesi (Zeolite Battery Research Africa Project, ZEBRA) olarak da bilenen batarya, 1985 yılında Güney Afrika'daki Council for Scientific and Industrial Research (CSIR)'da icat edilmiştir [52]. Çalışma prensipleri ve kimyası sodyum sülfür bataryaya benzemektedir. Bataryanın pozitif ve negatif elektrotları sırasıyla nikel klorür ($NiCl_2$) ve erimiş sodyum içermektedir. Ayrıca, pozitif elektrotlar yeterli seviyede iyonik iletkenlik sağlamak için bir metal halojenür ($NaAlCl_4$) yüklüdür. Elektrolit ise, sodyum sülfür bataryalardaki gibi katı beta alümina seramikten oluşmaktadır. Batarya reaksiyonlarına ait basit kimyasal denklemler sırasıyla Eşitlik 3.13 – Eşitlik 3.15'te verilmiştir. Sodyum sülfür bataryaların aksine, hücre yapısını saran dış çelik kasa (the outer steel case) negatif elektrottaki sıvı sodyum ile temastadır. Pozitif elektrot ise, silindirik formlu hücre yapısının ortasında bulunmaktadır. Bu durum sodyum sülfür bataryaların aksine daha düşük sıcaklıkta (yaklaşık $190^\circ C$) çalışma imkânı sunmaktadır. Bunlara ek olarak, seramik elektrolitin tamamen katı haldeyken çalışmasını sağlamak için geliştirmeler de yapılmaktadır. Yüksek iletkenlik potansiyeli taşıyan sodyum süper iyonik iletkenler tüm katı hal sodyum bataryaların önünü açan yenilikçi gelişmeler arasında yer almaktadır [40,53–55].



Bu bilgiler ışığında batarya kimyası ve basit çalışma prensibinden bahsedilen tüm bataryaların teknik özelliklerinin avantaj ve dezavantajları, buna ek olarak şebeke

hizmetlerindeki uygulamaları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Devamında ayrıca bahsedilen bataryalara ait ortak ve spesifik teknik özelliklerinin güncel ölçümleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.



Çizelge 3.1. Farklı batarya teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları

Kaynak	Batarya	Avantajlar	Dezavantajlar	Şebeke Uygulamaları
[32], [38–41]	Kurşun- asit (Pb-acid)	- Nispeten yüksek gidiş dönüş verimliliği - Sürdürülebilirlik - Düşük sermaye maliyet	- Yüksek güvenlik - Çevre kirliliği - Düşük güç yoğunluğu - Yüksek sıcaklık gerektirmes	- Sınırlı yaşam döngüsü - Uzun şarj zamanı - Yüksek kendi kendine deşarj oranı - Ağır - Sıcak yedek - Frekans regülasyonu - Yük ayarı
[42–44]	Lityum- iyon (Li-ion)	- Az bakım gerektirir - Az yaşlanma etkisi - Periyodik deşarj bakımı gerektirmez	- Yüksek enerji yoğunlukları - Yüksek gidiş dönüş verimliliği - Uzun yaşam döngüsü - Hafif - Yüksek sıcaklıkta tehlikeli - Yüksek başlangıç maliyeti - Özel şarj devresi ve koruyucu devre gerektirir.	- Taşıma yönetmeliği (büyük miktarlarda) - Donma sıcaklıklarında şarj hızı düşüktür - Lityum tedarik sorunu - Bozulma (yüksek voltaj ve sıcaklıkta) - Frekans regülasyonu - Yük seviyelendirme - Güç kalitesi
[45–48]	Vanadyum- redoks akış (VRFB)	- Yüksek güç - Uzun yaşam döngüsü - Hızlı şarj/deşarj	- Enerji/Güç derecesi ölçeklenebilir - Hızlı tepki süresi - Geri dönüştürülebilir - Yüksek üretim maliyeti - Geniş alan - Düşük elektrolit stabilitesi	- Düşük spesifik enerji (kararsız uygulamalar) - Yük seviyelendirme - Acil durum bekleme - Güç kalitesi
[49–51]	Sodyum- sülfür (NaS)	- Yüksek güç ve enerji yoğunlukları - Yüksek verimlilik - Yüksek yaşam döngüsü	- Düşük yoğunluklu aktif malzemeler - Yüksek hücre gerilimi - Esnek çalışma - Üretim maliyeti - Güvenlik endişeleri - Yüksek sıcaklık durumu	- Reaktif malzeme - Trafo merkezinde yük kaydırma - Bekleme gücü - Gerilim desteği
[40,52– 54]	Sodyum- nikel klorür (NaNiCl ₂)	- Kısa tepki süresi - Esnek kurulum boyutu - Yüksek enerji verimliliği	- Düşük bakım maliyeti - Nispeten kısa yaşam döngüsü - Yüksek başlangıç maliyeti - Yüksek sıcaklık durumu	- Enerji zaman kayması - Yedek rezerv - Frekans regülasyonu

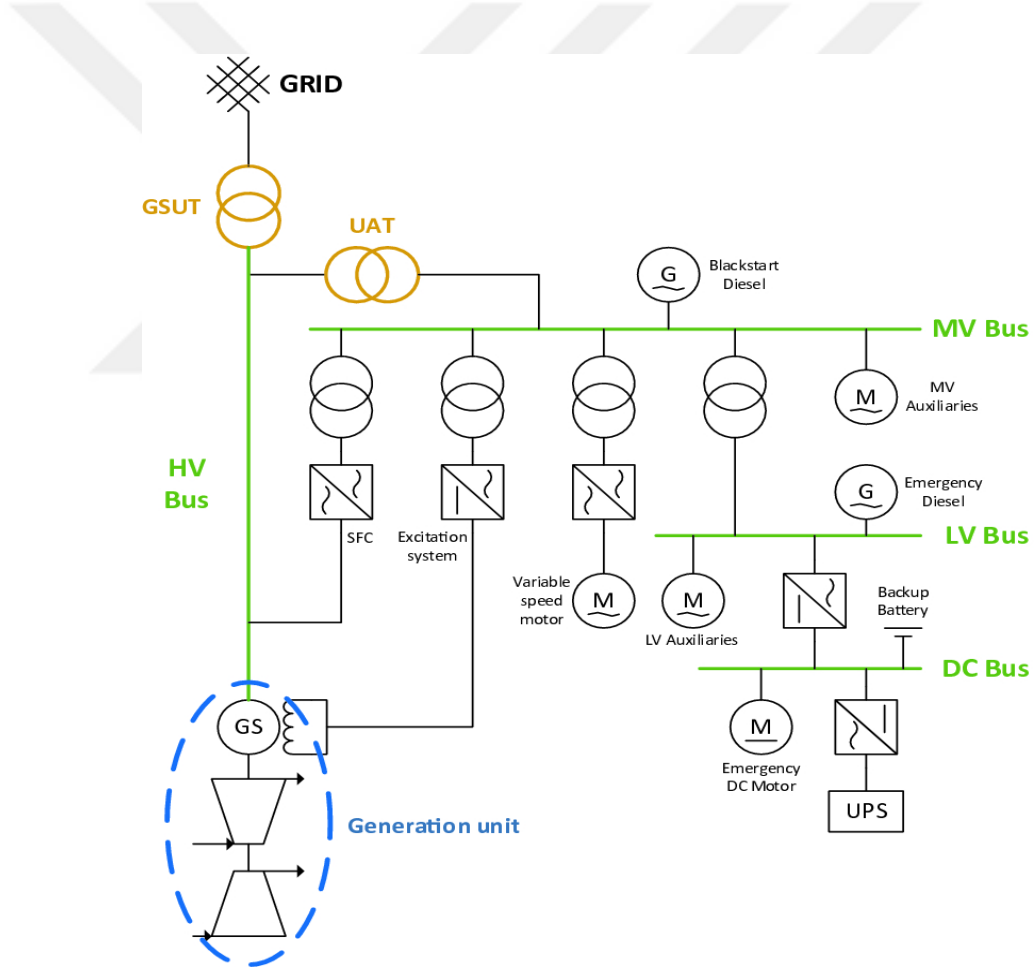
Çizelge 3.2. Farklı batarya teknolojilerinin karakteristik performans ölçümleri [56,57,66,67,58–65]

Karakteristik / Batarya Teknolojileri	Birim	Kurşun-Asit (Pb-acid)*	Lityum-İyon (Li-ion)	Vanadyum-Redoks Akış Bataryalar (VRFB)	Sodyum-Nikel Klorür/ZEBRA (NaNiCl ₂)	Sodyum-Sülfür (NaS)
Güç oranı	MW	0-50	0/10-50/100	0.005/1-1.5/10	0/0.001-0.3/1	0.2/5
Enerji oranı/Deşarj süresi	MWh	0.1/0.25-50/100	10 ⁻⁵ /4-10/100	0.01/4-10/40	0.12-5	1.2
Yaşam döngüsü	çevrim x 10 ³	0.1/0.5-2/3	0.25/4.5-5/20	2-5/13+	2.5/4-4.5	1/4.5/12
Ekonomik ömür	Yıl	3/5-15/20	2/5-15/20	2/10-15/20	10-14/15	5/12-15/20
Çevrim/gidiş-dönüş verimliliği	%	70/75-85/92	70/85-90/100	60/85-88/90	85-90	65-92
Enerji yoğunluğu/ Hacimsel enerji yoğunluğu	Wh/L	50-90	200-500/600	15/16-33	150-180	150-345
Güç yoğunluğu	W/L	10-400/700	1300/1500-10,000	0.5-2	220-300	20/50
Tepki süresi	Birkaç milisaniye	5-10 ms, < 1/4 çevrim, birkaç ms	20-1000 ms, < 1/4 çevrim, birkaç ms	< 1/4 çevrim, birkaç ms	birkaç ms	birkaç ms

*: Valf ayarlı kurşun asit batarya (VRLA / SLA) ve sulu kurşun asit batarya (FLA) tiplerinin bir özeti verilmiştir.

3.3. Entegrasyonun Elektriksel Altyapısı

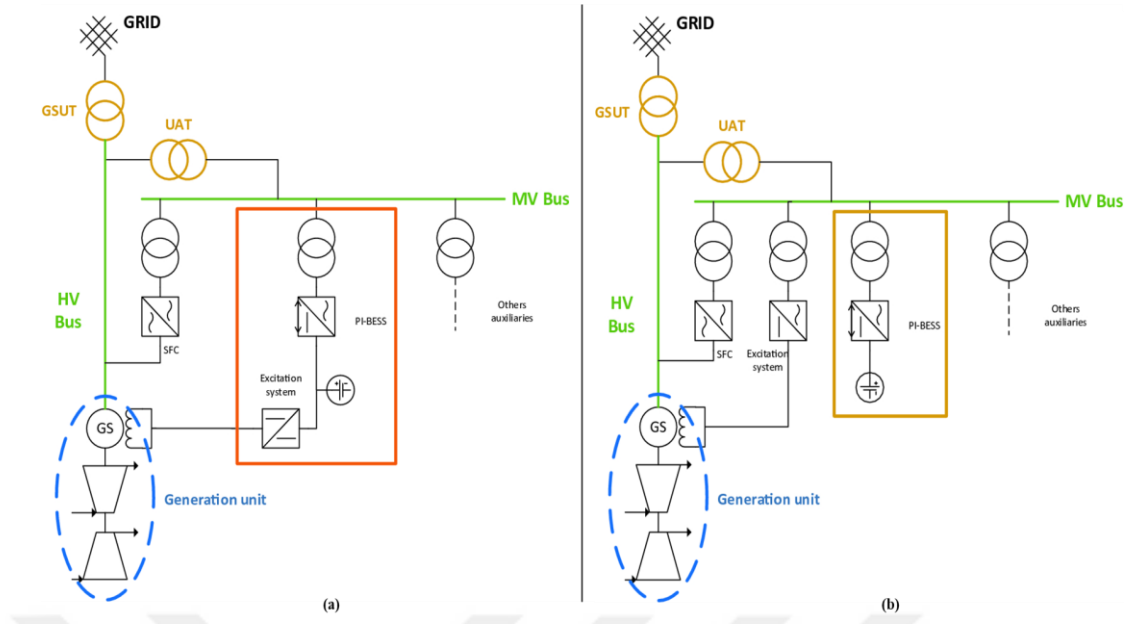
DGKÇS’de elektriğin mekaniksel bağlantılarından, yani buhar ve gaz türbinlerine bağlı jeneratörler (generation units) vasıtasıyla üretilmesinden yukarıda bahsedilmiştir. Elektriksel bağlantı tarafında jeneratör, yükseltme trafosuna (Generator Step-Up Transformer, GSUT) çok büyük akım değerleri taşıyan ve izole fazlı veri yolu (insulated phase bus) adı verilen yüksek gerilim (HV) aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlıdır. Diğer tüm yardımcılar (pompalar, motorlar, su depoları, veya invertörler) HV’ye bağlı yardımcı trafoya (Unit Auxiliary Transformer, UAT) yine yardımcı veri yolları (MV-orta gerilim-, LV-düşük gerilim- veya DC-direkt akım-bus) aracılığıyla bağlıdır [29]. Bu bağlantılar Şekil 3.3’teki gibidir.



Şekil 3.3. Kombine çevrim gaz türbini için temel tek hat şeması [29]

Bir batarya enerji depolama tesisinin santrale entegrasyonu yerleşim, bağlantı ve kontrol açısından santraldaki ekipmanlara doğrudan veya dolaylı etki sağlaması sebebiyle doğru tasarlanmalıdır. Buna ek olarak, batarya depolama sistemi bağlantı noktasına bağlı olarak farklı hizmetlerde ikame rol üstlenebilmektedir. Diğer bir deyişle, bağlantı şekli dikkate alındığında bağımsız bir batarya depolama tesisi dağıtım ve iletim şebekesine fayda sağlarken, santral entegreli batarya enerji depolama sistemleri (PI-BESSs), dağıtım ve santral çalışabilirliğine katkı sağlamaktadır. Bu, entegrasyonun yardımcı barayı destekleyerek jeneratörün çalışabilirliğini arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Bu kapsamda BEDS'in, santraldaki elektriksel akımı yönetebilmesi, aktarılan enerjiyi çalıştırabilmesi, dönüştürülebilmesi ve düzenleyebilmesi için bir takım güç elektroniklerine (MV/LV yada HV/LV trafo, batarya için ayar noktası sinyali, konvertör, kontrolör, şebeke sistemi) gereksinimlere de ihtiyaç duyar [29].

Santral entegreli batarya depolama sistemlerinin anlık ek bir reaktif ve aktif güç sağlaması amacıyla bağlantılandırılmış olması gerekmektedir. Bu bağlantılardan ilki uyarma sistemi ile invertör arasındaki stabilizasyonu sağlayan seri bağlantıdır. İkincisi ise, güç kaynağı dönüştürücü boyutu ile sınırlandırılmış, düşük voltaj geçişi (low voltage ride through) sağlayarak voltaj düzenleme döngüsü uygulayan paralel bağlantıdır. Bu bağlantı şekillerinin santral ve ekipman üzerindeki baskısı Kremer vd. [29] tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Santral entegreli batarya depolama tesislerinin elektriksel bağlantıları Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. BEDS'nin uyarma sistemi ile entegrasyonu: a) seri b) paralel [29]

4. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmanın kapsayıcı araştırma unsurlarından ilki, büyük ölçekli (10 MW'tan yüksek) yanmalı termik santrallara entegrasyonu yapılan EDS'nin akademik literatürdeki uygulamalarının kısa bir görünümünü içermektedir. Devamında ise, hızlı hareket eden bir endüstri olan EDS hakkında karar vermeyi destekleyen çok kriterli karar verme yöntemlerinin bu alandaki kullanımının akademik literatürdeki yansıması araştırılmıştır. Burada temel amaç, enerji depolamasının hem geleneksel hem de bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerine uygunluğunun araştırılmasıdır. Bu sayede, değerlendirme kriterleri ve enerji depolama teknolojileri analiz edilmiş ve bölüm sonunda DGKÇS'ye BEDS'in entegrasyonu için ilgili literatür analizlerle birlikte sunulmuştur.

Bu kapsamda, akademik literatür karar vermeyi destekleyen çok kriterli karar verme yöntemlerinin enerji depolama alanındaki kullanımına derinlemesine bir bakış açısıyla incelenmiştir. Çalışmada, kavramsal çerçeve üzerinde etkisi olabilecek referansları doğru bir şekilde tanımlamak için ScienceDirect, SCOPUS, Google Scholar ve Web of Science online veri tabanları kullanılarak "XXX ve enerji depolama", "batarya enerji depolama teknolojileri", "enerji depolama teknolojileri ve çok kriterli karar verme" terimleri taranmıştır. Bulguların karşılaştırılmasını sağlamak için sadece son 10 yılda çok kriterli karar verme algoritmaları ile enerji depolama sistemlerini kullanan çalışmalara yer verilmiştir. Bu derleme aşağıdaki değerlendirme yapısıyla sonuçlanmıştır:

Amaç ve problem tanımı: Enerji depolama teknolojilerinin uygulama kapsamına alınma amacının belirlenmesini içerir.

Çok kriterli karar verme yöntemi: Hem kriterlerin ağırlıklandırması hem de alternatiflerin sıralaması için çok kriterli karar verme yöntemlerini içerir.

Değerlendirme kriterleri: Uygulama amacı için hangi kriterlerin ve alt kriterlerin tanımlandığını içerir.

Sonuçların değerlendirilmesi: Elde edilen ağırlıkları, dereceleri ve duyarlılık analizini kapsar.

Bu ögeler ışığında yapılan literatür taraması sonucunda 28 akademik çalışma detaylı olarak incelenmiştir.

Büyük ölçekli santrallarda operasyonel esneklik artırma ile ilgili literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları özetlenmiştir. Richter vd. [68] kömür yakmalı bir termik santrala, termal enerji depolama sisteminin entegrasyonunu önermişlerdir. Bu sayede, operasyonel esnekliğin artırılmasını amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, santralda dinamik yük ve birincil frekans kontrolü yeteneği artmıştır. Ayrıca, önerilen entegrasyona göre enerji deposunun boşaltılması ile de santrala yaklaşık %4,3 ek bir net güç kazandırılmıştır. Buna ek olarak, santralin birincil frekans kontrolündeki besleme kapasitesinin yaklaşık %2,8 geliştiğini gözlemlenmiştir [68]. Aynı şekilde Sun vd. [69] ise, 300 MW kapasiteli bir kömür yakmalı termik santralda enerji depolamak için katı-oksit yakıt hücresi entegrasyonunu önermişlerdir. Bu sayede, santralin düşük yük operasyonlarında yanma stabilizasyonunu sağlamayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak, santralda minimum yük oranı %18'e düşmüştür. Hentschel vd. [70] dört farklı konvansiyonel santralin operasyonel esnekliklerini incelemişlerdir. Bu santrallar için düşük yük, devreye alma/çıkarma ve hızlı yük alma/atma kriterlerinin hem işletme maliyetlerine hem de verimliliğe etkilerini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, bu kriterlerin kömür santralları üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğunu hesaplamışlardır. Bu hesaplamalara göre, kömür santrallarının esneklikleri, operasyonel çevikliği artırmış ve net kazançta artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır [70]. Dotzauer vd. [71] ise, biyogaz tesislerinin operasyonel esnekliklerine odaklanmışlardır. Bu çalışmada esneklik, sistemi modüle edebilecek boyutlarda incelenmiştir. Yani rampalar, belirli yük limitleri için güç aralığı (bant genişliği) ve süre açısından incelenmiştir. Sonuçta, esneklik için santralin hem çalışma limitleri hem de koşulları tespit edilmiştir [71]. Bir diğer operasyonel esnekliğin incelendiği çalışma ise Salazar vd. [72] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, kombine çevrim ve kömür yakıtlı santrallar incelenmiştir. İncelemeye bu santralların çevreye olan etkilerini de dahil eden araştırmacılar sonuç olarak, kombine çevrim santrallarının kömür ile çalışan santrallardan daha çevreci ve hızlı olduğunu

göstermişlerdir. Ancak bu durumun, minimum çalışma yüklerinde, kömür santralleri lehine değiştiğini vurgulamışlardır. Bir diğer sonuç ise, minimum yüklerde kombine çevrim santrallerinin daha fazla NO_x ve CO emisyonu ürettiğini göstermişlerdir [72]. Literatürden de bilindiği kadarıyla büyük ölçekli santrallarda operasyonel esnekliğin farklı birçok parametreye bağlı olduğu ve bu esnekliği tek bir amaç için geliştirmenin faydasız olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, operasyonel esnekliğin çoğunlukla enerji depolaması ile sağlandığı diğer çalışmalara Çizelge 4.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 4.1’de sunulan kısa bir literatür özetine göre, DGKÇS’de çoğunlukla sıkıştırılmış hava enerjisi depolama (SHED) entegrasyonu ele alınmıştır. Sadece Nian vd. [73] yaptıkları çalışmalarında BEDS entegrasyonunu çalışmışlardır. Nian vd. [73], Singapur elektrik piyasasında etkili bir paya sahip olan DGKÇS’de BEDS entegrasyonunun yaşam döngüsü maliyet fayda analizini sunmayı amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda 4 farklı gaz türbini ve 3 farklı batarya depolama teknolojisini dikkate almışlardır. Çalışmalarında, elektrik üretim modellemesi yaparak gaz türbinlerinin hem batarya depolama teknolojileri ile hem de bu teknolojilerin olmadığı durumlardaki karbon emisyonlarını ve elektrik üretim maliyetlerini hesaplamışlardır. Nian vd. [73] tarafından yapılan çalışmanın, bu tez kapsamında gerçekleştirilen uygulamalardan temel farkları, dikkate alınan batarya depolama türleri üzerinedir. Ayrıca, bu entegrasyonun şebeke paydaşlarınca değerlendirilmemesi ve çatışan birçok amacın göz ardı edilmesi bu çalışmanın literatürdeki bahsedilen çalışmadan farkını ortaya koymaktadır. Son olarak, farklı işletme amaçları için batarya depolama alternatiflerinin sıralamasını elde etmeyi amaçlayan bu tez, bataryaların ölçeklenebilirliklerini de göz önünde bulundurarak hibrit bir depolama tesisi kurulumundaki karar sorununu da cevaplayabilir niteliktedir.

Çizelge 4.1. Büyük ölçekli yanmalı termik santrallerle enerji depolama entegrasyonunun literatür özeti

Kaynakça	EDS Türü	Santral Tipi	Ana Sonuçlar
[74]	SHED	DGKÇS	Mevcut duruma kıyasla entegrasyon maksimum %47 güç artışı sağlamıştır.
[75]	SHED	DGKÇS	Entegrasyon ile gidiş-dönüş verimliliğinde %10 artış görülmüştür.
[76]	SHED	DGKÇS	Aynı yakıt tüketimi ile sağlanan güç artışı %10 olarak hesaplanmıştır.
[77]	SHED	DGKÇS	Entegrasyon ile önceki çalışmaya göre [76] depolama verimliliğinde yaklaşık %10 artış görülmüştür.
[78]	SHED	Gaz türbini	Gidiş-dönüş verimlilik artışı = tasarım noktasında CAES ile karşılaştırıldığında %13
[79]	SHED	Gaz türbini	Güç rampa oranı artışı = gaz türbinine kıyasla %100
[80]	SHED	Kalina döngüsü	Entegrasyon ile mevcut durum karşılaştırıldığında gidiş-dönüş verimliliğinde %4 artış hesaplanmıştır.
[81]	SHED	CO ₂ transkritik döngüsü	Mevcut durum ile karşılaştırıldığında birim depolama hacmi başına sağlanan elektrik enerjisindeki entegrasyonun %13 artış sağlayacağı hesaplanmıştır.
[82]	Termal	Kömür yakıtlı buhar döngüsü	Entegrasyonun şebeke frekansı stabilizasyonu için yanıt süresinde %25 azalma sağlayacağı hesaplanmıştır.
[68]	Termal	Kömür yakıtlı buhar döngüsü	Mevcut duruma kıyasla entegrasyonun birincil kontrol rezervinde %2,8 artış (pozitif ve negatif) sağlayacağı hesaplanmıştır.
[83]	Termal	Kömür yakıtlı buhar döngüsü	Entegrasyon ile %13'lük minimum güç azalması hesaplanmıştır.
[84]	Termal	DGKÇS	Entegrasyonun başlatma, yük izleme ve durdurma uygulamaları için teknik fizibilitesi incelenmiştir.
[85]	Kimyasal	Kimyasal Döngü Kombine çevrim	Tüm santralin enerji verimliliğinde %56 oranında artış hesaplanmıştır.
[86]	Kimyasal	Kimyasal Döngü Kombine çevrim	Tüm santralin enerji verimliliğinde %61 oranında artış hesaplanmıştır.
[73]	Batarya	DGKÇS	Entegrasyon ile seviyelendirilmiş elektrik maliyetinde %11 oranında azalma hesaplanmıştır.
[87]	PDH	Gaz türbini	Santral için minimum seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin 91\$/MWh değerinde olacağı hesaplanmıştır.

SHED: Sıkıştırılmış Hava Enerjisi Depolama; PDH: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik; DGKÇS: Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali

Çok kriterli karar verme literatürü incelendiğinde, geleneksel ve bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin enerji alanında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, yöntemler bütününe küresel çapta enerji arz güvenliğinin sağlanması, iklim değişikliği ile mücadele ve karbon salınımlarının azaltılması gibi problemlere sürdürülebilirlik çerçevesinde ekonomik, sosyal, teknolojik ve çevresel belirsizlikler içeren ve çatışan kavramlara farklı perspektiflerden bakabilme ve disiplinler arası karar verme çözümleri sunabilme yeteneği sağlamasıdır. Literatür göstermektedir ki, bu yöntemlerin kullanıldığı birçok farklı uygulama alanı bulunmaktadır [88]. Bunlardan sağlık [89,90], ulaşım [91], lojistik [92], savuma [93], kimya [92], risk analizi [94,95], tedarik seçimi [96,97], bakım [98,99], personel çizelgeleme [100] ve diğer uygulamalar [101–105] bu alanlardan bazılarıdır. Sonuç olarak, ülkelerin farklı alanlardaki geliştirme hedeflerini içeren stratejik kalkınma planlarındaki kararlarda fikir birliği sağlanmış, gerçek hayatla tutarlı ve analitik olan çok yönlü bakış açısı bu çalışmalarda sunulmuştur [106]. Bu doğrultuda, enerji arz güvenliğine doğrudan etkisi olan enerji depolama teknolojilerinin değerlendirilmesi de gelecekteki görünümüne dair birçok beklentilerin vurgulandığı ve yüksek belirsizlik altında birbiriyle çatışan kriterlerin bulunduğu kritik bir karar sorunudur. Buradan hareketle literatürde, farklı enerji depolama teknolojilerini ekonomik, sosyal, teknolojik ve çevresel etkiler altında çok kriterli karar verme ile inceleyen çalışmalar bulunmaktadır (Çizelge 4.2). Bu çalışmaların uygulama amaçları çoğunlukla sürdürülebilirlik çerçevesi içerisinde EDS'nin seçimi [107–111] yada EDS'nin değerlendirilmesi [12,112–118] üzerinedir. Örneğin Aktaş ve Kabak [107], hibrit enerji sistemlerinde enerji depolama birimi seçmek amacıyla enerji sistemi yatırımcılarının kararlarını desteklemek ve bilimsel bir yaklaşım geliştirmek için kriter değerlendirmesi yapmışlardır. Karar vericilerin EDS'yi değerlendirme süreci 4 ana kriter altında 11 alt kriter göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada, uzmanların dilsel değerlendirmelerini iyileştirmek için Kararsız Bulanık Dilsel Terim Kümesi (Hesitant Fuzzy Linguistic Terms Set, HFLTS) yöntemini önermişlerdir. Çolak ve Kaya [12] çalışmalarında, Türkiye'de EDS'yi bulanık ortamda değerlendirmek için nicel ve nitel kriterler dikkate almışlardır. Bu kriterler, 4 ana kritere bağlı 19 alt kriteri içermektedir. Kriterlerin değerlendirilmesinde Kararsız Bulanık AHP (Hesitant Fuzzy AHP, HFAHP) yöntemi kullanmışlardır. 9 farklı enerji depolama alternatifini Kararsız Bulanık VIKOR (Hesitant Fuzzy VIKOR, HF-VIKOR) yöntemi ile sıralamışlardır.

Bir diğ er EDS değerlendirmesi ise Xu [112] tarafından yapılmıştır. Xu [112],  alışmasında EDS değerlendirme kriterlerini Bulanık Delphi ile oluşturduktan sonra 4 ana kritere bağlı 22 alt kriteri Bulanık Best-Worst metodu (FBWM) ile ağırlıklandırmıştır. Bu kriterlerin sıralaması için ise, Bulanık Best-Worst Projection (FBWP) yöntemi kullanmıştır. Özetle, EDS değerlendirilmesinin yıllar içinde farklı alt kriterler eklenerek değerlendirilmesi sıklıkla kullanılmıştır [113–118]. Bu akademik çalışmaların ortak noktaları ise, EDS değerlendirmesinin nicel ve nitel kriterler içermesini dikkate alan ve belirsizlik ortamındaki karar vermeyi kolaylaştıran bulanık uzantılı yöntemlerin sıklıkla kullanılmasıdır.

Bu yöntemler ayrıca, bir diğ er önemli karar problemi olan şebeke hizmetlerinde EDS'nin değerlendirilmesi probleminde kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde bu konuyu ele alan birçok akademik çalışma bulunmaktadır [11,119–122]. Örneğin, Baumann vd. [11] yaptıkları çalışmalarında, dört farklı şebeke hizmeti için paydaş katılımı sağlayarak kriter tanımlaması yapmışlardır. Kriterlerin ağırlıklandırılması ve şebeke paydaşlarının fikir birliği sağlaması için sırasıyla AHP ve Shannon's Entropy yöntemini kullanmışlardır. Elektrokimyasal depolama alternatiflerini ise, teknolojilere ait en iyi, en kötü ve ortalama değerleri kullanarak TOPSIS yöntemi ile sıralamışlardır. Son olarak, Monte Carlo simülasyonu ile alternatiflerin dört farklı şebeke hizmeti için performans sıralamasını elde etmişlerdir. Bir diğ er EDS'nin şebeke hizmetlerinde değerlendirilmesini dikkate alan akademik çalışma ise Van de Kaa [120] tarafından yapılmıştır. Van de Kaa [120]  alışmasında, BEDS'nin konut piyasalarındaki pazar performanslarını incelemiştir. Bunun için anket yolu ile elde ettiği verilerden yararlanmıştır. Kriterleri Best-Worst yöntemi ile ağırlıklandırmıştır. Performans matrisi ile kriter ağırlıklarının çarpımı sonucunda alternatiflerin sıralamasını elde etmiştir. Bir diğ er konut uygulaması için yapılan akademik çalışma ise Acar vd. [123] tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu  alışmanın Van de Kaa [120] tarafından yapılan çalışmadan iki temel farkı vardır. Bunlardan ilki değerlendirdikleri EDS'dir. Van de Kaa [120]  alışmasında, BEDS'yi alternatif olarak alırken Acar vd. [123], BEDS'yi çalışma prensiplerine göre sınıflandırarak değerlendirmişlerdir. Dikkate alınan kriterler farklı olsa da ikinci temel fark kullanılan yöntemler üzerinedir. Acar vd. [123], değerlendirme kriterlerini bulanık kümelerin üç boyutlu uzantısı olan

Kararsız Bulanık AHP ile ağırlıklandırmışlardır. EDS ise Kararsız Bulanık TOPSIS (HFTOPSIS) ile sıralanmıştır.

Literatürde sıklıkla tartışılan bir diğer konu ise, YEK'in aralıklı çalışma rejimlerine çözüm sunabilen EDS'nin incelenmesidir. Son yıllarda yenilenebilir penetrasyonu olarak da ifade edilen bu uygulamalarda, enerji sistemlerindeki kaynaklara farklı şebeke hizmetleri sunabilme yeteneği sağlayan EDS entegrasyonu araştırılmaktadır [124–129]. Zhao vd. [126], rüzgar ve fotovoltaikler ile BEDS entegrasyonunu 3 ana kritere (ekonomik, sosyal, teknolojik) bağlı 23 alt kriter ile değerlendirmişlerdir. Alt kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için Entropi ve Best-Worst yöntemlerini kullanmışlardır. En uygun BEDS alternatifini ise VIKOR ile bulmuşlardır. Bir diğer çalışma ise Barin vd. [129] tarafından yapılmıştır. Barin vd. [129] çalışmalarında, EDS'yi değerlendirmek için verimlilik, yük yönetimi, teknik olgunluk, maliyet, çevresel etki ve güç kalitesi ana kriterlerini kullanmışlardır. EDS'nin tatmin edici sıralama sonuçlarına ulaşmak için farklı senaryolar oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, volan ve lityum iyon batarya alternatifleri en yüksek öneme sahip güç kalitesi kriteri için en uygun alternatif olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Enerji depolama sistemleri ile ilgili literatür özeti

Kaynakça	Uygulama Amacı	Yöntemler*	
		Kriter Ağırlıklandırma	Alternatif Sıralama
[107]	Hibrit şebeke için EDS seçimi	HFLTS	-
[12]	EDS değerlendirmesi	Kararsız Bulanık AHP	Kararsız Bulanık VIKOR
[112]	EDS değerlendirmesi	Bulanık Delphi + FBWM	Bulanık BWP
[119]	Yan hizmetler için EDS seçimi	Bulanık AHP	GRA
[108]	YEK entegrasyonu için BEDS seçimi	Bulanık Delphi +BWM	Bulanık Delphi
[11]	Yan hizmetler için BEDS seçimi	AHP + Shannon's Entropy	TOPSIS + Monte Carlo Simülasyonu
[113]	EDS değerlendirmesi	IFAWA	IFN2-MULTIMOORA
[123]	Konut uygulamaları için EDS değerlendirmesi	Kararsız Bulanık AHP	HFTOPSIS
[120]	Konut uygulamaları için BEDS değerlendirmesi	BWM	Ağırlık Vektörü
[124]	Elektrifikasyon için hibrit şebeke planlaması	-	HOMER Simülasyonu
[114]	EDS değerlendirmesi	AHP + NLFP	IMADA
[125]	EDS yatırımı için proje değerlendirmesi	MAVT	Direct Rating
[115]	EDS değerlendirmesi	IIFAHP	IF & CODAS
[126]	Fotovoltaik ve rüzgâr türbini için EDS değerlendirmesi	Entropy + BWM	VIKOR
[116]	EDS değerlendirmesi	WSM	WSM
[121]	Yan hizmetler için EDS değerlendirmesi	AHP	WSM
[109]	EDS seçimi	Type-2 FAHP	Type-2 FTOPSIS
[127]	YEK entegrasyonu için EDS değerlendirmesi	WSM	WSM
[128]	YEK entegrasyonu için EDS değerlendirmesi	Kendi metodolojileri	Kendi metodolojileri
[110]	EDS seçimi	AHP	AHP
[111]	EDS seçimi	Bulanık AHP	Bulanık GRA
[122]	Yan hizmetler için EDS değerlendirmesi	AHP + Fuzzy Delphi	Bulanık Tutarlı Matris
[129]	YEK entegrasyonu için EDS değerlendirmesi	FAHP	AHP
[117]	EDS değerlendirmesi	FTOPSIS	Bulanık TOPSIS
[130]	Sürdürülebilirlik için BEDS değerlendirmesi	Bayesian BWM	Bulanık TOPSIS
[131]	Mikro-şebeke için enerji kaynaklarının planlanması	AHP	AHP
[132]	EDS seçimi	AHP	PROMETHEE-GAIA
[118]	EDS değerlendirmesi	AHP	GP

*Yöntemlerin tam adı kısaltmalar listesinde sunulmuştur.

Çok kriterli karar verme literatürü enerji depolama sistemleri çatısı altında incelendiğinde sıklıkla kullanılan kriterler ve alternatifler her bir çalışma bazında Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Çizelge 4.3'teki kriterler ve alternatifler analiz edildiğinde literatürde son 10 yılda yapılan akademik çalışmalardaki özet bilgiler aşağıdaki gibidir:

Alternatiflerin belirlenmesi: Literatürde en çok incelenen elektrokimyasal enerji depolama türleri; lityum-iyon, kurşun-asit, sodyum-sülfür, vanadyum redoks akış ve sodyum nikel klorür batarya depolama sistemleridir (Şekil 4.1'deki yeşil boyalı yatay sütunlar).

Kriterlerin belirlenmesi: Literatürde en çok kullanılan kriterler 4 ana sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma ekonomik, çevresel, teknolojik ve sosyal kriterleri kapsamaktadır (Şekil 4.2).

- Ekonomik ve teknolojik kriterler aynı oranda kullanılmış fakat sosyal kriterler ise çevresel kriterlere nazaran %3 daha az kullanılmıştır.
- Ekonomik kriterlerde en çok işletme ve bakım maliyetleri (O&M) %14,21 oranında, ilk yatırım maliyeti (capital cost) %10,15 oranında kullanılmıştır.
- Teknolojik kriterlerde en çok, verimlilik (efficiency/round trip efficiency) %21,19 oranında, enerji yoğunluğu (energy density) %14,13 oranında, kullanım süresi (lifetime/calenderic time) %13,12 oranında kullanılmıştır.
- Ayrıca literatürdeki her çalışmada muhakkak teknolojik değerlendirme uygulama amacına yönelik olarak ekonomik kriterler dahil edilerek birçok kez ele alınmıştır.

Yöntem: Kriter ağırlıklandırma ve alternatif önceliklendirmede bulanık temelli çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Bunun sebebi, genel bir özet olarak karar vericilerin uygulama amacı ve alternatifler hakkında tereddütlü bilgilerinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Duyarlılık analizi: Çizelge 4.2'de incelenen çalışmaların 16'sında diğer bir deyişle %57'sinde duyarlılık analizi yapılmamıştır. Bu çalışmaların 12'sinde (%43) aynı

alternatif ve kriterler farklı çok kriterli karar verme yöntemleri ile kıyaslama yapılarak veya kriter ağırlıklarını değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 4.3).



Çizelge 4.3. Enerji depolama sistemlerinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[107]	Belirtilmemiş	Sosyal kabul	- İlk yatırım maliyeti - İşletme ve bakım maliyeti - Enerji maliyeti	- Verimlilik - Enerji yoğunluğu - Kullanım süresi - Güvenilirlik - Depolama kapasitesi - Teknolojik olgunluk	Çevresel etki	×
[12]	- Pompaj depolamalı hidroelektrik - Sıkıştırılmış hava - Volan - Süperkapasitörler - Süper iletken manyetik enerji depolama - Hidrojen - Lityum-iyon - Sodyum-sülfür - Vanadyum redoks akış	- Sosyal kabul - Politik kabul - İstihdam - Devlet teşviki - Sağlık ve güvenlik	- Yatırım maliyeti - İşletme ve bakım maliyeti - Kullanım süresi	- Enerji verimliliği - Enerji yoğunluğu - Teknolojik olgunluk - Depolama kapasitesi - Güvenilirlik - Risk	- CO₂ yoğunluğu - Hava ve su kirliliği - Ekolojik etki - Kaynak tüketimi - Arazi bozunumu	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[130]	- Lityum-iyon - Kurşun-asit - Sodyum-sülfür - Nikel-metal hidrit	- Sosyal kabul - Elektrik güç sistemi rezerv kapasitesinin azaltılması	- Sermaye yoğunluğu - İşletme maliyeti	- Çevrim süresi - Enerji verimliliği - Kendi kendine deşarj oranı	CO₂ yoğunluğu	×
[112]	Belirtilmemiş	- Sosyal kabul - İstihdam - Toplum sağlığına etkisi - Politika uygulanabilirliği - Standartlar	- İlk yatırım maliyeti - İşletme ve bakım maliyeti - Hammadde maliyeti - Üretim maliyeti - Ekonomiye katkı	- Enerji verimliliği - Ekserji verimi - Olgunluk - Kullanım süresi - Ölçeklenebilirlik - Kaynak güvenilirliği	- Abiyotik tükenme - İnsan toksisitesi - Ozon tükenmesi - Küresel ısınma - Arazi kullanımı - Atık üretimi	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[119]	• Volan • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Süperkapasitör • Lityum-iyon • Sodyum-sülfür • Vanadyum redoks akış	×	• Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti	• Otonom • Güç yoğunluğu • Enerji yoğunluğu • Kullanım ve kurulum kolaylığı • Gelecekteki genişleme ve gelişmeler için esneklik	×	×
[108]	• Kurşun-asit • Lityum-iyon • Sodyum-sülfür • Nikel-metal hidrit • Vanadyum redoks akış	• Elektrik şebekesi yapımının gecikmesi • Sistem rezerv kapasitesinin azaltılması	• Sermaye yoğunluğu • İşletme maliyeti • Enerji depolama sistemi karı • Rüzgâr santrallerinin elektrik şebekesinde birleştirilmesinin gelirini artırmak	• Enerji verimliliği • Enerji yoğunluğu • Spesifik enerji • Spesifik güç • Kendi kendine deşarj oranı • Çevrim ömrü • Enerji yoğunluğu • Güvenlik	• CO₂ yoğunluğu	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[11]	- Lityum-iyon batarya çeşitleri - Valf ayarlı kurşun asit batarya - Sodyum-nikel klorür - Vanadyum redoks akış	- Sosyo-ekonomik değer - Sosyal kabul - Mevzuatlar	- Yatırım maliyeti - Yaşam döngüsü maliyeti	- Olgunluk - Enerji yoğunluğu - Ekonomik ömrü - Çevrim ömrü - Güç yoğunluğu - Verimlilik - Teknolojik esneklik	- Ekosisteme verilen zarar - İnsan sağlığına verilen zarar - Kaynak bulunabilirliğine verilen zarar	✓
[131]	Bataryalar	- Gürültü - Paydaş tercihi - Estetik/yükseklik	- İlk yatırım maliyeti - Enerji maliyeti - İşletme ve bakım maliyeti - Tahmini iç getiri oranı	- Şirket içi veya yerel teknik beceri gereksinimi - Kendi kendine sürdürülebilirlik veya ada özelliği - Yakıtın mevcudiyeti - Üretim kapasitesi - Verimlilik - Her yıl operasyonel çalışma günleri - Tahmini enerji üretimi - Zorunlu kesinti oranı/güvenilirliği - Kapasite kullanım faktörü	- Ayak izi - Yaşam süresi - Modülerlik - Kurulum süresi - Yıllık performans düşüşü	×

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[113]	• Hidrojen • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Sıkıştırılmış hava • Volan • Süper iletken manyetik enerji • Süperkapasitör • Kurşun-asit • Nikel-kadmiyum • Lityum-iyon • Sodyum-sülfür • Sodyum-nikel klorür • Vanadyum redoks akış • Çinko-batarya • Eritilmiş tuz • Pompaj depolamalı hidroelektrik	×	• Güç maliyeti • Enerji maliyeti	• Güç oranı • Enerji oranı • Tepki süresi • Enerji yoğunluğu • Kendi kendine deşarj süresi • Gidiş-dönüş verimliliği • Kullanım süresi • Çevrim ömrü	• Çevresel etki	✓
[123]	• Konvansiyonel batarya • Yüksek sıcaklıklı batarya • Akış bataryalar • Hidrojen	• Güvenlik • Erişilebilirlik • Kullanım kolaylığı • Sosyal kabul	• Güç maliyeti • Enerji maliyeti	• Verimlilik • Depolama kapasitesi • Çevrimsel limit • Performans düşüşü	• Kirletici emisyonlar • Alan gereksinimi • Su deşarj kalitesi • Katı atık üretimi	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[120]	• Lityum-iyon • Sodyum tabanlı batarya • Akış batarya • Nikel tabanlı batarya • Kurşun tabanlı batarya	• Finansal güç • Marka itibarı • Operasyonel üstünlük • Öğrenme oryantasyonu	• Teknolojik • Üstünlük • Uygunluk • Tamamlayıcı mallar • Esneklik	• Fiyatlandırma stratejisi • Pazarlama zamanlaması • İletişim • Taahhüt • Dağıtım stratejisi	• Mevcut kurulu temel • Büyük balık • Tedarikçiler • Şebeke paydaşları	×
[124]	• Kurşun-asit • Lityum-iyon • Akış bataryalar	×	• Sermaye maliyeti • Değiştirme maliyeti • İşletme ve bakım maliyeti	• Birim hücre gerilimi • Güç yoğunluğu • Enerji yoğunluğu • Yaşam döngüsü • Ekonomik ömür • Boşaltma derinliği • Gidiş-dönüş verimliliği	• Çevresel etkiler	×

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[114]	• Pompaj depolamalı hidroelektrik • Sıkıştırılmış hava • Kurşun-asit • Lityum-iyon • Volan	×	• Sermaye maliyeti • İşletme maliyeti	• Olgunluk • Yaşam döngüsü • Enerji verimliliği • Malzeme yoğunluğu • Enerji yoğunluğu	• CO₂ yoğunluğu • Çevresel etki	✓
[125]	• Sıvı hava • BEDS + FV • Termal enerji depolama • BEDS + Dalga enerjisi • Gazdan güç dönüşümü • Sanal batarya sistemi	×	• Ekonomik eş-fayda • Ekonomik büyüme • Ekonomik canlılık	• Şebeke güncellemelerinin gecikmesi • Kendine tüketimin arttırılması • Yaşam döngüsü • Teknolojik canlılık	• Ekonomik eş-fayda	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[115]	- Pompaj depolamalı hidroelektrik - Sıkıştırılmış hava - Lityum-iyon - Volan	Sosyal kabul	- Sermaye maliyeti - İşletme maliyeti	- Olgunluk - Yaşam döngüsü - Enerji verimliliği - Enerji yoğunluğu	- CO₂ yoğunluğu - Çevresel etki	✓
[126]	- Kurşun-asit - Lityum-iyon - Sodyum-sülfür - Nikel-metal hidrit - Vanadyum-redoks akış	- Şebeke inşasının gecikmesi - Sistem rezerv kapasitesinin azaltılması - Şebeke güç kaybının azaltılması - Enerji tasarrufu ve emisyon azaltma etkinliği	- Yatırım maliyeti - Batarya kapasite maliyeti - Batarya güç maliyeti - İşletme ve bakım maliyeti - Maliyet kurtarma süresi - Enerji depolama sistemi karı - Rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısıyla gelirin artırılması - Terminal iyileşmesinin avantajı	- Hücre gerilimi - Depolama kapasitesi - Şarj-deşarj frekansı - Deşarj süresi - Normal sıcaklık döngüsü ömrü - Maksimum şarj vedeşarj verimliliği - Spesifik kapasite - Spesifik güç - Kendi kendinedeşarj oranı - Spesifik enerji - Güvenlik	×	×

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[116]	- Gazdan güç dönüşümü - Pompaj depolamalı hidroelektrik - Sıkıştırılmış hava	Sosyal kabul	- Sermaye maliyeti - İşletme ve yönetim maliyetleri	- Verimlilik - Depolama kapasitesi - Deşarj süresi - Konum esnekliği - Enerji kariyer vektörleri	- CO₂ emisyon (üretim süresi) - Genel çevresel etkiler	✓
[121]	5 farklı Gazdan güç dönüşümü - Volan - Kurşun-asit - Lityum-iyon - Pompaj depolamalı hidroelektrik - Sıkıştırılmış hava - Geliştirilmiş sıkıştırılmış hava - Çinko-brom - Demir-krom - Çinko-hava	Tüketici kabul edilebilirliği	- Enerji depolama maliyeti - Toplam üretim kapasitesi maliyeti	- Teknolojik depolama yolları - Olgunluk - Kapasite - Güç - Depolama süresi aralığı - Mevsimlik depolama özelliği - Verimlilik - Toplam çevrim - Taşınabilirlik - Enerji yoğunluğu - Potansiyel mobilite yakıtı	×	×

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[132]	• BEDS • Volan • Sıkıştırılmış hava • Süperkapasitör • Süper iletken manyetik enerji depolama • Pompaj depolamalı hidroelektrik	×	• Maliyet	• Teknik olgunluk • Verimlilik • Tepki süresi	• Çevresel etki	✓
[109]	• Sıkıştırılmış hava • Pompaj depolamalı hidroelektrik • BEDS • Volan • Kapasitör • Süper iletken manyetik enerji depolama	• Sosyal kabul • Siyasi kabul	• Sermaye maliyeti • Depolama maliyeti • İşletme ve bakım maliyeti • Enerji maliyeti	• Depolama kapasitesi • Yoğunluk • Verimlilik	• Yeşil arazi etkileri • Ekolojik etkiler • Toksik etkiler • İnsan sağlığı etkileri	✓

Çizelge 4.3. (devam)

Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[127]	• Kurşun-asit • Lityum-polimer • Yakıt hücresi (PEM)-H₂	×	• Maliyet	• Güvenilirlik • Yaşam döngüsü • Yük tepki özelliği • Üretimde modülerlik • Verimlilik çeşitleri • Risk faktörleri • Enerji yoğunluğu	• Çevresel etkiler	×
[128]	• Lityum-iyon • Sodyum-sülfür • Geliştirilmiş kurşun-asit	×	• Sermaye ve batarya yönetimi • Sistem maliyeti • Bakım maliyeti	• Enerjiyi güce çevirme oranı • Enerji yoğunluğu • Enerjik verimliliği • Yaşam döngüsü • Ekonomik ömür • Ticari olgunluk • Güvenlik	×	×

Çizelge 4.3. (devam)

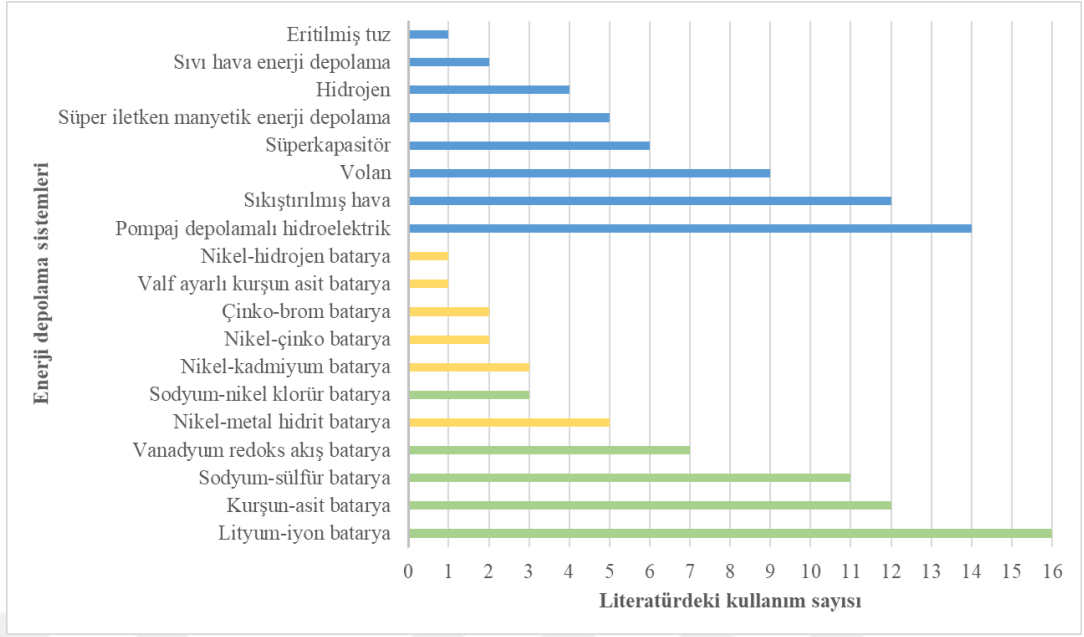
Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[110]	• Kurşun-asit • Lityum-iyon • Süperkapasitör • Nikel-kadmiyum • Nikel-metal hidrit • Nikel-çinko • Nikel-hidrojen	×	• Boyutlandırma • Maliyet	• Verimlilik • Yaşam döngüsü • Kendi kendine deşarj oranı	• Çevresel etkiler	×
[111]	• Tank • Metal-hidrit • Kimyasal	×	• Toplam sistem maliyeti	• Ağırlık • Kapasite • Depolama kaybı ve sızıntı • Güvenilirlik	×	×

Çizelge 4.3. (devam)

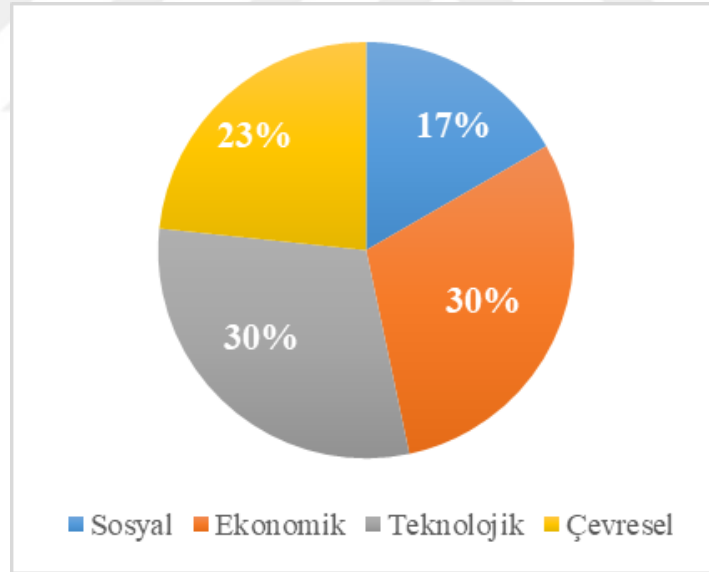
Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[122]	• Sodyum-sülfür • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Sıkıştırılmış hava	• Sağlık ve güvenlik	• Sermaye maliyeti • İşletme ve bakım maliyeti • Tekrarlayan maliyetler	• Verimlilik • Olgunluk • Kapasite • Dayanıklılık • Otonomluk • Yaşam döngüsü	• Hava kirliliği • Su kirliliği • Yaban hayata etkiler	×
[129]	• Sıkıştırılmış hava • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Volan • Hidrojen • Süperkapasitör	×	• kW başına maliyet	• Yük yönetimi • Teknolojik olgunluk • Güç kalitesi • Verimlilik	×	×

Çizelge 4.3. (devam)

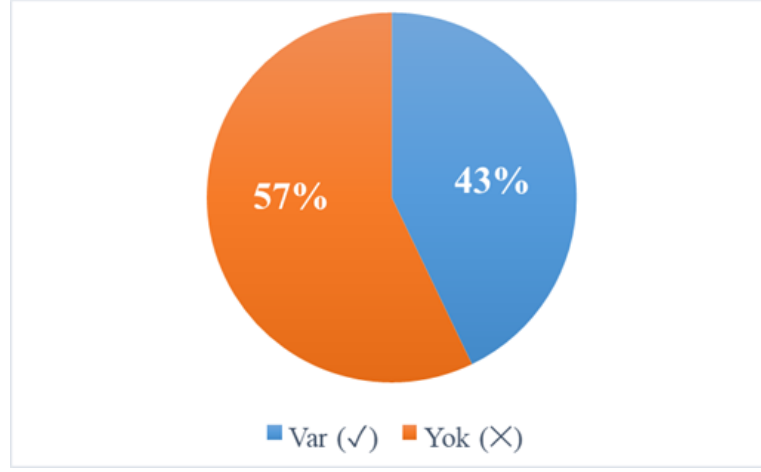
Kaynak	EDS	Kriterler				Duyarlılık Analizi
		Sosyal	Ekonomik	Teknolojik	Çevresel	
[117]	• Sıkıştırılmış hava • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Bataryalar • Süper iletken manyetik enerji depolama	×	• Toplam sermaye maliyeti	• Verimlilik • Maksimum enerji • Maksimum güç • Modülerlik • Şarj süresi • Kurulum kolaylığı • Sağlama süresi	• Çevresel etkiler	×
[118]	• Artımlı, küçük ve mikro hidroelektrik • Pompaj depolamalı hidroelektrik • Sıvı bataryalar • Sodyum-sülfür • Akış hücreler	• Çarpan efektleri • Algılanan kabul edilebilirlik	• Yatırım maliyeti • İşletme maliyeti	• Depolama kapasitesi • Çalışma ömrü • Çalışma verimliliği	• Ekolojik etki • Emisyonlar ve kirleticiler • Çevresel etkiler	×



Şekil 4.1. Literatürde dikkate alınan enerji depolama sistemleri



Şekil 4.2. Literatürde dikkate alınan ana kriter oranları



Şekil 4.3. İncelenen akademik çalışmalardaki duyarlılık analizi oranı

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Çok Kriterli Karar Verme

5.1.1. COPRAS

Diğer çok kriterli karar verme yöntemlerinde olduğu gibi, alternatifleri ilgili kriterlerin ağırlıklarına göre önceliklendirmek için kullanılır. İlk olarak Zavadskas [133] tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem, en iyi karar alternatifini seçmek için ideal ve en kötü ideal çözümleri kullanır. Alternatiflerin önemi ve fayda derecesi, aşamalı bir değerlendirme prosedürü kullanılarak hesaplanır. COPRAS yönteminin algoritma adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1. Karar matrisi Eşitlik 5.1 kullanılarak normalleştirilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5.1)$$

Adım 2. Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanır. x_{ij}^* için her bir i , normalleştirilmiş performans değerini temsil eder. j , alternatifler üzerindeki ilişki ağırlığı olan w_j 'dir.

$$D' = [d_{ij}]_{m \times n} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (5.2)$$

Adım 3. Faydalı ve faydalı olmayan kriterler için S_i^+ ve S_i^- değerlerinin toplamaları hesaplanır. Faydalı kriterler için yüksek bir değer, faydalı olmayan kriterler için ise düşük değerler daha iyidir. S_i^+ ve S_i^- toplamaları Eşitlik 5.3 ve Eşitlik 5.4 kullanılarak hesaplanır.

$$S_{i+} = \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad (5.3)$$

$$S_{i-} = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad (5.4)$$

Adım 4. Alternatiflerin görelî önemi Q_i veya önceliği Eşitlik 5.5 kullanılarak hesaplanır. Bu değeri, alternatiflerin memnuniyet düzeyini ifade etmektedir. Bu nedenle, en yüksek değeri alternatif en iyi seçimdir.

$$Q_i = S_{i+} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{i-}}{S_{i-} - \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{i-}}} \quad (5.5)$$

Adım 5. Her alternatifin performans endeksi (P_i), alternatiflerin tam bir sıralamasını elde etmek için Eşitlik 5.6 kullanılarak hesaplanır. Q_{max} , alternatifler arasındaki maksimum görelî önem değeri ifade eder.

$$P_i = \left[\frac{Q_i}{Q_{max}} \right] \times 100\% \quad (5.6)$$

5.2. Bulanık Çok Kriterli Karar Verme

5.2.1. Bulanık Kümeler

Karar verme sürecindeki yüksek belirsizlik ve karmaşıklık, problemlerin çözümünde ortaya çıkan zorlukların başlıca nedenleridir. Bu zorlukları minimize etmek amacıyla bulanık küme teorisi, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh [19] tarafından literatüre kazandırılmıştır. Teori, karar verme sürecindeki nitel ve nicel yargıların dilsel olarak ifade edilmesini ve modellenmesini mümkün kılmaktadır. Ana amacı, belirsiz verileri matematiksel operatörlerle temsil edebilme ve programlamaya izin vermektir. Bulanık küme teorisinde değışken üyelik derecesi her bir nesnenin 0 ile 1 arasında karakterize edilmesi ile ifade edilir. Bu dereceler özel elemanların kararlılık düzeylerini gösterir. Bulanık kümeler matematiksel olarak ifade edildiğinde bir X kümesinin gösterimi aşağıdaki gibidir (Eşitlik 5.7):

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n \ (x_i \in X) \quad (5.7)$$

5.2.2. Bulanık COPRAS

COPRAS, Zavadskas vd. [133] tarafından sunulan analitik ve kantitatif alternatif seçim süreci için geliştirilen çok kriterli karar verme tekniğidir. Alternatifleri önemlerine ve fayda derecelerine göre değerlendirmeye yardımcı olur. Karar alma sürecindeki belirsizlik ve karmaşıklığın üstesinden gelebilmek için bulanık kümeler ile entegrasyonu mümkündür. Bu doğrultuda, yöntemde bulanık sayılardan oluşan performans değerleri kullanılabilir. Yöntem, üçgensel ve yamuksal bulanık sayılar ile oluşturulan dil ölçeklerini kullanabilir. Bu tez çalışmasında Bulanık COPRAS (BCOPRAS) yönteminde üçgensel bulanık sayılardan oluşan dil ölçeği (Çizelge 5.1) dikkate alınmış ve yöntem adımlarına dahil edilmiştir. Bu yönteme ait izlenen adımlar aşağıdaki gibidir [134]:

Adım 1. Bulanık karar matrisi ($\tilde{X}$), Çizelge 5.1'deki üçgensel bulanık sayılar ile oluşturulur. m adet alternatif ve n adet kriterden oluşan bir karar probleminde $\tilde{x}_{ij}$, i . alternatifin, j . kritere kıyasla değerlendirildiğinde elde edilen bulanık performans değeridir. $\tilde{x}_{ij}$ üçgensel bulanık sayılar $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}^l, x_{ij}^m, x_{ij}^u)$ şeklinde gösterilir. Bulanık üçgensel sayılardan oluşan karar matrisi Eşitlik 5.8'deki gibidir.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} (x_{11}^l, x_{11}^m, x_{11}^u) & (x_{12}^l, x_{12}^m, x_{12}^u) & \dots & (x_{1n}^l, x_{1n}^m, x_{1n}^u) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (x_{m1}^l, x_{m1}^m, x_{m1}^u) & (x_{m2}^l, x_{m2}^m, x_{m2}^u) & \dots & (x_{mn}^l, x_{mn}^m, x_{mn}^u) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Çizelge 5.1. Üçgensel bulanık sayılardan oluşan dil ölçeği [134]

Dilsel Terimler	Üçgensel Bulanık Sayılar		
	l	m	u
Çok kötü	0	0	1
Kötü	0	1	3
Biraz kötü	1	3	5
Ortalama	3	5	7
Biraz iyi	5	7	9
İyi	7	9	10
Çok iyi	9	10	10

Adım 2. Karşılaştırılabilir kabiliyetini artırmak için bulanık karar matrisinin normalizasyonu gerçekleştirilir. Bu yöntemi kullanarak, hesaplama süreci daha verimli hale gelir ve numaralandırmanın doğruluğu iyileştirilir. Her i, j için $\tilde{s}_{ij} = (s_{ij}^l, s_{ij}^m, s_{ij}^u)$ Eşitlik 5.9 – Eşitlik 5.11 ile hesaplanır.

$$s_{ij}^l = x_{ij}^l / \sqrt{\sum_{m=1}^i [(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^u)^2]} \quad (5.9)$$

$$s_{ij}^m = x_{ij}^m / \sqrt{\sum_{m=1}^i [(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^u)^2]} \quad (5.10)$$

$$s_{ij}^u = x_{ij}^u / \sqrt{\sum_{m=1}^i [(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^u)^2]} \quad (5.11)$$

Adım 3. Ağırlıklandırma yöntemleriyle elde edilen önem ağırlıkları (w_j), normalize karar matrisini oluşturan normalize performans değerleri ($\tilde{s}_{ij}$) ile çarpılarak ağırlıklı normalize performans değerlerine ($\hat{x}_{ij}$) dönüştürülür (Eşitlik 5.12). Ağırlıklı normalize karar matrisi ($\hat{X}$) Eşitlik 5.13 ile elde edilir.

$$\hat{x}_{ij} = \tilde{s}_{ij} \cdot w_j \quad (5.12)$$

$$\hat{X} = [\hat{x}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \dots & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \dots & \hat{x}_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Adım 4. Her bir alternatif için maksimum değerinin tercih edildiği kriterler (faydalı) ve her bir alternatif için minimum değerinin tercih edildiği kriterlerin (maliyet/faydasız) değerlerini baz alan toplamalar sırasıyla Eşitlik 5.14 ve Eşitlik 5.15 ile hesaplanır.

$$\tilde{P}_j = \sum_{i=1}^m \tilde{x}_{ij} \quad (5.14)$$

$$\tilde{R}_j = \sum_{i=k+1}^m \tilde{x}_{ij} \quad (5.15)$$

Adım 5. Her bir alternatif için göreceli önem değerleri ($\tilde{Q}_j$) Eşitlik 5.16 ile hesaplanır. Eşitlik 5.16’da yer alan $\tilde{R}_{min}$ ifadesi $\tilde{R}_j$ değerlerinin en küçük olanını ifade etmektedir.

$$\tilde{Q}_j = \tilde{P}_j + \frac{\tilde{R}_{min} \sum_{j=1}^n \tilde{R}_j}{\tilde{R}_j \sum_{j=1}^n \frac{\tilde{R}_{min}}{\tilde{R}_i}}; j = 1, 2, \dots, n \quad (5.16)$$

Adım 6. Bulanık karar matrisindeki bulanık sayılar, kesin (crisp) sayılara dönüştürülür. Bu işlem bulanık karar matrisinin durulaştırılmasıdır. Bu dönüştürme, basitliği ve işlemsel kolaylığı açısından en iyi bulanık olmayan performans metodu (Best Nonfuzzy Performance, BNP) ile gerçekleştirilir. BNP yöntemi ile dönüştürme Eşitlik 5.17 ile hesaplanır.

$$x_{ij} = \frac{(x_{ij}^u - x_{ij}^l) + (x_{ij}^m - x_{ij}^l)}{3} + x_{ij}^l \quad (5.17)$$

Adım 7. Her bir alternatifin performans indeks değeri (N_j) Eşitlik 5.18 ile hesaplanır. Eşitlik 5.18’deki Q_{max} değeri alternatifler arasındaki en büyük ağırlığa sahip değeri ifade etmektedir.

$$N_j = \frac{Q_j}{Q_{max}} \times 100\%; j = 1, 2, \dots, n \quad (5.18)$$

Adım 8. Algoritma adımlarından nihai olarak elde edilen N_j değerleri büyükten küçüğe sıralandığında alternatiflerin tercih sıralaması elde edilmiş olur.

5.2.3. Bulanık TOPSIS

Dilsel belirsizliklerin ve grup kararlarının olduğu problemlerde Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) yöntemi oldukça kullanışlıdır. Problemin çözümünde yer alan karar vericiler hem değerlendirme kriterlerinin önem seviyelerini hem de değerlendirme kriterlerine göre her bir alternatifi değerlendirirler. Bu değerlendirme için kullanılan

dilsel ölçek Çizelge 5.2'deki yamuksal bulanık sayılardan oluşmaktadır. Algoritma adımları aşağıdaki gibidir [95]:

Çizelge 5.2. Yamuksal bulanık sayılardan oluşan dil ölçeği

Dilsel Terim	Yamuksal Bulanık Sayılar			
	a_{ij}	b_{ij}	c_{ij}	d_{ij}
Çok yüksek	0,7	0,8	0,9	1
Yüksek	0,5	0,6	0,7	0,8
Orta	0,3	0,4	0,5	0,6
Düşük	0,1	0,2	0,3	0,4
Çok düşük	0	0,1	0,2	0,3

Adım 1. Her bir kritere göre alternatiflerin önem seviyeleri bir karar alma grubu göz önünde bulundurularak Eşitlik 5.19 ile elde edilir. Her bir alternatifin yer aldığı alternatif seti $A = \{A_i \mid i = 1, \dots, m\}$ ile gösterilirken, kriter seti $C = \{C_j \mid j = 1, \dots, n\}$ ile gösterilir. $X = \{X_{ij} \mid i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\}$ bulanık değerlerin olduğu kümeyi temsil etmektedir. $\tilde{w} = \{\tilde{w}_j \mid j = 1, \dots, n\}$ bulanık ağırlık kümesini göstermektedir. Dilsel değişkenler ise, yamuk bulanık sayıları temsil eden $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ ifadesi ile gösterilmektedir. K uzman tarafından oluşturulan karar matrisi $\tilde{D}$ Eşitlik 5.20 ile oluşturulur.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 (+) \tilde{x}_{ij}^2 (+) \dots (+) \tilde{x}_{ij}^K] \quad (5.19)$$

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Adım 2. Normalleştirilmiş oranlar ($\tilde{r}_{ij}$), her bir fayda ve maliyet kriteri için Eşitlik 5.21 ile hesaplanır. Normalizasyon işlemi ile normalize edilmiş yamuksal bulanık sayıların $[0,1]$ aralığında olması özelliği korunur.

$$\tilde{r}_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{a_{ij}}{d_j^*}, \frac{b_{ij}}{d_j^*}, \frac{c_{ij}}{d_j^*}, \frac{d_{ij}}{d_j^*} \right), & \text{eğer } j \in \text{ fayda kriteri ise } d_j^* = \max_i d_{ij} \\ \left(\frac{a_j^-}{d_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), & \text{eğer } j \in \text{ maliyet kriteri ise } a_j^- = \min_i a_{ij} \end{cases} \quad (5.21)$$

Adım 3. Ağırlıklı normalleştirilmiş oranlar ($\tilde{v}_{ij}$) Eşitlik 5.22 ile hesaplanır.

$$\tilde{v}_{ij} = w_j(x) \tilde{r}_{ij}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (5.22)$$

Adım 4. Bulanık pozitif ideal nokta (A^*) ve bulanık negatif ideal nokta (A^-), J_1 ve J_2 sırasıyla fayda ve maliyet özellikleri olduğunda Eşitlik 5.23 ve Eşitlik 5.24'teki gibi türetilir.

$$A^* = \{\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*\}, \tilde{v}_j^* = (1, 1, 1, 1) \quad (5.23)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\}, \tilde{v}_j^- = (0, 0, 0, 0) \quad (5.24)$$

Adım 5. Her bir alternatifin bulanık pozitif ve negatif ideal çözümlerden olan uzaklıkları vertex (köşe) metodu yardımıyla hesaplanır. Bu uzaklıklar sırasıyla ($\tilde{S}_i^*, \tilde{S}_i^-$) Eşitlik 5.25 ve Eşitlik 5.26'daki gibidir.

$$\tilde{S}_i^* = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^n [\tilde{v}_{ij} - \tilde{v}_j^*]^2}, i = 1, \dots, m \quad (5.25)$$

$$\tilde{S}_i^- = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^n [\tilde{v}_{ij} - \tilde{v}_j^-]^2}, i = 1, \dots, m \quad (5.26)$$

Adım 6. İdeal çözüme benzerlikleri hesaplamak için, bulanıklaştırılmış ayırma değerleri alan merkezi (center of area, CoA) bulanıklaştırma yöntemi kullanılarak Eşitlik 5.27'deki gibi türetilir.

$$C_i^* = \tilde{S}_j^- / (\tilde{S}_j^* + \tilde{S}_j^-), i = 1, \dots, m \quad (5.27)$$

Adım 7. Algoritma adımlarından nihai olarak elde edilen C_i^* değerleri büyükten küçüğe sıralandığında alternatiflerin tercih sıralaması elde edilmiş olur.

5.2.4. Pisagor Bulanık Kümeler

Karar probleminin çözümü için görüş bildiren karar vericilerin uzman görüşlerindeki belirsizliği ölçmede etkili olan bu teori, karar verici görüşlerinden oluşan kümeye üyelik ($\mu_P(x)$) ve üye olmama ($\nu_P(x)$) derecesi ile ilgilidir. Pek çok araştırmacı tarafından farklı uygulama alanlarında kullanılan bu kümeler, Atanassov [20] tarafından 1986 yılında bir tereddüt fonksiyonu (hesitancy function) eklenerek genişletilmiştir. Atanassov tarafından önerilen bu yaklaşım, birçok araştırmacı tarafından Sezgisel bulanık kümeler olarak kullanılmıştır. Ancak, üyelik ve üye olmama dereceleri 1'den büyük olduğunda bu önerinin yetersiz olduğu fark edilmiştir ve bu eksikliği gidermek amacıyla Yager [23], 2014 yılında Sezgisel bulanık kümelerin bir uzantısı olarak Pisagor bulanık kümeleri geliştirmiştir. Bu teori, Sezgisel bulanık kümelerin belirsizliği ele alamadığı durumlarda etkin bir çözüm sunmaktadır [135,136]. Diğer bulanık kümelerde, üyelik ve üyelik dışı dereceler toplamı maksimum 1 olarak atanır. Pisagor bulanık kümelerde ise bu atama, derece karelerinin toplamının en fazla 1 olması ($(\mu_P(x)^2 + \nu_P(x)^2) \leq 1$) koşuluyla genişletilmiştir. Bu gevşetilen kısıtlama ile karar vericilere geniş bir değerlendirme ölçeği sunulmuş, böylece belirsiz ve tutarsız bilgilerin yönetimi sağlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında, Pisagor bulanık kümeler yalnızca bulanık kümelerin yakalayabileceği kesin olmayan ve belirsiz bilgileri gösterirken, pratik durumlarda daha karmaşık belirsizlikleri de modelleyebilir bir yapıya sahiptir. Tüm bu açıklamalar birlikte dikkate alındığında, karar verici olan uzman değerlendirmelerinin kısıtlamalara uymasını sağlamak yerine bu çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde Pisagor bulanık kümelerin kullanılması uygun görülmüştür. Aşağıda, Pisagor bulanık kümelerinin bazı önemli tanımları sunulmuştur:

Tanım 1. Sonlu bir küme X ile gösterilmek üzere bu kümenin elemanı x 'tir. Pisagor bulanık küme P ile ifade edilirse, kümenin genel gösterimi Eşitlik 5.28'de olduğu gibidir.

$$P \cong \{ \langle x, P(\mu_P(x), \nu_P(x)) \rangle \mid x \in X \} \quad (5.28)$$

Burada $\mu_P(x): X \rightarrow [0,1]$ ve $\nu_P(x): X \rightarrow [0,1]$ $x \in X$, sırasıyla P kümesindeki üyelik ve üye olmama derecelerini gösterir. Bu derecelerin karelerinin toplamı Eşitlik 5.29'da olduğu gibi 1'i geçemez.

$$0 \leq \mu_P(x)^2 + \nu_P(x)^2 \leq 1 \quad (5.29)$$

Pisagor bulanık kümelerin üçüncü parametresi hiperstatiklik (belirsizlik) derecesidir ($\pi_P(x)$) ve Eşitlik 5.30 kullanılarak hesaplanır.

$$\pi_P(x) = \sqrt{1 - \mu_P(x)^2 - \nu_P(x)^2} \quad (5.30)$$

Tanım 2. $\beta_1 = P(\mu_{\beta_1}, \nu_{\beta_1})$ ve $\beta_2 = P(\mu_{\beta_2}, \nu_{\beta_2})$ iki Pisagor bulanık sayıdır. $\lambda > 0$ olduğunda bu iki bulanık sayı arasındaki temel işlemler Eşitlik 5.31 – Eşitlik 5.34 [7]'de sunulduğu gibidir.

$$\beta_1 \oplus \beta_2 = P\left(\sqrt{\mu_{\beta_1}^2 + \mu_{\beta_2}^2 - \mu_{\beta_1}^2 \mu_{\beta_2}^2}, \sqrt{\nu_{\beta_1}^2 + \nu_{\beta_2}^2 - \nu_{\beta_1}^2 \nu_{\beta_2}^2}\right) \quad (5.31)$$

$$\beta_1 \otimes \beta_2 = P\left(\mu_{\beta_1}, \mu_{\beta_2}, \sqrt{\nu_{\beta_1}^2 + \nu_{\beta_2}^2 - \nu_{\beta_1}^2 \nu_{\beta_2}^2}\right) \quad (5.32)$$

$$\lambda \beta_1 = P\left(\sqrt{1 - (1 - \mu_{\beta_1}^2)^\lambda}, (\nu_{\beta_1})^\lambda\right), \lambda > 0 \quad (5.33)$$

$$\beta_1^\lambda = P\left((\mu_{\beta_1})^\lambda, \sqrt{1 - (1 - \nu_{\beta_1}^2)^\lambda}\right), \lambda > 0 \quad (5.34)$$

Tanım 3. $\beta_1 = P(\mu_{\beta_1}, \nu_{\beta_1})$ ve $\beta_2 = P(\mu_{\beta_2}, \nu_{\beta_2})$ iki Pisagor bulanık sayıdır. Bu iki bulanık sayının sıralaması (doğası gereği yarı sıralama) aşağıdaki gibidir:

Eğer $\beta_1 > \beta_2$ ve yalnızca $(\Leftrightarrow) \mu_{\beta_1} \geq \mu_{\beta_2}$ ve $\nu_{\beta_1} \leq \nu_{\beta_2}$ ise,

İki bulanık sayıyı karşılaştırmak için bir puan fonksiyonu önerilmiştir. Bu fonksiyon Eşitlik 5.35'teki gibidir.

$$s(\beta_1) = (\mu_{\beta_1})^2 - (\nu_{\beta_1})^2 \quad (5.35)$$

Tanım 4. Yukarıda önerilen puan fonksiyonuna göre, iki Pisagor bulanık sayıyı karşılaştırmak için aşağıda 3 önerme sunulmuştur [7]:

- (i) Eğer $s(\beta_1) < s(\beta_2)$ ise, $\beta_1 < \beta_2$
- (ii) Eğer $s(\beta_1) > s(\beta_2)$ ise, $\beta_1 > \beta_2$
- (iii) Eğer $s(\beta_1) = s(\beta_2)$ ise, $\beta_1 \sim \beta_2$

5.2.5. Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi

Adım 1. Ilbahar vd. [137] tarafından önerilen ölçek, uzmanların dilsel değerlendirme yapmaları için kullanılır (Çizelge 5.3). Bu ölçekle, ikili karşılaştırma matrisi $A=(a_{ik})_{m \times m}$ oluşturulmaktadır.

Çizelge 5.3. Pisagor bulanık AHP için dil ölçeği [137]

Dilsel Terimler	Kısaltma	Pisagor Bulanık Sayılar			
		μ_L	μ_U	ν_L	ν_U
Kesinlikle Düşük önemli	KDÖ	0	0	0,9	1
Çok Düşük önemli	ÇDÖ	0	0	0,8	0,9
Düşük önemli	DÖ	0,2	0,35	0,65	0,8
Ortalamanın Altında önemli	OAÖ	0,35	0,45	0,55	0,65
Ortalama önemli	OÖ	0,45	0,55	0,45	0,55
Ortalamanın Üzerinde önemli	OÜÖ	0,55	0,65	0,35	0,45
Yüksek Önemli	YÖ	0,65	0,8	0,2	0,35
Çok Yüksek Önemli	ÇYÖ	0,8	0,9	0,1	0,2
Kesinlikle Yüksek Önemli	KYÖ	0,9	1	0	0
Tam Olarak Eşit	TOE	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965

Adım 2. $D = (d_{ik})_{m \times m}$ fark matrisleri, üyelik ve üyelik dışı fonksiyonun alt ve üst değerleri arasındaki fark alınarak hesaplanır. Bu hesaplama Eşitlik 5.36 ve Eşitlik 5.37’de verilmiştir.

$$d_{ik_L} = \mu_{ik_L}^2 - v_{ik_U}^2 \quad (5.36)$$

$$d_{ik_U} = \mu_{ik_U}^2 - v_{ik_L}^2 \quad (5.37)$$

Adım 3. Aralık çarpım matrisi $S = (s_{ik})_{m \times m}$, Eşitlik 5.38 ve Eşitlik 5.39 kullanılarak hesaplanır.

$$s_{ik_L} = \sqrt{1000^{d_L}} \quad (5.38)$$

$$s_{ik_U} = \sqrt{1000^{d_U}} \quad (5.39)$$

Adım 4. $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ belirlilik değeri (determinacy value) Eşitlik 5.40 kullanılarak hesaplanır.

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ik_U}^2 - \mu_{ik_L}^2) - (v_{ik_U}^2 - v_{ik_L}^2) \quad (5.40)$$

Adım 5. Belirlilik değerleri, Eşitlik 5.41 kullanılarak normalizasyondan önce ağırlık matrisini ($T = (t_{ik})_{m \times m}$) elde etmek için $S = (s_{ik})_{m \times m}$ matrisi ile çarpılır.

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ik_L} + s_{ik_U}}{2} \right) \tau_{ik} \quad (5.41)$$

Adım 6. Normalize edilmiş önem/öncelik ağırlıkları w_i , Eşitlik 5.42 kullanılarak hesaplanır.

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^m t_{ik}}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m t_{ik}} \quad (5.42)$$

5.2.6. Pisagor Bulanık TOPSIS

Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen TOPSIS yöntemi, uzlaşmacı çözüm mantığına dayalı en iyi alternatifi bulmak için geliştirilmiştir [138]. Bu mantık, ideal çözüme en kısa mesafeyi almak ve negatif ideal çözümden en uzak olan çözümü seçmek için kullanılır. Bu yöntem, kriterlere göre alternatifleri değerlendirirken öznel belirsizliğe atıfta bulunabilen bulanık sayıları hesaba katacak şekilde genişletilmiştir. Bu nedenle, Pisagor bulanık küme bu yöntemle kullanılabilir. Yöntemin temel avantajları arasında belirsizlikleri modelleme, pozitif ve negatif ideal noktaları aynı anda değerlendirme ve kolay algoritmik hesaplamalar sayılabilir. Pisagor Bulanık TOPSIS yönteminin algoritmik adımları aşağıdaki gibidir [139]:

Adım 1. K uzmandan oluşan bir karar verme grubunun her bir kriterine göre alternatif değerlendirmeleri Çizelge 5.4'e göre yapılır. Ardından karar matrisi $R=(C_j(x_i))_{m \times n}$ oluşturulur (Eşitlik 5.43). Burada C_j ($j=1,2,...,n$) ve x_j ($i=1,2,...,m$) sırasıyla kriterlerin ve alternatiflerin değerlerine atıfta bulunmaktadır.

$$R = (C_j(x_i))_{m \times n} = \begin{pmatrix} P(u_{11}, v_{11}) & P(u_{12}, v_{12}) & \dots & P(u_{1n}, v_{1n}) \\ P(u_{21}, v_{21}) & P(u_{22}, v_{22}) & \dots & P(u_{2n}, v_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P(u_{m1}, v_{m1}) & P(u_{m2}, v_{m2}) & \dots & P(u_{mn}, v_{mn}) \end{pmatrix} \quad (5.43)$$

Çizelge 5.4. Pisagor bulanık TOPSIS için dil ölçeği [90]

Dilsel Terimler	Kısaltma	Pisagor bulanık sayılar	
		u	v
Aşırı Düşük	AD	0,1	0,99
Çok Düşük	ÇD	0,1	0,97
Düşük	D	0,25	0,92
Orta Derecede Düşük	ODD	0,4	0,87
Orta	O	0,5	0,8
Orta Derecede Yüksek	ODY	0,6	0,71
Yüksek	Y	0,7	0,6
Çok Yüksek	ÇY	0,8	0,44
Aşırı Yüksek	AY	0,1	0

Adım 2. Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin hesaplama işlemi Eşitlik 5.44 ve Eşitlik 5.45'te verilmiştir.

$$x^+ = \left\{ C_j, \max_i \langle s(C_j(x_i)) \rangle \mid j = 1, 2, \dots, n \right\} = \{ \langle C_1, P(u_1^+, v_1^+) \rangle, \langle C_2, P(u_2^+, v_2^+) \rangle, \dots, \langle C_n, P(u_n^+, v_n^+) \rangle \} \quad (5.44)$$

$$x^- = \left\{ C_j, \min_i \langle s(C_j(x_i)) \rangle \mid j = 1, 2, \dots, n \right\} = \{ \langle C_1, P(u_1^-, v_1^-) \rangle, \langle C_2, P(u_2^-, v_2^-) \rangle, \dots, \langle C_n, P(u_n^-, v_n^-) \rangle \} \quad (5.45)$$

Adım 3. Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere olan mesafeler sırasıyla Eşitlik 5.46 ve Eşitlik 5.47 kullanılarak hesaplanır.

$$D(x_i, x^+) = \sum_{j=1}^n w_j d(C_j(x_i), C_j(x^+)) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n w_j \left(\left| (\mu_{ij})^2 - (\mu_j^+)^2 \right| + \left| (v_{ij})^2 - (v_j^+)^2 \right| + \left| (\pi_{ij})^2 - (\pi_j^+)^2 \right| \right) \quad (5.46)$$

$$D(x_i, x^-) = \sum_{j=1}^n w_j d(C_j(x_i), C_j(x^-)) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n w_j \left(\left| (\mu_{ij})^2 - (\mu_j^-)^2 \right| + \left| (v_{ij})^2 - (v_j^-)^2 \right| + \left| (\pi_{ij})^2 - (\pi_j^-)^2 \right| \right) \quad (5.47)$$

Eşitlik 5.46 ve Eşitlik 5.47 için $i = 1, 2, \dots, n$ 'dir. Bu denklemlere göre, $D(x_i, x^+)$ ne kadar küçükse alternatif x_i o kadar iyi, $D(x_i, x^-)$ ne kadar büyükse alternatif x_i o kadar iyidir. Ve bu denklem çoğunlukla $D_{min}(x_i, x^+) = \min_{1 \leq i \leq m} D(x_i, x^+)$ ve $D_{max}(x_i, x^-) = \max_{1 \leq i \leq m} D(x_i, x^-)$ 'dir.

Adım 4. Her alternatifin göreceli yakınlık endeksleri Eşitlik 5.48 ile hesaplanır.

$$\xi(x_i) = \frac{D(x_i, x^-)}{D_{max}(x_i, x^-)} - \frac{D(x_i, x^+)}{D_{min}(x_i, x^+)} \quad (5.48)$$

Adım 5. Algoritma, alternatiflerin en iyi sırasını belirleyerek sonlandırılır. Alternatifler arasında görelî yakınlık endeksleri en yüksek olan alternatif en iyi alternatiftir.



6. UYGULAMA

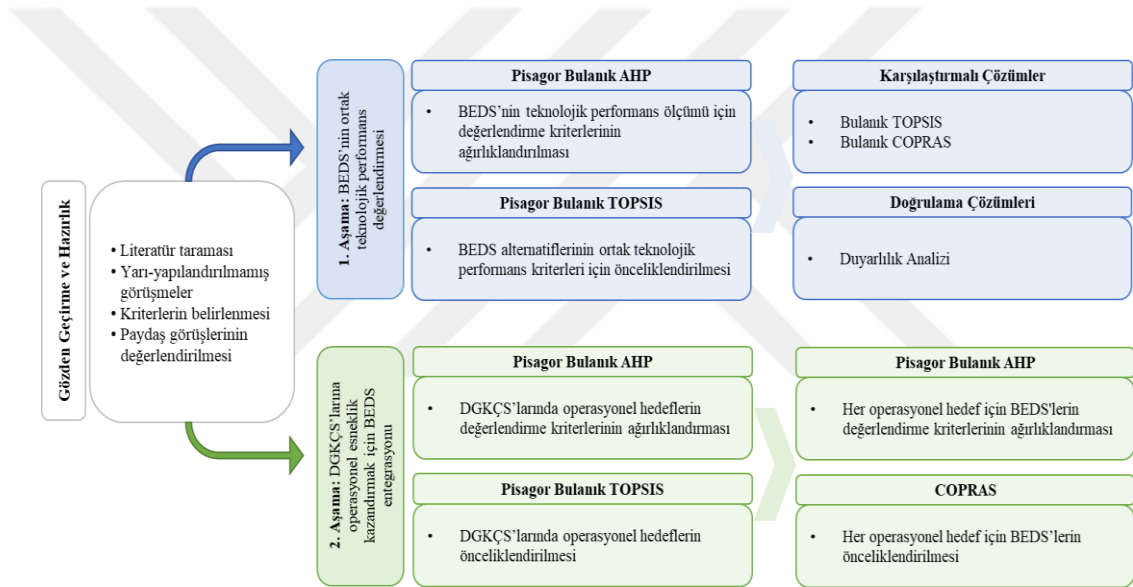
Bu çalışmanın kavramsal çerçevesi, yukarıda verilen bilgiler ışığında ve literatürden bilindiği kadarıyla, ilk kez enerji arz ve güvenliğinde etkin payı olan DGKÇS’de sürdürülebilir, modern ve modüler çözümler sunan ve kritik derecede önemli gelecek projeksiyonu vadeden 5 BEDS alternatifinin bulanık ortamda teknoloji performans değerlendirilmesini ve entegrasyonunu kapsamaktadır. Bu konfigürasyon, yüksek belirsizlik ve karmaşıklık içermesinin yanı sıra nitel ve nicel verilerin olduğu bir durumu yansıtmaktadır. Dolayısıyla bu kavramsal çerçeve, Şekil 6.1’den de görülebileceği üzere 2 aşamadan oluşmaktadır.

Gözden geçirme ve hazırlık aşamaları her iki aşama için de geçerlidir. Burada şebekede ve teknoloji geliştirmede dolaylı ya da doğrudan ilişkili paydaşlar ile görüşmeler yapılarak kriterlerin belirlenmesi, ardından belirlenen bu kriterlerin literatür destekli olarak kesinleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın uygulama aşamalarında da kullanılacak olan uzman görüşü verileri ise yine bu aşamada elde edilmiştir.

Çalışmanın her iki aşaması da birbirinden bağımsız uygulamaları ve çıktıları içermektedir. Bu doğrultuda Şekil 6.1’de verilen ilk aşamada BEDS’in ortak teknolojik performans parametrelerinin bulanık ortamda değerlendirilmesi için ilk olarak değerlendirme kriterleri belirlenmiş ve takip eden bölümlerde tanımlarıyla birlikte sunulmuştur. Belirlenen bu kriterler uzman görüşleri alınarak PBAHP ile ağırlıklandırılmıştır. Hesaplanan bu ağırlıklar ile yine uzman görüşleri ile belirlenen alternatiflerin öncelik sırası hesaplanmıştır. Sonuçların geçerliliği ve doğruluğunun yanı sıra önerilen metodoloji ile tutarlı sonuçlar elde edilip edilmediği BTOPSIS ve BCOPRAS yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Buna ek olarak kriter ağırlıklarının farklı koşullardaki durumları göz önüne alınarak alternatifler üzerindeki etkisini ölçebilmek adına bu aşama duyarlılık analizi ile sonuçlandırılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, DGKÇS’ye operasyonel esneklik kazandırılması için BEDS entegrasyonu bulanık ortamda araştırılmıştır. Bu aşamada ilk olarak

entegrasyon amaçları, diğer bir deyişle operasyonel hedefler ve bu hedefleri değerlendirecek kriter seti kesinleştirilmiş ve takip eden bölümlerde tanımlarıyla birlikte sunulmuştur. Operasyonel amaçların değerlendirilmesi için kesinleştirilen kriterler PBAHP ile ağırlıklandırılmış, ardından operasyonel hedefler PBTOPSIS ile önceliklendirilmiştir. Bu aşamanın sonucu olarak, her bir operasyonel amaç altında entegre edilebilecek BEDS alternatifleri sıralaması elde etmek için BEDS alternatiflerinin değerlendirme kriter seti PBAHP ile ağırlıklandırılmıştır. Ardından alternatifler COPRAS yöntemi ile önceliklendirilmiştir. Bu aşamanın sonucunda, DGKÇS'ye farklı amaçlar için entegrasyon yapılabilmesi durumunda hangi BEDS alternatifinin uygun olacağı tespit edilmiş olup, aynı zamanda entegrasyon için hibrit bir depolama tesisi kurulabileceğine de ışık tutulmuştur.



Şekil 6.1. Uygulamanın kavramsal çerçevesi

6.1. Veri Toplama

Sürdürülebilirliğe göre “en iyi” teknolojinin geliştirilebilmesi ve uzun vadeli bir bakış açısı sağlanabilmesi için, toplum temelli düşünme ve öğrenme sürecine ihtiyaç vardır [18]. Dolayısıyla teknoloji alternatiflerini çok boyutlu değerlendirme ilkelerine göre katılımcılarla destekleme, ileriye dönük tanımlar, kullanımlar ve tüketimlere güçlü bir ışık tutmaktadır. Ancak bu yaklaşım birçok nicel bilgi sağlamak konusunda etkili olsa

da teknoloji geliştirilmesi konusunda doğrudan ya da dolaylı aktörlerin (enactors and selectors) çıkarlarını da içermektedir. Bu çıkarlar teknolojinin uygulanabilirliği konusunda birçok mühendislik şüphelerine de yol açmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmanın yukarıda anlatılan uygulama aşamaları için, DGKÇS’de enerji depolama sistemleri ve şebekelerdeki farklı konumları itibariyle uzman karar vericiler ile literatür destekli yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Uzmanlar hakkında detaylı bilgi Çizelge 6.1’de verilmiştir. Gizlilik nedenlerinden dolayı, uzmanların kimliği burada açıklanmamıştır ve bu nedenle E1, E2, ..., E20 olarak gösterilmiştirlerdir.

Çizelge 6.1. Uzman ekip bilgileri

Uygulama	Uzman No	Aktör Tipleri*	Paydaş	Çalışma Alanı	**Deneyim
1. Aşamadaki Uzmanlar	E1	Enaktör	Batarya Ar-Ge (Üniversite)	Batarya teknolojileri Ar-Ge (Elektrotlar, Hücre, Paketler, vb.)	19
	E2		Batarya Ar-Ge (Üniversite)		14
	E3		Enerji sistemi – Araştırmacı (Üniversite)	Enerji piyasası politikası ve sistem modellemesi	8
	E4	Enaktör & Seçici	Batarya üreticisi	Üretim, Ar-Ge, pazarlama, entegrasyon ve optimizasyon	7
	E5		Batarya üreticisi		13
	E6	Seçici	Yenilenebilir enerji kaynağı kullanıcısı (Rüzgar+Güneş)	Entegrasyon ve optimizasyon, üretim, planlama, operasyon	5
	E7		Enerji depolama işletme yöneticisi	Üretim ve servis, planlama, lobi-savunuculuk grupları	26
	E8		Otomotiv sektörü (Elektrikli araç)	Sistem (araç) entegrasyonu, operasyon	7
	E9		Şebeke operatörü	Şebeke işlemleri, altyapı, iletim & dağıtım	24
	E10		Kamu kurumu	Üretim, yan hizmetler, son kullanıcı	21

Çizelge 6.1. (devam)

Uygulama Uzman No	Aktör Tipleri*	Paydaş	Çalışma Alanı	**Deneyim
2. Aşamadaki Uzmanlar	E11	Batarya Ar-Ge (Üniversite)	Batarya teknolojileri	9
	E12		Ar-Ge (Elektrotlar, Hücre, Paketler, vb.)	13
	E13		Enerji piyasası politikası ve sistem modellemesi	15
	E14	Batarya üreticisi	Üretim, Ar-Ge, pazarlama, entegrasyon ve optimizasyon	7
	E15	DGKÇS kullanıcısı	Entegrasyon ve optimizasyon, üretim, planlama, operasyon	20
	E16	Gaz türbini üreticisi	Üretim ve servis, planlama, lobi-savunuculuk grupları	12
	E17	Enerji depolama işletme yöneticisi	Şebeke işlemleri, altyapı, iletim & dağıtım	7
	E18	Şebeke operatörü	Üretim, yan hizmetler, son kullanıcı	10
	E19			11
	E20	Kamu kurumu		16

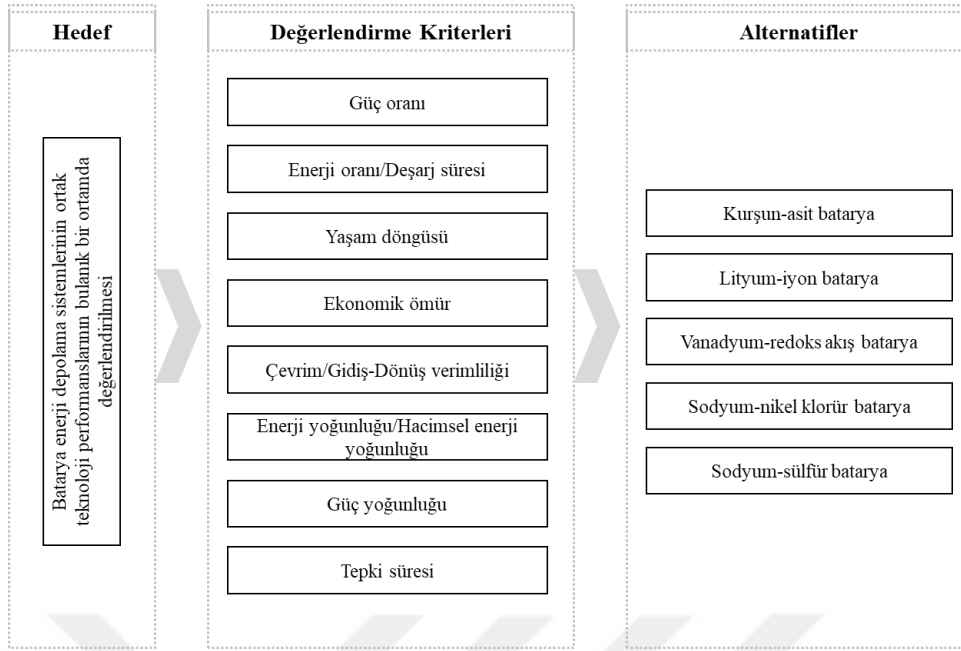
*Seçiciler (selector), geliştirici veya dolaylı olarak teknolojiye katkıda bulunan organizasyonları (finansörler, politikacılar vb.) temsil eden uzmanlardır. Enaktörler, teknolojinin geliştirilmesinde doğrudan yer alan aktörlerdir, oysa seçiciler birden fazla alternatif arasından seçim yapabilmek için bağımsızlığa sahip oldukları için, uzaktan ilgili aktörlerdir [140].

** Deneyim süresi yıldır.

6.2. BEDS'in Ortak Teknolojik Performans Değerlendirmesi

Enerji arz güvenliğine sürdürülebilir, modern ve modüler çözümler sunan kritik derecede önemli gelecek projeksiyonu vadeden 5 BEDS alternatifinin bulanık ortamda daha hassas ve doğru sonuçlara ulaştıracağı görüşüyle spesifik teknoloji performans değerlendirilmesi, bu çalışmanın kavramsal çerçevesinde belirtildiği gibi ilk aşamasını kapsamaktadır. Uygulamadaki batarya enerji depolama sistemleri sırasıyla kurşun-asit, lityum-iyon, vanadyum redoks akış bataryası, sodyum-nikel klorür ve sodyum-sülfür teknolojileridir. Spesifik performans değerlendirmesi için teknoloji geliştirilmesinde doğrudan ve dolaylı olarak etki sağlayan şebekedeki 10 paydaş görüşü alınmıştır. Ardından literatür kıyaslaması yapılarak nihai performans kriterleri alternatifler açısından değerlendirilmiştir. Bu aşamanın sonucu olarak, batarya enerji depolama sistemlerinin spesifik teknoloji performans değerlendirme kriterleri ve tanımları Çizelge 6.2'deki gibidir.

Bu aşamaya kadar önerilen bulanık tabanlı çok kriterli karar verme modelinin hiyerarşik yapısının ilk fazında, kriterlerin şebeke paydaşlarından oluşan uzman grup tarafından değerlendirilmesi yapılmıştır. Bunu takip eden ikinci fazda ise, PBAHP ile kriter ağırlıklandırılması gerçekleştirilmiş ve bu ağırlıklar kullanılarak alternatifler PBTOPSIS ile sıralanmıştır. Önerilen modelin geçerliliğini doğrulamak için PBAHP ile ağırlıklandırılmış kriterler sırasıyla BTOPSIS ve BCOPRAS sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Çalışmanın uygulama bölümündeki ilk aşaması modelin geçerliliğini ve sıralamaların kararlılığını ölçmek için olası senaryolar altında yapılan duyarlılık analizi hesapları ile sonlandırılmıştır. Önerilen modele ait hiyerarşik yapı Şekil 6.2'deki gibidir. Yöntem adımları ve uygulama detayları takip eden bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 6.2. BEDS teknoloji performans değerlendirilmesinin hiyerarşik yapısı

Çizelge 6.2. Batarya enerji depolama sistemi ortak teknoloji performansı değerlendirme kriterleri [59–61,67]

Kriter Kodu	Kriterler	Birimler	Tanımlar
C1	Güç oranı	MW	Bir depolama sisteminin güç derecesini veya nominal gücünü tanımlar. Başka bir deyişle, depolama ortamındaki enerji depolama oranıdır.
C2	Enerji oranı/Deşarj süresi	MWh	Depolama sisteminin kapasitesi olarak da bilinen enerji oranı, bir depolama ortamında depolanabilecek enerji miktarıdır. Bataryanın belirli bir deşarj akımını (bir c-oranı olarak belirtilir) kullanarak mevcut toplam watt-saatın %100'ünden kesme gerilimini belirtir.
C3	Yaşam döngüsü	Çevrim x 10 ³	Bir depolama sisteminin ömrü boyunca çalıştırabileceği tam şarj ve deşarj döngülerinin sayısına yaşam döngüleri denir. Bataryaların yaşam döngüleri, döngülerin hızına, derinliğine, sıcaklık ve nem gibi diğer çevresel koşullara bağlıdır. Boşaltma derinliği (Depth of discharge, DoD) ne kadar yüksekse çevrim ömrü o kadar düşük olur.
C4	Ekonomik ömür	Yıl	Bir depolama sisteminin ömrü, güvenilirliğinin bir ölçüsüdür ve depolama sisteminin nominal kapasitesini nominal gücüne oranlayarak elde edebileceği yıl sayısı olarak hesaplanır.
C5	Çevrim/gidiş-dönüş verimliliği	%	Bir enerji depolama sisteminin gidiş-dönüş verimliliği, şarj sırasında depoladığı enerjinin, deşarj sırasında alınan enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. AC/AC verimliliği olarak da adlandırılır.

Çizelge 6.2. (devam)

Kriter Kodu	Kriterler	Birimler	Tanımlar
C6	Enerji yoğunluğu/ Hacimsel enerji yoğunluğu	Wh/l	Depolama malzemesinin birim hacmi başına depolayabildiği enerji miktarı, enerji yoğunluğu, bazen hacimsel enerji yoğunluğu olarak bilinir. Enerji tüketiminin yanı sıra belirli bir elektrik aralığına ulaşmak için gereken batarya boyutudur.
C7	Güç yoğunluğu	W/L	Depolama malzemesinin birim zamanda birim hacim başına depolayabileceği maksimum kullanılabilir güçtür. Depolanabilecek enerji miktarı, yani nominal güç ya da güç yoğunluğu olarak bilinir.
C8	Tepki süresi	Birkaç milisaniye	Bir enerji depolama teknolojisinin tepki süresi veya hızı, sistemin enerjiyi bir yüke ne kadar hızlı boşaltmaya başlayabileceğini tanımlar.

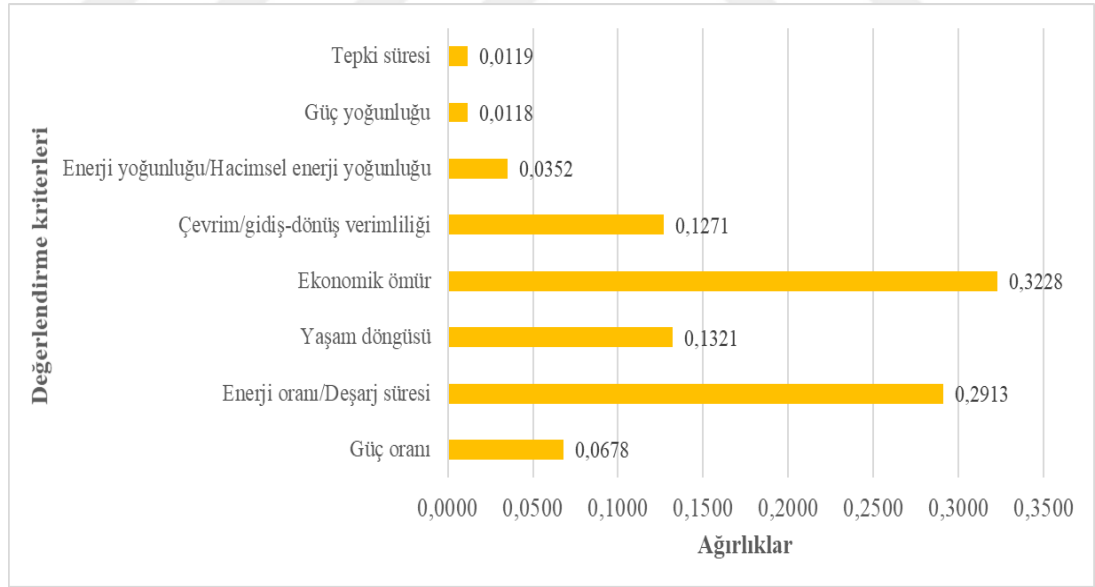
6.2.1. Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklandırması

BEDS'in ortak performans kriterlerini değerlendirmek için 10 paydaş görüşü alınmıştır. Uzman ekipten, her bir değerlendirme kriterini önem ağırlığına göre ikili bir şekilde karşılaştırmaları istenmiştir. Bu değerlendirmeler, Çizelge 5.3'te tanımlanmış olan dil değişkenleri ile yapılmıştır. Bu aşamada, Çizelge 5.3'te de verilmiş olan dil değişkenleri, onlara karşılık gelen Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Sayısal dönüşümü yapılan uzman görüşleri EK 1'de sunulmuştur. Bu değerlendiricilerin puanlandırmalarındaki öznel farklılık, Bölüm 5.2.5'in 1. adımında belirtildiği gibi uzlaşmış bir ikili karşılaştırma matrisine çevrilmiştir. Değerlendirme kriterleri için birleştirilmiş uzlaştırılmış ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.3'te verilmiştir. Uzman görüşleri ve PBAHP yönteminin algoritma adımlarındaki fark matrisi (D), iç çarpım matrisi (S), belirleyici değer matrisi (T) ve normalizasyondan önceki ağırlık matrisi (t) sırasıyla algoritmik hesaplamalarıyla EK 2'de sunulmuştur. Son olarak, değerlendirme kriterlerinin normalleştirilmiş öncelik ağırlıkları Eşitlik 5.42 kullanılarak hesaplanmıştır. PBAHP ile ağırlıklandırılmış kriterler Şekil 6.3'teki gibidir.

Çizelge 6.3. Uzman değerlendirmeleriyle oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	Pisagor Bulanık Sayılar: {[üyelik derecesi],[üye olmama derecesi]} {[μ_L, μ_U],[ν_L, ν_U]}			
	C1	C2	C3	C4
C1	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.290, 0.410],[0.590, 0.710]}	{[0.300, 0.400],[0.560, 0.670]}	{[0.190, 0.335],[0.665, 0.810]}
C2	{[0.590, 0.710],[0.290, 0.410]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.450, 0.550],[0.450, 0.550]}	{[0.350, 0.450],[0.550, 0.650]}
C3	{[0.560, 0.670],[0.330, 0.440]}	{[0.450, 0.550],[0.450, 0.550]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.200, 0.350],[0.650, 0.800]}
C4	{[0.665, 0.810],[0.190, 0.335]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}	{[0.650, 0.800],[0.200, 0.350]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}
C5	{[0.440, 0.540],[0.460, 0.560]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}	{[0.350, 0.450],[0.550, 0.650]}	{[0.090, 0.180],[0.810, 0.910]}
C6	{[0.320, 0.430],[0.570, 0.680]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}	{[0.200, 0.350],[0.650, 0.800]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}
C7	{[0.200, 0.350],[0.650, 0.800]}	{[0.000, 0.000],[0.900, 1.000]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}	{[0.000, 0.000],[0.900, 1.000]}
C8	{[0.180, 0.315],[0.675, 0.820]}	{[0.000, 0.000],[0.900, 1.000]}	{[0.100, 0.200],[0.800, 0.900]}	{[0.000, 0.000],[0.900, 1.000]}

Kriterler	C5	C6	C7	C8
C1	{[0.460, 0.560],[0.440, 0.540]}	{[0.570, 0.680],[0.320, 0.430]}	{[0.675, 0.820],[0.180, 0.315]}	{[0.700, 0.840],[0.160, 0.280]}
C2	{[0.800, 0.900],[0.100, 0.200]}	{[0.800, 0.900],[0.100, 0.200]}	{[0.900, 1.000],[0.000, 0.000]}	{[0.900, 1.000],[0.000, 0.000]}
C3	{[0.550, 0.650],[0.350, 0.450]}	{[0.650, 0.800],[0.200, 0.350]}	{[0.800, 0.900],[0.100, 0.200]}	{[0.800, 0.900],[0.100, 0.200]}
C4	{[0.810, 0.910],[0.090, 0.180]}	{[0.800, 0.900],[0.100, 0.200]}	{[0.900, 1.000],[0.000, 0.000]}	{[0.900, 1.000],[0.000, 0.000]}
C5	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.550, 0.655],[0.345, 0.450]}	{[0.650, 0.800],[0.200, 0.350]}	{[0.900, 1.000],[0.000, 0.000]}
C6	{[0.345, 0.450],[0.550, 0.655]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.650, 0.800],[0.200, 0.350]}	{[0.550, 0.655],[0.350, 0.450]}
C7	{[0.180, 0.315],[0.675, 0.820]}	{[0.200, 0.350],[0.650, 0.800]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.460, 0.560],[0.440, 0.540]}
C8	{[0.000, 0.000],[0.900, 1.000]}	{[0.350, 0.450],[0.550, 0.650]}	{[0.440, 0.540],[0.460, 0.560]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}



Şekil 6.3. PBAHP ile hesaplanmış kriterlerin ağırlıkları

Şekil 6.3'e göre, sırasıyla ekonomik ömür (0,3228), enerji oranı/deşarj süresi (0,2913) ve yaşam döngüsü (0,1321) kriterleri ilk üçte yer alırken güç oranı (0,0678), enerji yoğunluğu/hacimsel enerji yoğunluğu (0,0352), tepki süresi (0,0119) ve güç yoğunluğu (0,0118) kriterleri son sırada yer almaktadır.

6.2.2. BEDS Alternatiflerinin Önceliklendirilmesi

BEDS konusundaki uzman ekibin alternatif teknolojilerin performanslarını her bir kriter açısından değerlendirmeleri istenmiştir. Bu değerlendirmeleri yapabilmek için Çizelge 5.4'teki dilsel değişkenler kullanılmıştır. Bu aşamada, Çizelge 5.4'te de verilmiş olan dil değişkenleri, onlara karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Sayısal dönüşümü yapılan uzman görüşleri EK 3'te sunulmuştur. Bu değerlendiricilerin puanlandırmalarındaki öznel farklılık, Bölüm 5.2.6'nın 1. adımında belirtildiği gibi karar matrisine çevrilmiştir. Algoritma adımları takip edildiğinde, PBAHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları PBTOPSIS yöntemi için hesaplamaya dahil edilmiştir. Oluşturulan karar matrisi Çizelge 6.4'te verilmiştir. Bu aşamadan sonra Bölüm 5.2.6'da verilen adımlar takip edilmiştir. Sonuç olarak, BEDS performansları için hesaplanan yakınlık indeksleri Çizelge 6.6'da, sonuçların sıralaması ise Şekil 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. PBTOPSIS için uzman değerlendirmeleriyle oluşturulmuş karar matrisi

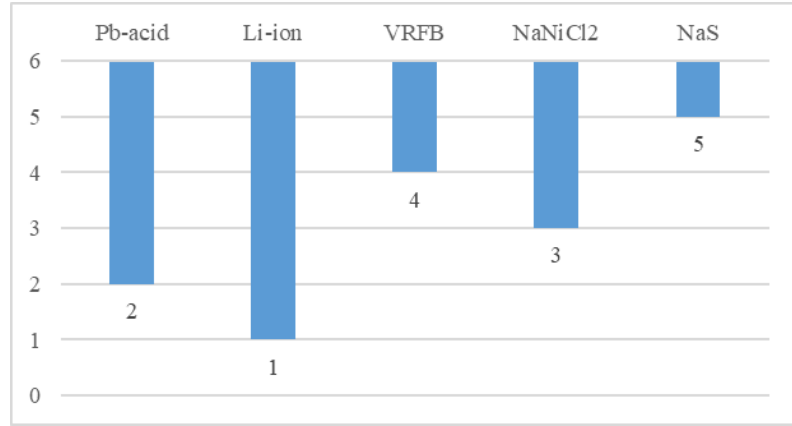
Alternatifler	Pisagor Bulanık Sayılar: {[μ üyelik derecesi],[ν üye olmama derecesi]} {[μ_L, μ_U],[ν_L, ν_U]}							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pb-acid	{[0.500, 0.796]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.250, 0.920]}	{[0.480, 0.814]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.450, 0.856]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.600, 0.710]}
Li-ion	{[0.600, 0.710]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.550, 0.755]}	{[0.480, 0.814]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.620, 0.688]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.600, 0.710]}
VRFB	{[0.370, 0.880]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.480, 0.814]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.420, 0.856]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.600, 0.710]}
NaNiCl ₂	{[0.580, 0.728]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.450, 0.835]}	{[0.480, 0.814]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.520, 0.782]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.440, 0.842]}
NaS	{[0.250, 0.920]}	{[0.250, 0.920]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.480, 0.814]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.420, 0.856]}	{[0.500, 0.800]}	{[0.420, 0.856]}

Çizelge 6.5. Pozitif ve negatif ideal çözümler

	C1			C2			C3			C4		
x^+	0,60	0,71	0,37	0,60	0,71	0,37	0,55	0,76	0,36	0,48	0,81	0,33
x^-	0,25	0,92	0,30	0,25	0,92	0,30	0,25	0,92	0,30	0,48	0,81	0,33
	C5			C6			C7			C8		
x^+	0,60	0,71	0,37	0,62	0,69	0,38	0,60	0,71	0,37	0,60	0,71	0,37
x^-	0,50	0,80	0,33	0,42	0,86	0,30	0,40	0,87	0,29	0,42	0,86	0,30

Çizelge 6.6. PBTOPSIS yakınlık $\xi(X_i)$ değerleri

Alternatifler	$D(X_i, X^+)$	$D(X_i, X^-)$	$\xi(X_i)$	Sıralama
Pb-acid	0,0544	0,1479	-2,3643	2
Li-ion	0,0173	0,1884	0,0000	1
VRFB	0,1461	0,0631	-8,11858	4
NaNiCl ₂	0,1184	0,0896	-6,3764	3
NaS	0,1783	0,0284	-10,1721	5



Şekil 6.4. BEDS alternatiflerinin teknolojik performansları

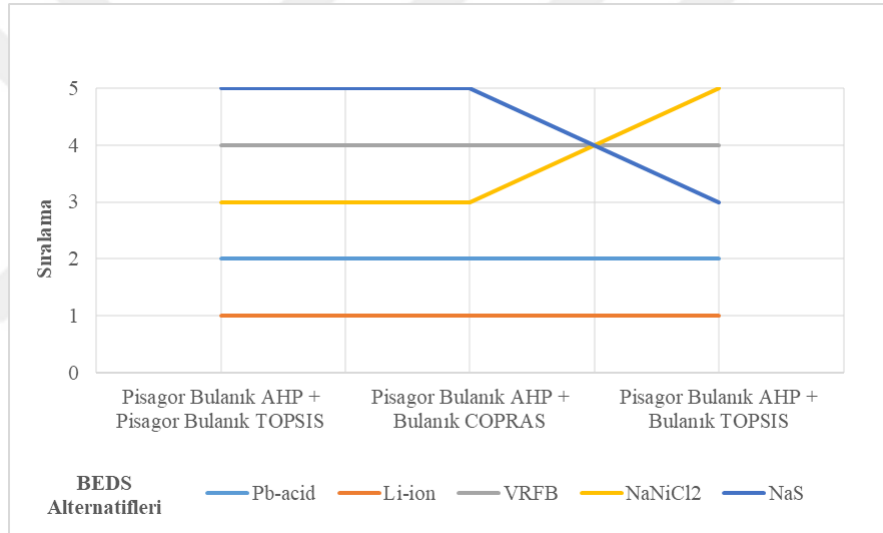
Hesaplama sonuçlarına göre, PBAHP ile önceliklendirilen kriterler açısından PBTOPSIS yöntemi ile en iyi performansı gösteren batarya enerji depolama sistemi lityum-iyon bataryalar olmuştur. Bu alternatifi kurşun-asit bataryalar takip etmiştir. ZEBRA (NaNiCl_2) bataryalar ortalama performans gösterirken, vanadyum-redoks akış bataryalar 4. sırada yer almıştır. Sodyum-sülfür bataryalar ise diğer bataryalardan daha düşük performans gösteren depolama türü olmuştur.

6.3. Karşılaştırmalı Analiz

Önerilen PBAHP-PBTOPSIS kombine model, benzer algoritma adımlarına sahip olan BTOPSIS ve BCOPRAS yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. İlk karşılaştırmalı analiz, daha önce Gül ve Ak [95] tarafından mesleki risk derecelendirmelerini ölçmek ve karşılaştırmalı bir iş sağlığı ve güvenliği değerlendirmesi yapmak amacıyla kullanılan PBAHP-BTOPSIS modeli ile yapılmıştır. Bu çalışmada, bahsedilen çalışmadan farklı olarak teknolojik performansa ilişkin alternatifleri değerlendirmek için beş noktalı bulanık dil ölçeği (Çizelge 5.2) kullanılmıştır. Alternatiflerin kriterler altındaki performanslarını ölçmek için uzman ekipten bu dil ölçeğini kullanmaları istenmiştir. Uzman görüşleri ve karşılaştırmanın yapıldığı algoritmalara ait adımlar takip edilerek

elde edilen hesaplamalar EK 4 ve EK 5’te sunulmuştur. Karşılaştırma, batarya teknoloji performanslarının bu çalışmada önerilen modelden kısmen farklı olduğunu göstermektedir. Bu farklılık sodyum-sülfür (NaS) ve ZEBRA (NaNiCl_2) bataryalar arasındadır.

İkinci karşılaştırma ise, daha önce Büyüközkan ve Göçer [141] tarafından dijital tedarik zinciri iş ortağı seçimi için önerilen PBAHP - BCOPRAS modeli ile yapılmıştır. Uzman görüşleri ve algoritma adımlarına ait hesaplamalar EK 6 ve EK 7’de sunulmuştur. Karşılaştırma neticesinde bu çalışmada önerilen model ile aynı sonuca ulaşılmıştır. Yapılan karşılaştırmaların sonuç sıralamaları Şekil 6.5’teki gibidir.



Şekil 6.5. Karşılaştırılan yöntemlerin sıralama sonuçları

6.4. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, önerilen yaklaşımın/çerçevenin doğruluğunu ve geçerliliğini sorgulamanın yanı sıra önerilen modelin sağlam olmasını sağlar [142]. Bu nedenle, hızla gelişen BEDS ile ilgili uzun vadeli sonuçlar elde etmek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Buradan elde edilen sıralamaların göreceli kriter ağırlıkları üzerinde istikrarlı bir sıralama elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bu çalışmada, BEDS’in

performans değerlendirmesi için önerilen yaklaşıma duyarlılık analizi yapılmıştır. PBAHP ile hesaplanan kriter ağırlıklarının alternatiflerin sıralaması üzerindeki etkisi farklı senaryolar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu senaryolar, ikili olarak kriter ağırlıkları değiştirilerek üretilmiştir. Bu nedenle, 8 farklı kriterin ikili kombinasyonundan dolayı 28 farklı senaryo vardır. Çizelge 6.7 ayrıca her senaryo için elde edilen sonuçları özetlemektedir. Buna göre, kriterlerin önem sırasına bakılmaksızın, lityum-iyon bataryaların ilk etapta güçlü bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

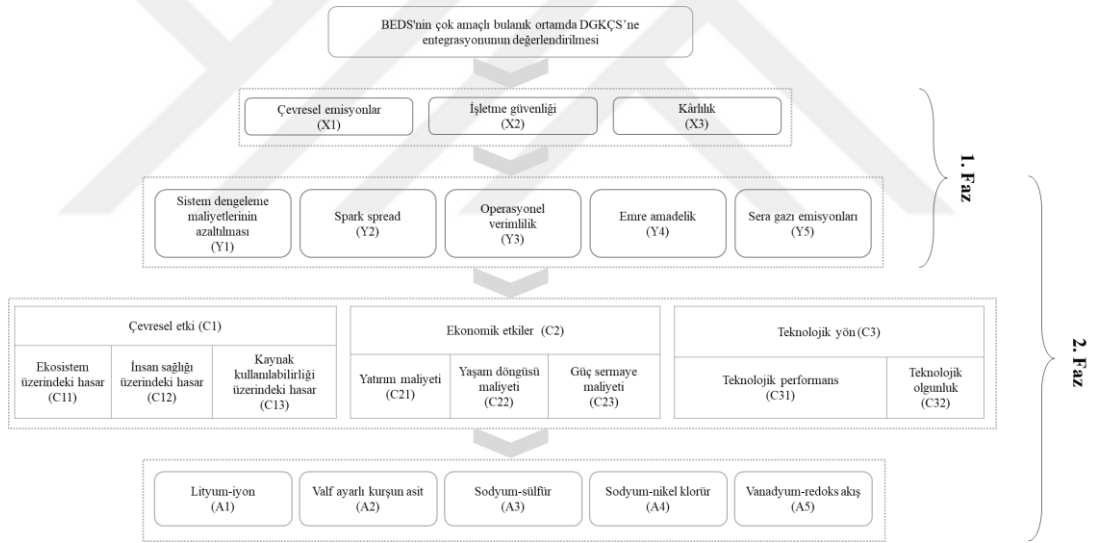


Çizelge 6.7. Performans kriter ağırlıklarına göre duyarlılık analizi sonuçları

Senaryolar		Kriter Ağırlıkları (w_i)								Alternatif Ağırlıkları (ξX_i)					Alternatiflerin Sıralaması	Özet Sonuç
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	A1	A2	A3	A4	A5		
0	Mevcut	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-2,364	0	-8,119	-6,376	-10,172	A2-A1-A4-A3-A5	A2
1	C1-C2	0,2913	0,0678	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-4,193	0	-8,372	-3,181	-10,172	A2-A4-A1-A3-A5	A2
2	C1-C3	0,1321	0,2913	0,0678	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-1,764	0	-8,444	-5,954	-10,786	A2-A1-A4-A3-A5	A2
3	C1-C4	0,3228	0,2913	0,1321	0,0678	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-4,328	0	-12,145	-6,616	-15,272	A2-A1-A4-A3-A5	A2
4	C1-C5	0,1271	0,2913	0,1321	0,3228	0,0678	0,0352	0,0118	0,0119	-6,007	0	-16,409	-11,632	-20,569	A2-A1-A4-A3-A5	A2
5	C1-C6	0,0352	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0678	0,0118	0,0119	-2,636	0	-8,106	-6,616	-10,013	A2-A1-A4-A3-A5	A2
6	C1-C7	0,0118	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0678	0,0119	-1,911	0	-8,075	-6,781	-9,463	A2-A1-A4-A3-A5	A2
7	C1-C8	0,0119	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,0678	-1,913	0	-7,184	-7,029	-9,799	A2-A1-A4-A3-A5	A2
8	C2-C3	0,0678	0,1321	0,2913	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-5,171	0	-7,491	-5,145	-8,644	A2-A4-A1-A3-A5	A2
9	C2-C4	0,0678	0,3228	0,1321	0,2913	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-2,353	0	-8,582	-6,848	-10,804	A2-A1-A4-A3-A5	A2
10	C2-C5	0,0678	0,1271	0,1321	0,3228	0,2913	0,0352	0,0118	0,0119	-0,523	0	-2,770	-1,895	-3,339	A2-A1-A4-A3-A5	A2
11	C2-C6	0,0678	0,0352	0,1321	0,3228	0,1271	0,2913	0,0118	0,0119	-6,635	0	-8,323	-4,580	-8,924	A2-A4-A1-A3-A5	A2
12	C2-C7	0,0678	0,0118	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,2913	0,0119	-2,397	0	-8,234	-4,379	-6,610	A2-A1-A4-A5-A3	A2
13	C2-C8	0,0678	0,0119	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,2913	-2,408	0	-3,728	-5,636	-8,303	A2-A1-A3-A4-A5	A2
14	C3-C4	0,0678	0,2913	0,3228	0,1321	0,1271	0,0352	0,0118	0,0119	-5,587	0	-10,177	-7,766	-12,191	A2-A1-A4-A3-A5	A2
15	C3-C5	0,0678	0,2913	0,1271	0,3228	0,1321	0,0352	0,0118	0,0119	-2,159	0	-7,784	-6,119	-9,767	A2-A1-A4-A3-A5	A2
16	C3-C6	0,0678	0,2913	0,0352	0,3228	0,1271	0,1321	0,0118	0,0119	-2,262	0	-8,573	-6,448	-10,628	A2-A1-A4-A3-A5	A2
17	C3-C7	0,0678	0,2913	0,0118	0,3228	0,1271	0,0352	0,1321	0,0119	-0,264	0	-8,636	-6,451	-9,802	A2-A1-A4-A3-A5	A2
18	C3-C8	0,0678	0,2913	0,0119	0,3228	0,1271	0,0352	0,0118	0,1321	-0,266	0	-6,721	-6,985	-10,522	A2-A1-A3-A4-A5	A2
19	C4-C5	0,0678	0,2913	0,1321	0,1271	0,3228	0,0352	0,0118	0,0119	-0,330	0	-3,532	-2,775	-4,433	A2-A1-A4-A3-A5	A2
20	C4-C6	0,0678	0,2913	0,1321	0,0352	0,1271	0,3228	0,0118	0,0119	-6,906	0	-12,533	-8,679	-14,534	A2-A1-A4-A3-A5	A2
21	C4-C7	0,0678	0,2913	0,1321	0,0118	0,1271	0,0352	0,3228	0,0119	-2,301	0	-12,768	-8,826	-12,526	A2-A1-A4-A5-A3	A2
22	C4-C8	0,0678	0,2913	0,1321	0,0119	0,1271	0,0352	0,0118	0,3228	-2,305	0	-7,936	-10,165	-14,328	A2-A1-A3-A4-A5	A2
23	C5-C6	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,0352	0,1271	0,0118	0,0119	-15,753	0	-32,688	-24,376	-39,619	A2-A1-A4-A3-A5	A2
24	C5-C7	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,0118	0,0352	0,1271	0,0119	-33,104	0	-98,975	-73,186	-110,778	A2-A1-A4-A3-A5	A2
25	C5-C8	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,0119	0,0352	0,0118	0,1271	-32,990	0	-80,436	-77,905	-117,084	A2-A1-A4-A3-A5	A2
26	C6-C7	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0118	0,0352	0,0119	-1,982	0	-8,109	-6,373	-9,991	A2-A1-A4-A3-A5	A2
27	C6-C8	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0119	0,0118	0,0352	-1,983	0	-7,739	-6,477	-10,130	A2-A1-A4-A3-A5	A2
28	C7-C8	0,0678	0,2913	0,1321	0,3228	0,1271	0,0352	0,0119	0,0118	-2,364	0	-8,119	-6,376	-10,172	A2-A1-A4-A3-A5	A2

6.5. DGKÇS'ye Operasyonel Esneklik Kazandırmak İçin BEDS Entegrasyonu

Bu bölüm, DGKÇS'de BEDS'in entegrasyonunun araştırılması sonucunda enerji sistemlerindeki operasyonel ihtiyaçlara göre depolama sistemi seçimini, gelecek projeksiyonların nasıl görüneceğine dair birçok beklentiyle çatışan ve yüksek belirsizlik altında karmaşık bir karar probleminin çözümlerini içermektedir. Bu doğrultuda bölüm iki aşamaya ayrılmıştır. İlk olarak, DGKÇS'de enerji depolama amaçlarının önceliklendirilmesi, ardından entegrasyon için BEDS seçimi bulanık bir ortamda incelenmiştir. İlk aşamada, operasyonel amaçların değerlendirme kriterleri PBAHP ve PBTOPSIS yöntemleri ile sıralanmıştır. İkinci aşamada ise, entegrasyonun değerlendirme kriterleri PBAHP ile entegre edilerek BEDS alternatifleri COPRAS yöntemi önceliklendirilmiştir. Bu kapsamda, problemin kapsamına göre geliştirilen modele ait hiyerarşik yapı Şekil 6.6'daki gibidir.



Şekil 6.6. Entegrasyon değerlendirmesinin hiyerarşik yapısı

6.5.1. DGKÇS’de Enerji Depolama Amaçlarının Önceliklendirilmesi

DGKÇS’de enerji depolama teknolojilerine olan ihtiyacın belirlenebilmesi için 10 paydaş görüşü alınmıştır. Bu görüşlere göre, enerji depolama amaçları ve değerlendirme kriterleri tanımlanmıştır. Bu tanımlar aşağıdaki gibidir:

Değerlendirme kriterleri

- *Çevresel emisyonlar (X1)*: Fosil kaynaklı santrallarda kullanılan fosil yakıtların yanma reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan fosil yakıt emisyonları birçok kirletici bileşikler içermektedir. Bu zararlı bileşikler (NO_x , C_2H_6 , CH_4 , C_3H_8) santralların baca gazlarından havaya salınarak insan ve çevre sağlığını negatif bir biçimde etkiler.
- *İşletme güvenliği (X2)*: Çeşitli koşullar enerji arz-talep dengesindeki istikrarı sarsabilir. Bu durumun dengelenmesi hem üretim güvenliğine hem de ekipman güvenliğine olumlu etki sunar. Dolaylı olarak mevzuata uyum içerisinde çalışma rejimi gösterebilmek için sistem güvenliğinin korunması ve istikrarlı bir dengeye ulaşması enerji üretim santralları için çok yönlü bir ön şarttır.
- *Kârlılık (X3)*: Santral operatörleri için (özellikle gaz türbini operatörleri) ortak ya da ayrı kullanılan üretim bloklarındaki operasyonel verimlilik kârlılığı da doğrudan etkilemektedir. Çalışma rejimindeki yorgunluk uzun süreli dayanıklılığı düşürebilmektedir. Daha uzun çalışma aralıkları ve şebekedeki etkin kullanım birbirleri ile doğru orantılı bir etki göstermektedir. Dolayısıyla, esnek hareket eden sistemler frekans, güç ve voltaj dalgalanmalarındaki hareketi sınırlayarak şebekeyi stabilize eder. Bu durum ise, aktif gelir garantisi gibi teşvik edici avantajlar sağlamaktadır.

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırması

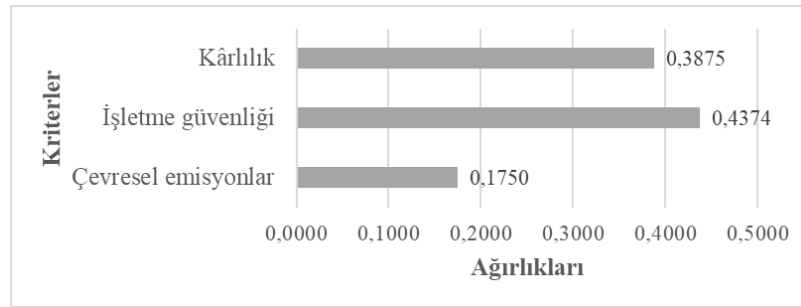
Uzman ekipten ilk olarak her bir değerlendirme kriterini önem ağırlığına göre ikili bir şekilde karşılaştırmaları istenmiştir. Bu değerlendirmeler, Çizelge 5.3’te tanımlanmış olan dil değişkenleri ile yapılmıştır. Bu aşamada, Çizelge 5.3’te de verilmiş olan dil değişkenleri, onlara karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Bu dönüşümlerin yapıldığı uzman görüşleri EK 8’de sunulmuştur.

Bu değerlendiricilerin puanlandırmalarındaki öznel farklılık, Bölüm 5.2.5'in 1. adımında belirtildiği gibi uzlaşmış bir ikili karşılaştırma matrisine çevrilmiştir. Değerlendirme kriterleri için birleştirilmiş uzlaştırılmış ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Operasyonel amaçlar için ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	Pisagor Bulanık Sayılar: {[üyelik derecesi],[üye olmama derecesi]} {[μ_L, μ_U],[ν_L, ν_U]}		
	X1	X2	X3
X1	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.290, 0.410],[0.590, 0.710]}	{[0.330, 0.440],[0.560, 0.670]}
X2	{[0.590, 0.710],[0.290, 0.410]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}	{[0.450, 0.550],[0.450, 0.550]}
X3	{[0.560, 0.670],[0.330, 0.440]}	{[0.450, 0.550],[0.450, 0.550]}	{[0.197, 0.197],[0.197, 0.197]}

Uzman görüşleri ve PBAHP yönteminin algoritma adımlarındaki fark matrisi (D), iç çarpım matrisi (S), belirleyici değer matrisi (T) ve normalizasyondan önceki ağırlık matrisine (t) ilişkin algoritmik hesaplamalar EK 9'da sunulmuştur. Son olarak, değerlendirme kriterlerinin normalleştirilmiş öncelik ağırlıkları, Bölüm 5.2.5'teki Eşitlik 5.42 kullanılarak hesaplanmıştır. PBAHP ile ağırlıklandırılmış kriterler Şekil 6.7'deki gibidir. Şekil 6.7'den de görüleceği üzere kriter ağırlıkları sırasıyla işletme güvenliği için 0,4374, kârlılık için 0,3875 ve çevresel emisyonlar için 0,1750 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. PBAHP ile hesaplanmış kriterlerin ağırlıkları

Operasyonel amaçların önceliklendirilmesi

Enerji depolama amaçları

- Sistem dengeleme maliyetlerinin azaltılması (Y1): Elektrik enerjisi arz ve talebini dengede tutmak amacıyla yürütülen faaliyetler dengeleme mekanizmasını oluşturmaktadır. Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliğinde ele alındığı şekilde gün öncesi dengeleme ve gerçek zamanlı dengeleme eylemleri, piyasa katılımcılarının uzlaştırma dönemi bazında gün öncesi dengeleme ve ikili anlaşmalar kapsamında gerçekleştirdikleri alış/satışları, yük atma/alma teklifleri ve sisteme verdikleri/çektikleri uzlaştırmayı esas alır. Dolayısıyla, elektrik enerjisi miktarları dengelemeye katılabilecek üretim tesisleri için birçok maliyet kalemini kapsamaktadır.
- Spark spread (Y2): Birim elektrik satış fiyatı ile birim elektrik üretimi için kullanılan doğal gaz maliyeti arasındaki farktır. DGKÇS'nin spark spread değerinin pozitif olduğu zaman dilimlerinde çalışması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, santrallar dur-kalk maliyetleri nedeni ile spark spread değerinin negatif olduğu zaman dilimlerinde çalıştığında da ekonomik olabilir. Özetle, DGKÇS'nin ekonomik değeri göz önüne alındığında bu değer bir üst limit hesaplamasına olanak tanır.
- Operasyonel verimlilik (Y3): Fosil yakıtlı santralların yenilenebilir enerji kaynakları ile rekabet edebilmesi çalışma rejimlerindeki çevikliğe bağlıdır. Aynı şekilde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli çalışma rejimleri şebekede dengesizliğe sebebiyet vermektedir. Bu durum fosil yakıtlı santrallara oldukça önemli bir görev atfetmiştir. Buna ek olarak, çoğunlukla baz yükte çalışan DGKÇS'nin serbest piyasaya dahil olması çalışma rejimlerindeki esnekliğe olan ihtiyacı artırmıştır. Bununla birlikte, operasyonel esnekliğin ekonomik kârlılık sağlaması da önemli bir hedeftir.
- Emre amadelik (Y4): Emre amadelik faktörü, bir elektrik üretim santralının elektrik üretebileceği zaman miktarının, toplam zamana bölünmesi ile bulunan ve santralin işletme performansını gösteren bir parametredir. Çoğunlukla, elektrik üretim kuruluşları için işletme ve yönetsel kalitenin de bir göstergesidir. Ayrıca şebeke ve elektrik piyasaları göz önüne alındığında, düzenlemeye tabi olan ikili anlaşmalarda yer alan hususların da karşılanması

hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda arz güvenliğini sağlamak için puant talebi karşılayacak ve yeterli yedek tutulmasına imkân verecek üretimin emre amade olması gereklidir.

- *Sera gazı emisyonları (Y5)*: Fosil enerji kaynakları (petrol, doğal gaz ve kömür gibi) reaksiyona girdiklerinde ortama kirletici ve zararlı unsurlar ve sera gazı bırakırlar. Doğal gaz, petrol ve kömürden daha temiz bir yakıttır. Bunun sebebi, yanma reaksiyonu sonucunda daha az karbondioksit, nitrojenoksit ve kükürt dioksit oluşumudur. Partikül madde oluşturmaması diğer bir avantaj olmasına rağmen yanmadan havaya karışırsa diğer fosil yakıtlara göre 20 kat daha fazla karbondioksit üretimi gerçekleştirir. Dolayısıyla, insana ve çevreye olan olumsuz etkileri azaltmak hayati derecede önemli bir gerekliliktir.

Uzman ekipten enerji depolama amaçlarını her bir kriter açısından değerlendirmeleri istenmiştir. Bu değerlendirmeleri yapabilmek için Çizelge 5.4'teki dilsel değişkenler kullanılmıştır. Bu aşamada, Çizelge 5.4'te de verilmiş olan dil değişkenleri, onlara karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Bu dönüşümlerin yapıldığı uzman görüşleri EK 10'da sunulmuştur. Bu değerlendiricilerin puanlandırmalarındaki öznel farklılık, Bölüm 5.2.6'nın 1. adımında belirtildiği gibi karar matrisine çevrilmiştir. Algoritma adımları takip edildiğinde, PBAHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları PBTOPSIS yöntemi için hesaplamaya dahil edilmiştir. Oluşturulan karar matrisi Çizelge 6.9'da verilmiştir. Bu aşamadan sonrası için Bölüm 5.2.6'da verilen adımlar takip edilmiştir. Sonuç olarak, enerji depolama amaçlarının hesaplanan yakınlık indeksleri ve sıralamalar Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.9. PBTOPSIS için uzman değerlendirmeleriyle oluşturulmuş karar matrisi

Karar Matrisi	Pisagor Bulanık Sayılar: {[üyelik derecesi],[üye olmama derecesi]} {[u,v]}		
	X1	X2	X3
Y1	{[0.500, 0.796]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.250, 0.920]}
Y2	{[0.560, 0.734]}	{[0.600, 0.710]}	{[0.550, 0.755]}
Y3	{[0.370, 0.880]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.400, 0.870]}
Y4	{[0.580, 0.728]}	{[0.400, 0.870]}	{[0.450, 0.835]}
Y5	{[0.250, 0.920]}	{[0.250, 0.920]}	{[0.400, 0.870]}

Çizelge 6.10. Pozitif ve negatif ideal çözümler

	X1			X2			X3		
x^+	0,58	0,73	0,37	0,60	0,71	0,37	0,55	0,76	0,36
x^-	0,25	0,92	0,30	0,25	0,92	0,30	0,25	0,92	0,30

Çizelge 6.11. Amaçların önceliklendirilmesi için hesaplanan PBTOPSIS yakınlık $\xi(X_i)$ değerleri

Alternatifler	$D(X_i, X^+)$	$D(X_i, X^-)$	$\xi(X_i)$	Sıralama
Sistem dengeleme maliyetlerinin azaltılması (Y1)	0,1252	0,1870	-30,7819	2
Spark spread (Y2)	0,0040	0,3107	0,0000	1
Operasyonel verimlilik (Y3)	0,2258	0,0935	-56,2753	4
Emre amadelik (Y4)	0,1599	0,1558	-39,5595	3
Sera gazı emisyonları (Y5)	0,2775	0,0378	-69,4223	5

6.5.2. DGKÇS'ye Entegrasyon İçin BEDS Seçimi

DGKÇS'nin çalışma rejimlerine uyum sağlayabilecek ve teknolojik yeterliliğe sahip BEDS'in her bir amaç için değerlendirilmesi bu çalışmanın ikinci fazını oluşturmaktadır. Bu kapsamda, takip eden bölümlerde Çizelge 6.11'deki sonuca göre her bir operasyonel amaç için BEDS seçimi ayrıntılarına yer verilmiştir. Bu entegrasyon için BEDS seçimine yönelik değerlendirme kriterleri ve tanımları Çizelge 6.12'deki gibidir.

Çizelge 6.12. BEDS seçimi için değerlendirme kriterleri ve tanımları

Ana Kriter	Alt Kriter	Birim	Tanım
Çevresel etki (C1)	Ekosistem üzerindeki hasar (C11)	kWh ¹	Belirli bir alanda belirli bir süre boyunca (yıl) karasal, tatlı su ve deniz türlerinin kaybına dayanır.
	İnsan sağlığı üzerindeki hasar (C12)	kWh ¹	Özürüllüğe göre ayarlanmış yaşam yılları (DALY) kavramını kullanır. Bir hastalığın DALY'si (her yıl), çeşitli kanser türleri dahil olmak üzere kaybedilen ve sakatlanan yaşam yıllarındaki bulaşıcı ve bulaşıcı olmayan hastalıkların insan sağlığı üzerindeki etkisinin bir istatistiğidir.
	Kaynak kullanılabilirliği üzerindeki hasar (C13)	kWh ¹	İnsanlığın gelecek nesiller için kaynaklarının tükenme riskini açıklar. Kaynakların jeolojik dağılımını ve ekstraksiyon maliyetinin marjinal artışını (\$) içerir
Ekonomik etki (C2)	Yatırım maliyeti (C21)	€/kWh	Bir teknolojinin kullanılmasındaki ekonomik büyüklüğü ifade eder. Ekipman alımı, montajı, yol yapımı, mühendislik hizmetleri vb. ile ilgili proje uygulama aşamasındaki tüm maliyetleri içerir. Her depolama teknolojisinin farklı maliyet yapıları ve dengeleri vardır. CAES ve PHS güç (€/MWh) ile gösterilirken, batarya depolaması için (€/kWh) dikkate alınır. İlk yatırım maliyetleri, bataryaların nominal güç ve kapasiteye özgü maliyetlerine dayanmaktadır.
	Yaşam döngüsü maliyeti (C22)	€/kWh	Batarya yaşam döngüsü maliyetleri, mevcut değerlerin, depolama biriminin tüm yaşam süresi boyunca yıllık eşdeğer nakit akışlarına dağıtıldığı yıllık gelir yöntemi kullanılarak hesaplanır.
	Güç sermaye maliyeti (C23)	\$/kW	Depolama sisteminin nominal güç çıkışının birim başına toplam sermaye maliyeti olarak tanımlanır
Teknolojik yön (C3)	Teknolojik performans (C31)	%	Teknoloji performansı, enerji depolama teknolojilerinin ortak teknik özellikleri ile ilgilidir. Depolama ile ilgili teknolojik özellikleri (Verimlilik, Güç ve enerji yoğunluğu, çevrim ve çevrim ömrü) kavramlarını içerir.
	Teknolojik olgunluk (C32)	Derece	Yenilikçi teknolojilerin kullanımı genellikle olgun teknolojilere ilişkin daha yüksek belirsizlik ve maliyetlerle ilişkilidir. Bir yandan, teknolojik yenilik, şirketin büyümesi için bir önkoşuldur, ancak diğer yandan şirketler, çeşitli şekillerde, istikrarlı bir durumu korumak için değişikliğin önlenmesine de çalışmaktadır. Bu teknolojilerin ve kurulu birim verilerinin olgunluk derecesi olarak da tanımlanabilir. Bir teknolojinin geçmiş performansını (track-record) küresel kapasite ve teknolojik yaşam aşamaları çerçevesinde incelemektir.

¹Yaşam döngüsü envanteri (LCI) kaynakları ve etki faktörleri, üretilen depolamanın kWh başına gücünü gösterir. Ayrıca tüm ayrıntılar için [18]bakın.

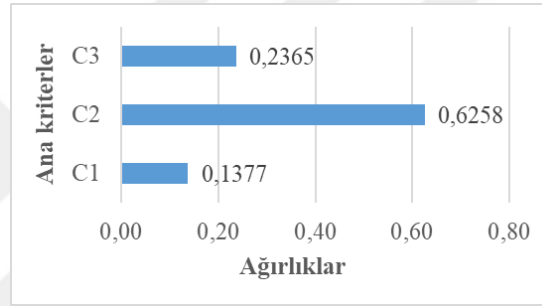
Sistem dengeleme maliyetlerinin azaltılması (Y1) için BEDS seçimi

Uygulama amaçlarından ikinci sırada önemli olan operasyonel amaç için ana değerlendirme kriterlerinin Pisagor bulanık dil ölçeği baz alınarak oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.13'teki gibidir.

Çizelge 6.13. Y1 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,28	0,59	0,69	0,34	0,46	0,54	0,66
C2	0,59	0,69	0,18	0,28	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,78	0,23	0,35
C3	0,54	0,66	0,34	0,46	0,24	0,36	0,64	0,76	0,20	0,20	0,20	0,20

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları takip edilerek elde edilen ağırlıklar ise Şekil 6.8’deki gibidir. Yöntem adımlarının ara hesaplamaları EK 11’de sunulmuştur.



Şekil 6.8. Y1 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları

Sonuçlar göstermektedir ki, Y1 operasyonel amacı için C2 (ekonomik etki) kriteri 0,6258 değeri ile en önemli ana kriterdir. Devamında C3 (teknolojik yön) kriteri 0,2365 değeri ile ikinci önem derecesine sahiptir. C3 (çevresel etki) kriteri ise, Y1 amacına göre 0,1377 değeri ile son sırada yer almaktadır.

Benzer şekilde alt kriterlerin yerel ağırlıklarının hesaplanmasında PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yerel ağırlıkların hesaplanmasına ait algoritma adımları EK 12 – EK 14’te sunulmuştur. Bu değerlendirmelerde de uzman görüşleri alınmıştır. Yerel ağırlıklar ana kriter ağırlıkları ile çarpılarak alt kriterlerin her birisi için global ağırlıklar elde edilmiştir. Çizelge 6.14’teki global ağırlıkların hesaplaması şu şekildedir: C11 kriterine ait 0,2657 yerel ağırlığı, C1 ana kriterine ait 0,1377 değeri ile çarpıldığında, C11 kriterinin global ağırlığı (0,0366) elde edilmiş olur. Y1 amacıyla

değerlendirme kriterlerinin ağırlıklarının hesaplama sonuçları Çizelge 6.14'teki gibidir.

Çizelge 6.14. Y1 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları

Kriterler	Yerel Ağırlıklar	Yerel Sıralama	Global Ağırlıklar	Global Sıralama
C1	0,1377			
C11	0,2657	2	0,0366	7
C12	0,6236	1	0,0859	5
C13	0,1106	3	0,0152	8
C2	0,6258			
C21	0,3294	2	0,2061	2
C22	0,4830	1	0,3023	1
C23	0,1876	3	0,1174	4
C3	0,2365			
C31	0,6539	1	0,1547	3
C32	0,3461	2	0,0819	6

DGKÇS'de 5 farklı koşul göz önüne alınarak enerji depolama entegrasyonu yapılabilmesi için BEDS alternatifleri dikkate alınmıştır. Bu teknolojilere ait güncel veriler Çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15. BEDS'e ait güncel veriler

Alternatifler /Kriterler	Çevresel Etki			Ekonomik Etki			Teknolojik Yön	
	Ekosistem üzerindeki hasar [18]	İnsan sağlığı üzerindeki hasar [18]	Kaynak kullanılabilirliği üzerindeki hasar [18]	Yatırım maliyeti [143]	Yaşam döngüsü maliyeti [18]	Güç sermaye maliyeti [143]	Teknolojik performans [18]	Teknolojik olgunluk [18]
A1 Li-ion	5,75 ^{a,b}	9,25 ^{a,b}	8,25 ^{a,b}	1300	30 ^{a,b}	2900	0,367 ^{a,b}	7,80
A2 VRLA	1,15	5,23	9,71	300	72	450	0,226	9,40
A3 NaS	2,08	5,30	6,39	340	41	1850	0,325	7,90
A4 NaNiCl ₂	1,18	7,74	7,13	350	33	350	0,283	7,70
A5 VRFB	4,54	29,44	15,11	790	31	1050	0,291	7,17

^a: Her türdeki Li-ion tipleri dikkate alınmıştır. (LFP, NCA, LTO, NMC)

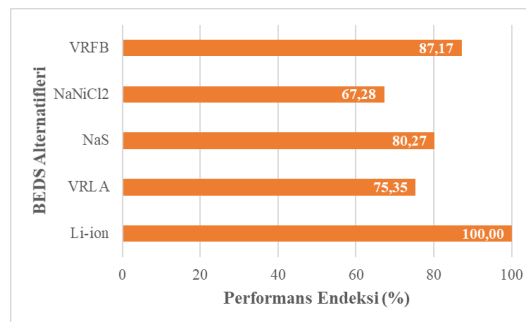
^b: Kaynakta bulunan Li-ion batarya türleri için hesaplanan değerlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır [18].

Bu veriler kullanılarak her bir amaca yönelik sıralama elde edilebilmesi ve problemin çok kriterli karar verme yöntemlerine uygulanabilmesi için 0-10 arasındaki değerleri içeren bir skalaya göre dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Dönüştürme yapılırken en iyi değere 10 verilerek ve diğerlerinin buna göre oranlaması yapılarak Çizelge 6.16'daki karar matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 6.16. BEDS seçimi için düzenlenen karar matrisi

Alternatifler /Kriterler	Çevresel Etki			Ekonomik Etki			Teknolojik Yön	
	Ekosistem üzerindeki hasar [18]	İnsan sağlığı üzerindeki hasar [18]	Kaynak kullanılabilirliği üzerindeki hasar [18]	Yatırım maliyeti [143]	Yaşam döngüsü maliyeti [18]	Güç sermaye maliyeti [143]	Teknolojik performans [18]	Teknolojik olgunluk [18]
A1 Li-ion	1	6	8	1	10	1	10	8
A2 VRLA	10	10	7	10	1	8	1	10
A3 NaS	6	9	10	9	7	2	9	9
A4 NaNiCl ₂	8	7	9	8	8	10	7	7
A5 VRFB	3	1	1	4	9	3	8	1

Çizelge 6.16'daki karar matrisi göz önüne alındığında Y1 amacı altında alternatiflerin sıralaması için Bölüm 5.1.1'de verilen COPRAS adımları izlenmiştir. Yönteme ait hesaplamalar EK 15'te sunulmuştur. Hesaplama sonucu Şekil 6.9'daki gibidir.



Şekil 6.9. Y1 amacı için BEDS sıralaması

Sonuç olarak, Y1 amacı için lityum-iyon (Li-ion) bataryalar en güçlü performansa sahip alternatif olmuştur. Vanadyum-redoks akış bataryaları (VRFB) %87,17 ile ikinci sırada yer almıştır. Sodyum sülfür (NaS) batarya %80,27 ile üçüncü sırada, %75,35 ile

valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) batarya dördüncü sıradadır. Son sıradaki alternatif ise, %67,28 ile sodyum-nikel klorür (NaNiCl_2) batarya olmuştur.

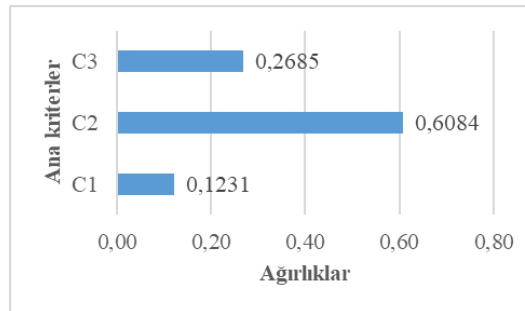
Spark spread (Y2) için BEDS seçimi

Uygulama amaçlarından kritik derecede önemli olan spark spread için ana değerlendirme kriterlerinin Pisagor bulanık dil ölçeği baz alınarak oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.17'deki gibidir.

Çizelge 6.17. Y2 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,24	0,63	0,73	0,30	0,43	0,57	0,70
C2	0,63	0,73	0,15	0,24	0,20	0,20	0,20	0,20	0,61	0,74	0,26	0,39
C3	0,57	0,70	0,30	0,43	0,26	0,39	0,61	0,74	0,20	0,20	0,20	0,20

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları takip edilerek elde edilen ağırlıklar ise Şekil 6.10'daki gibidir. Yöntem adımlarının ara hesaplamaları EK 16'da sunulmuştur.



Şekil 6.10. Y2 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları

Sonuçlar göstermektedir ki, Y2 operasyonel amacı için C2 (ekonomik etki) kriteri 0,6084 değeri ile en önemli ana kriterdir. Devamında C3 (teknolojik yön) kriteri

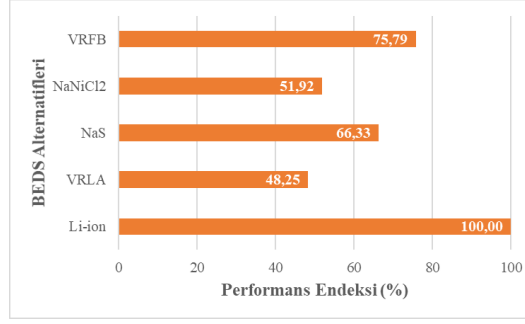
0,2685 değeri ile ikinci önem derecesine sahiptir. C3 (çevresel etki) kriteri ise, Y2 amacına göre 0,1231 değeri ile son sırada yer almaktadır.

Benzer şekilde alt kriterlerin yerel ağırlıklarının hesaplanmasında PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yerel ağırlıkların hesaplanmasına ait algoritma adımları EK 17 – EK 19’da sunulmuştur. Yerel ağırlıklar ana kriter ağırlıkları ile çarpılarak alt kriterlerin her birisi için global ağırlıklar elde edilmiştir. Çizelge 6.18’deki global ağırlıkların hesaplaması için Çizelge 6.14’teki değerleri elde etmek adına kullanılan adımlar takip edilmiştir. Y2 amacıyla değerlendirme kriterlerinin alt kriter ağırlıklarının hesaplama sonuçları Çizelge 6.18’deki gibidir.

Çizelge 6.18. Y2 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları

Kriterler	Yerel Ağırlıklar	Yerel Sıralama	Global Ağırlıklar	Global Sıralama
C1	0,1231			
C11	0,2791	2	0,0344	7
C12	0,5783	1	0,0712	6
C13	0,1426	3	0,0176	8
C2	0,6084			
C21	0,4160	1	0,2531	1
C22	0,2671	3	0,1625	4
C23	0,3168	2	0,1928	2
C3	0,2685			
C31	0,6539	1	0,1756	3
C32	0,3461	2	0,0929	5

Spark spread (Y2) amacı için BEDS sıralaması elde etmek adına Bölüm 5.1.1’de verilen COPRAS yöntem adımları izlenmiştir. COPRAS yöntemin karar matrisi için Çizelge 6.16 kullanılmıştır. Çizelge 6.16’daki karar matrisi göz önüne alındığında spark spread amacı altında alternatiflerin sıralaması Şekil 6.11’deki gibidir. Yönteme ait hesaplamalar EK 20’de sunulmuştur.



Şekil 6.11. Y2 amacı için BEDS sıralaması

Sonuç olarak, Y2 amacı için lityum iyon (Li-ion) bataryalar en güçlü performansa sahip alternatif olmuştur. Onu takip eden sırada vanadyum redoks akış bataryaları (VRFB) %75,79 ile ikinci sırada yer almıştır. Sodyum sülfür (NaS) batarya %66,33 ile üçüncü sırada, %51,92 ile sodyum-nikel klorür (NaNiCl₂) dördüncü sıradadır. Son sıradaki alternatif ise %48,25 ile valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) batarya olmuştur.

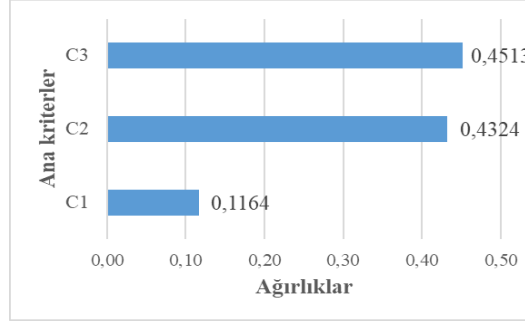
Operasyonel verimlilik (Y3) için BEDS seçimi

Uygulama amaçlarından dördüncü sırada önemli olan operasyonel verimlilik amacı için ana değerlendirme kriterlerinin Pisagor bulanık dil ölçeği baz alınarak oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.19'daki gibidir.

Çizelge 6.19. Y3 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,35	0,66	0,80	0,25	0,39	0,61	0,75
C2	0,66	0,80	0,21	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33	0,47	0,54	0,67
C3	0,61	0,75	0,25	0,39	0,54	0,67	0,33	0,47	0,20	0,20	0,20	0,20

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları takip edilerek elde edilen ağırlıklar ise Şekil 6.12'deki gibidir. Yöntem adımlarının ara hesaplamaları EK 21'de sunulmuştur.



Şekil 6.12. Y3 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları

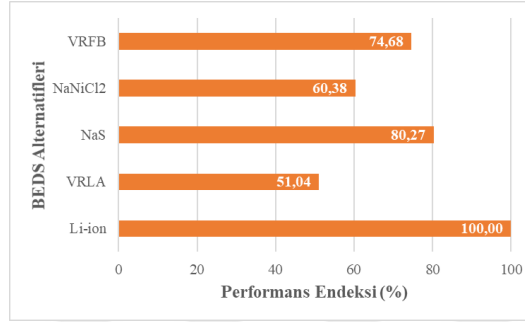
Sonuçlar göstermektedir ki, Y3 operasyonel amacı için C3 (teknolojik yön) kriteri 0,4513 değeri ile en önemli ana kriterdir. Devamında C2 (ekonomik etki) kriteri 0,4324 değeri ile ikinci önem derecesine sahiptir. C1 (çevresel etki) kriteri ise, Y3 amacına göre 0,1164 değeri ile son sırada yer almaktadır.

Benzer şekilde alt kriterlerin yerel ağırlıklarının hesaplanmasında PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yerel ağırlıkların hesaplanmasına ait algoritma adımları EK 22 – EK 24’te sunulmuştur. Yerel ağırlıklar ana kriter ağırlıkları ile çarpılarak alt kriterlerin her birisi için global ağırlıklar elde edilmiştir. Çizelge 6.20’deki global ağırlıkların hesaplaması için Çizelge 6.14’teki değerleri elde etmek adına kullanılan adımlar takip edilmiştir. Y3 amacıyla değerlendirme kriterlerinin alt kriter ağırlıklarının hesaplama sonuçları Çizelge 6.20’deki gibidir.

Çizelge 6.20. Y3 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları

Kriterler	Yerel Ağırlıklar	Yerel Sıralama	Global Ağırlıklar	Global Sıralama
C1	0,1164			
C11	0,3333	2	0,0388	7
C12	0,5764	1	0,0671	6
C13	0,0903	3	0,0105	8
C2	0,4324			
C21	0,2671	3	0,1155	5
C22	0,3168	2	0,1370	4
C23	0,4160	1	0,1799	2
C3	0,4513			
C31	0,6539	1	0,2951	1
C32	0,3461	2	0,1562	3

Operasyonel verimlilik (Y3) amacı için BEDS sıralaması elde etmek adına Bölüm 5.1.1’de verilen COPRAS yöntem adımları izlenmiştir. COPRAS yöntemin karar matrisi için Çizelge 6.16 kullanılmıştır. Çizelge 6.16’daki karar matrisi göz önüne alındığında Y3 amacı altında alternatiflerin sıralaması Şekil 6.13’teki gibidir. Yönteme ait hesaplamalar EK 25’te sunulmuştur.



Şekil 6.13. Y3 amacı için BEDS sıralaması

Sonuç olarak, Y3 amacı için lityum-iyon (Li-ion) bataryalar en güçlü performansa sahip alternatif olmuştur. Onu takip eden sırada sodyum-sülfür (NaS) %80,27 ile ikinci sırada yer almıştır. Vanadyum-redoks akış batarya (VRFB) %74,68 ile üçüncü sırada, %60,38 ile sodyum-nikel klorür (NaNiCl₂) dördüncü sıradadır. Son sıradaki alternatif ise, %51,04 ile valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) batarya olmuştur.

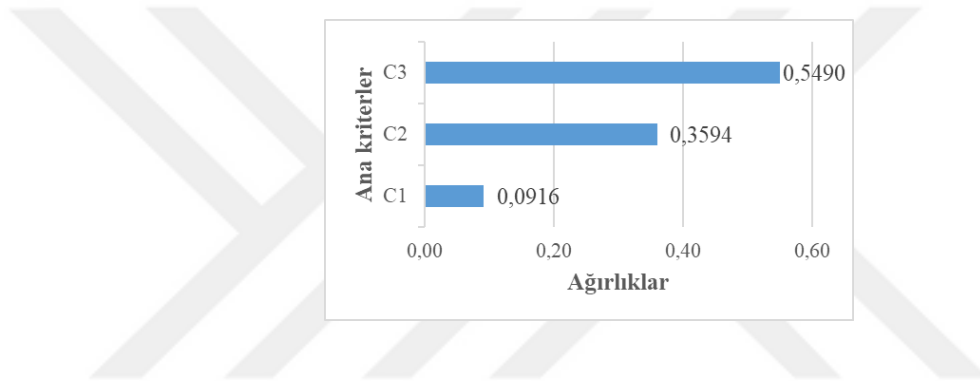
Emre amadelik (Y4) için BEDS seçimi

Uygulama amaçlarından üçüncü sırada önemli olan emre amadelik amacı için ana değerlendirme kriterlerinin Pisagor bulanık dil ölçeği baz alınarak oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.21’deki gibidir.

Çizelge 6.21. Y4 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,34	0,67	0,81	0,23	0,37	0,63	0,78
C2	0,67	0,81	0,19	0,34	0,20	0,20	0,20	0,20	0,22	0,34	0,67	0,78
C3	0,63	0,78	0,23	0,37	0,67	0,78	0,22	0,34	0,20	0,20	0,20	0,20

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları takip edilerek elde edilen ağırlıklar ise Şekil 6.14'teki gibidir. Yöntem adımlarının ara hesaplamaları EK 26'da sunulmuştur.



Şekil 6.14. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları

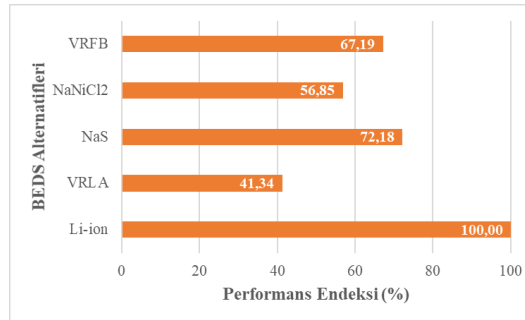
Sonuçlar göstermektedir ki, Y4 operasyonel amacı için C3 (teknolojik yön) kriteri 0,5490 değeri ile en önemli ana kriterdir. Devamında C2 (ekonomik etki) kriteri 0,3594 değeri ile ikinci önem derecesine sahiptir. C1 (çevresel etki) kriteri ise, Y4 amacına göre 0,0916 değeri ile son sırada yer almaktadır.

Benzer şekilde alt kriterlerin yerel ağırlıklarının hesaplanmasında PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yerel ağırlıkların hesaplanmasına ait algoritma adımları EK 27 – EK 29'da sunulmuştur. Yerel ağırlıklar ana kriter ağırlıkları ile çarpılarak alt kriterlerin her birisi için global ağırlıklar elde edilmiştir. Çizelge 6.22'deki global ağırlıkların hesaplaması için Çizelge 6.14'teki değerleri elde etmek adına kullanılan adımlar takip edilmiştir. Y4 amacıyla değerlendirme kriterlerinin alt kriter ağırlıklarının hesaplama sonuçları Çizelge 6.22'deki gibidir.

Çizelge 6.22. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları

Kriterler	Yerel Ağırlıklar	Yerel Sıralama	Global Ağırlıklar	Global Sıralama
C1	0,0916			
C11	0,3333	2	0,0305	7
C12	0,5764	1	0,0528	6
C13	0,0903	3	0,0083	8
C2	0,3594			
C21	0,4830	1	0,1736	3
C22	0,1876	3	0,0674	5
C23	0,3294	2	0,1184	4
C3	0,5490			
C31	0,6539	1	0,3590	1
C32	0,3461	2	0,1900	2

Emre amadelik (Y4) amacı için BEDS sıralaması elde etmek adına Bölüm 5.1.1’de verilen COPRAS yöntem adımları izlenmiştir. COPRAS yöntemin karar matrisi için Çizelge 6.16 kullanılmıştır. Çizelge 6.16’daki karar matrisi göz önüne alındığında Y4 amacı altında alternatiflerin sıralaması Şekil 6.15’teki gibidir. Yönteme ait hesaplamalar EK 30’da sunulmuştur.



Şekil 6.15. Y4 amacı için BEDS sıralaması

Sonuç olarak, Y4 amacı için lityum iyon (Li-ion) bataryalar en güçlü performansa sahip alternatif olmuştur. Onu takip eden sırada sodyum-sülfür (NaS) %72,18 ile ikinci sırada yer almıştır. Vanadyum-redoks akış batarya (VRFB) %67,19 ile üçüncü sırada,

%56,85 ile sodyum-nikel klorür (NaNiCl_2) dördüncü sıradadır. Son sıradaki alternatif ise, %41,34 ile valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) batarya olmuştur.

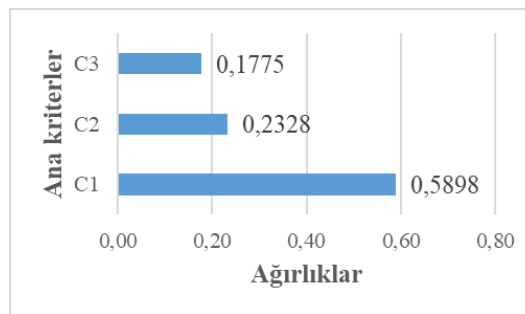
Sera gazı emisyonları (Y5) için BEDS seçimi

Uygulama amaçlarından beşinci sırada önemli olan sera gazı emisyonları amacı için ana değerlendirme kriterlerinin Pisagor bulanık dil ölçeği baz alınarak oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 6.23'teki gibidir.

Çizelge 6.23. Y5 amacına yönelik ana kriterlerin karşılaştırma matrisi

Ana Kriterler	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U	μ_L	μ_U	V_L	V_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,54	0,65	0,35	0,46	0,66	0,78	0,22	0,35
C2	0,35	0,46	0,54	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,54	0,39	0,48
C3	0,22	0,35	0,66	0,78	0,39	0,48	0,45	0,54	0,20	0,20	0,20	0,20

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması için PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları takip edilerek elde edilen ağırlıklar ise Şekil 6.16'daki gibidir. Yöntem adımlarının ara hesaplamaları EK 31'de sunulmuştur.



Şekil 6.16. Y5 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan ana kriter ağırlıkları

Sonuçlar göstermektedir ki, Y5 operasyonel amacı için C1 (çevresel etki) kriteri 0,5898 değeri ile en önemli ana kriterdir. Devamında C2 (ekonomik etki) kriteri

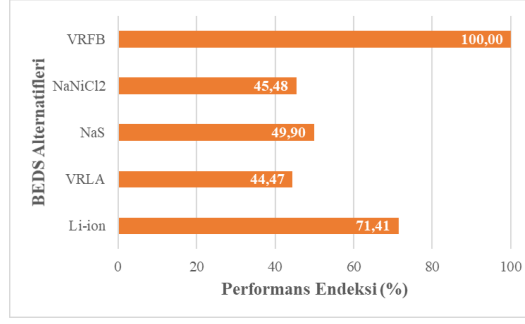
0,2328 değeri ile ikinci önem derecesine sahiptir. C3 (teknolojik yön) kriteri ise, Y5 amacına göre 0,1775 değeri ile son sırada yer almaktadır.

Benzer şekilde alt kriterlerin yerel ağırlıklarının hesaplanmasında PBAHP yöntemi kullanılmıştır. Bu değerlendirmelerde de uzman görüşleri alınmıştır. Yerel ağırlıkların hesaplanmasına ait algoritma adımları EK 32 – EK 34’te sunulmuştur. Yerel ağırlıklar ana kriter ağırlıkları ile çarpılarak alt kriterlerin her birisi için global ağırlıklar elde edilmiştir. Çizelge 6.24’teki global ağırlıkların hesaplaması için Çizelge 6.14’teki değerleri elde etmek adına kullanılan adımlar takip edilmiştir. Y5 amacıyla değerlendirme kriterlerinin alt kriter ağırlıklarının hesaplama sonuçları Çizelge 6.24’teki gibidir.

Çizelge 6.24. Y4 amacına yönelik PBAHP ile hesaplanan alt kriter ağırlıkları

Kriterler	Yerel Ağırlıklar	Yerel Sıralama	Global Ağırlıklar	Global Sıralama
C1	0,5898			
C11	0,3376	2	0,1991	2
C12	0,3998	1	0,2358	1
C13	0,2626	3	0,1549	3
C2	0,2328			
C21	0,3376	2	0,0786	6
C22	0,3998	1	0,0931	5
C23	0,2626	3	0,0611	8
C3	0,1775			
C31	0,3461	2	0,0614	7
C32	0,6539	1	0,1160	4

Sera gazı emisyonları (Y5) amacı için BEDS sıralaması elde etmek adına Bölüm 5.1.1’de verilen COPRAS yöntem adımları izlenmiştir. COPRAS yöntemin karar matrisi için Çizelge 6.16 kullanılmıştır. Çizelge 6.16’daki karar matrisi göz önüne alındığında Y5 amacı altında alternatiflerin sıralaması Şekil 6.17’deki gibidir. Yönteme ait hesaplamalar EK 35’te sunulmuştur.



Şekil 6.17. Y4 amacı için BEDS sıralaması

Sonuç olarak, Y5 amacı için vanadyum-redoks akış batarya (VRFB) en güçlü performansa sahip alternatif olmuştur. Onu takip eden sırada lityum-iyon (Li-ion) %71,42 ile ikinci sırada yer almıştır. Sodyum-sülfür (NaS) batarya %49,90 ile üçüncü sırada, %45,48 ile sodyum-nikel klorür (NaNiCl₂) dördüncü sıradadır. Son sıradaki alternatif ise, %44,47 ile valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) batarya olmuştur.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmanın uygulama kısmında bahsedilen iki aşamada elde edilen sonuçların detaylı yorumlarına yer verilmiştir.

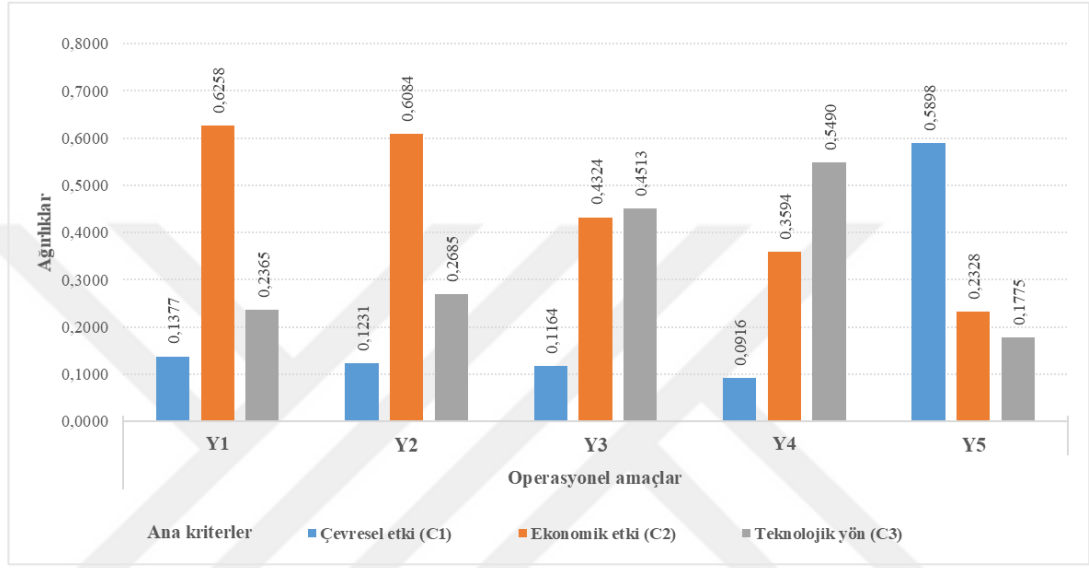
Çalışmanın uygulama kısmının 1. aşamasındaki BEDS'in ortak teknolojik performans değerlendirilmesi için önerilen PBAHP-PBTOPSIS modelinden elde edilen performans değerlendirme sonuçları kriterler ve alternatifler bazında sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir. Bu kapsamda bu çalışmanın birinci aşamasının genel çıkarımları aşağıdaki gibidir:

- BEDS'in elektrik piyasalarındaki dolaylı ve doğrudan etkisi, diğer fosil tabanlı teknolojiler ile rekabet içerisinde olmasını sağlamıştır. Bu rekabetin bataryalar için aşılabilmesi, elektrik depolama maliyetinin, fosil tabanlı teknolojiler ile üretilen elektrik üretim maliyetlerine eşit olduğunda ancak mümkündür [106]. Diğer bir yandan, bataryaların uzun bir raf ömrüne sahip olması (en az 15 yıldan uzun) ve döngü ömürlerinin (4000 derin döngüye kadar) yüksek olması bu rekabeti batarya depolamasının lehine çevirmiştir. Çalışmada da uzman ekip tarafından teknoloji performans kriterlerinin değerlendirilmesi sonucu olarak, bataryaların ekonomik ömürleri en önemli kriter (0,3228) olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, bataryaların güvenliği ve güvenilirlikleri elektrokimyasal yapıları gereği kontrol edilmesi gereken temel faktörlerdir [112]. Sıcaklık limitlerinin aşılması, mevcut enerjinin hızlı ve kontrolsüz bir şekilde serbest bırakılması bir patlama veya verimsiz bir deşarj ile sonuçlanabilir. Dolayısıyla enerji oranı/deşarj süresi uzman görüşleri alınarak ikincil önceliğe (0,2913) sahip olmuştur. Bunlara ek olarak, bataryaların maksimum güç yoğunluğu ve enerji dönüştürme verimliliğine (gidiş-dönüş verimliliği) ulaşabilmesi ve bataryaların şarj/deşarjlarının akım sınırlayıcı görevlerini yapabilmeleri için DC/AC veri yolu ile güç elektronik dönüştürücüsü tasarlanmalıdır [106]. Bu tasarım birçok zorluğu içermesinden dolayı, uzman görüşleri ve önerilen metodoloji kullanılarak öncelikleri son sırada yer almıştır.

- 1. aşamada sunulan kapsamlı çerçeve göstermektedir ki, günümüzde en hızlı büyüyen ve en umut verici forma sahip batarya lityum-iyon bataryalardır. Birçok varyasyonu olan bu bataryalarda yüksek enerji yoğunluğu, hafıza bulundurmaması, programlanmış döngü gerektirmemesi ve nispeten düşük kendi kendine deşarj oranı bu bataryayı diğer bataryalardan ayıran teknik özelliklerdir [144]. Bu nedenledir ki, önerilen yöntem dahil olmak üzere karşılaştırmalı analizler ve duyarlılık analizindeki sonuçlara göre, uzman görüşleri ve gerçek hayatla tutarlı olarak birinci sırada yer almaktadır (Şekil 6.5). Bu çalışmanın diğer bir sonucu ise, yıllardır yedek batarya olarak trafo merkezlerinde kullanılan ve şebekedeki güvenilir çalışmayı sağlayan kurşun-asit bataryaların ikinci sırada yer almasıdır. Düşük enerji ve güç yoğunluğundan mustarip olan bu bataryaların ilave aktif karbon ile küçük deşarj derinlikleri için çevrim ömürlerinin arttırılması sağlanmıştır [38]. Bu durum göstermektedir ki, önerilen modelde teknolojik performans açısından ikinci sırada yer alması gerçek hayatla da tutarlıdır. Bunlara ek olarak dikkat çekici bir diğer sonuç, karşılaştırmalı analizlerde de 4 ve 5. sırada yer alan yüksek sıcaklıklı bataryalardır. Sodyum-sülfür ve sodyum-nikel klorür bataryalar, elektrokimyasal formları itibari ile düşük iç direnç ve yüksek iletkenlik gibi diğer oda sıcaklığındaki kimyasallara göre avantajlıdırlar. Bu durum, yüksek güç üretme kabiliyeti ve yüksek dönüştürme verimliliği sağlamaktadır. Ancak bu avantajlar, bataryaların çalışma sıcaklıklarında tutulması şartı sağlandığında geçerlidir. Dolayısıyla, bataryaların sıcaklıklarının düşürülmesi (özellikle sodyum sülfür batarya) kimyasal formlarındaki aktif maddelerinin donmasına sebebiyet verecektir. Bu durum ise, ekonomik ömürlerinin ve yaşam döngülerinin en az 15 yıla düşmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, önerilen metodoloji ve uygulama sonuçlarının test edildiği karşılaştırmalı analizler ve duyarlılık analizlerinde bu bataryalar performans kriterlerinin etkisi sebebiyle son sıralarda yer almaktadırlar.

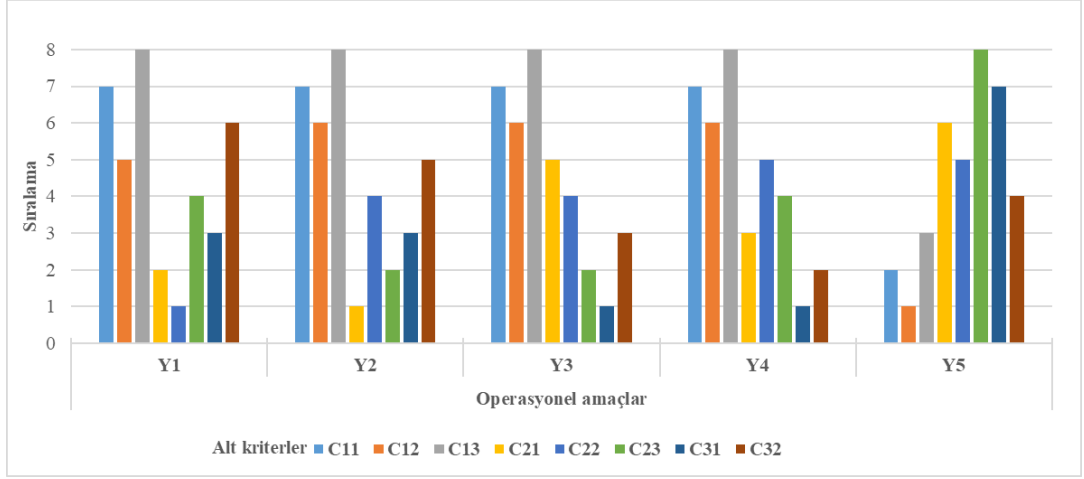
DGKÇS'ye operasyonel esneklik kazandırmak için BEDS entegrasyonu değerlendirmesi 2. aşamada ele alınmıştır. Bu doğrultuda, DGKÇS'ye hangi amaç ile hangi batarya enerji depolama sisteminin entegre edilebileceği sorusuna yanıt aranmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak santralda operasyonel verimlilik artırımı

için birçok birbiriyle çatışan amaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu amaçların önceliklendirilmesi için PBAHP-PBTOPSIS yöntemleri kombine bir şekilde kullanılmıştır. Ardından, her bir operasyonel amaca yönelik BEDS seçimi yapılabilmesi için PBAHP-COPRAS kombinasyonu önerilmiştir. Her bir amaç altında ana kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıklandırılması sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Ana kriterlerin farklı operasyonel amaçlardaki ağırlıkları

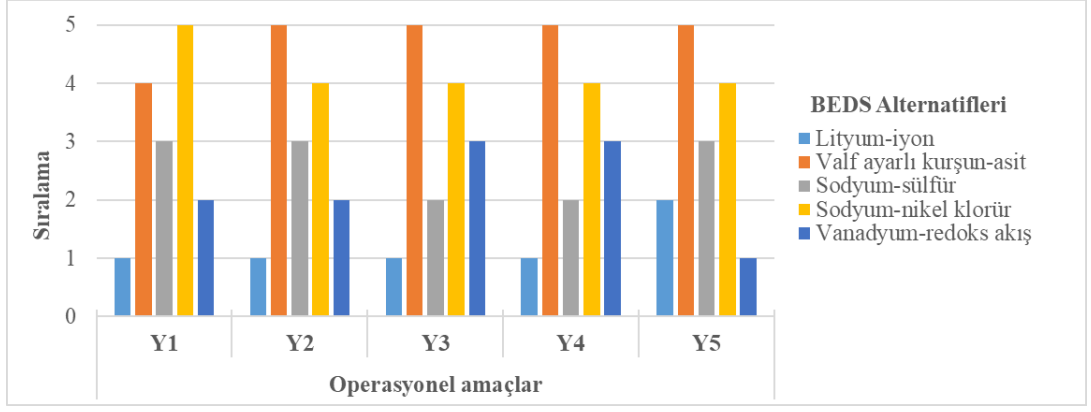
Şekil 7.1’e göre ana kriterlerden çevresel etki kriteri 4 uygulama amacı içerisinde sadece sera gazı emisyonları (Y5) amacında ilk sıradadır. Bunun temel sebebi, uygulama amaçlarının ekonomik ve teknolojik yeterlilik gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, doğrudan ekonomik getiri sağlanması amacıyla tanımlanan Y2 ve Y1 amaçlarında, ekonomik etki kriteri ilk sırada yerini almıştır. Sonuç olarak, operasyonel esnekliğin hem teknolojik hem de ekonomik açıdan ele alınması gereken önemli bir problem olduğu bu çalışma ile kanıtlanmıştır.



Şekil 7.2. Alt kriterlerin farklı operasyonel amaçlardaki sıralaması

Şekil 7.2'ye göre DGKÇS'de farklı operasyonel amaçlar için ilk sırada çoğunlukla teknolojik yön ana kriterine bağlı alt kriterler ilk sırada yer almıştır. Bu alt kriterlerden teknolojik performans alt kriterinin (C31) ilk sırada olması, BEDS'in yeterliliğini göz önünde bulundurmasından kaynaklıdır. Buna ek olarak, santralda ekipman sağlığına pozitif etki sağlayabilecek bir teknolojinin yeterliliği ekonomik getiriden daha önemlidir. Bu durum, santral için bir diğer amaç olan emre amadeliği de etkilemektedir.

Son olarak, BEDS'in DGKÇS'ye farklı koşullar söz konusu olduğundaki diğer bir deyişle her bir operasyonel amaç için hesaplanan entegrasyon sıralamaları Şekil 7.3'te verilmiştir. Şekil 7.3'e göre Y5 operasyonel amacı haricinde diğer tüm amaçlar için lityum-iyon bataryalar ilk sırada yer almaktadır. Valf ayarlı kurşun-asit bataryalar ise, Y1 amacı haricindeki diğer tüm koşullarda son sırada hesaplanmıştır. Bu istikrarlı konumu sodyum-nikel klorür bataryalar da korumaktadır.



Şekil 7.3. DGKÇS’de operasyonel esneklik için BEDS sıralaması

8. ÇIKARIMLAR

Sunulan kapsamlı araştırma, büyük ölçekli konvansiyonel santrallarda enerji depolama teknolojisinin entegrasyonunun araştırılması ve enerji sistemlerindeki ihtiyaçlara göre seçiminde, gelecek projeksiyonlarının nasıl görüneceğine dair birçok beklentiyle çatışan ve yüksek belirsizlik altında karmaşık bir karar sorunu oluşturduğu hipotezine dayanmaktadır. Bu kavramsal çerçeve, günümüzde sağladığı yatırım faydaları, hızlı tepki ve yükselen ticarileşme potansiyelinin yanı sıra modülerleşme ile karakterize olan batarya enerji depolama sistemleri ile daraltılmıştır. Bunun temel sebebi, bataryaların başarılı birçok teknik geliştirmelerinin, gelecek için oldukça önemli bir potansiyeli işaret ettiği dünya çapındaki operasyonel ve büyük ölçekli kullanımları ile de kanıtlanmış olmasıdır [27]. Bir diğer kanıt ise, yeni bataryaların verimliliği, güç ve enerji yoğunlukları, çevrim ömrü gibi ortak teknik parametrelerinin önemli ölçüde iyileştirilmiş olmasıdır. Bununla birlikte, batarya sistemi sağladığı bu faydaların yanı sıra esnek kurulum kolaylığı ve kısa kurulum süresi ile ilişkilendirildiğinde şebeke enerji depolama sistemlerinin vazgeçilmez unsuru olmaya adaydır. Dolayısıyla, bu çalışmanın bahsedilen motivasyonuna dayanarak ve literatürden bilindiği kadarıyla bu tezin sunduğu katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Uygulama alanı: Türkiye’deki elektrik ticareti ve organize piyasalar göz önüne alındığında rüzgâr ve güneş enerjisi paylarının yüksek olması konvansiyonel santralların kapasite kullanım oranlarını büyük oranda düşürmektedir. Bu durum, santralların kârlılıklarını da olumsuz anlamda etkilemektedir. Dolayısıyla, konvansiyonel santrallara operasyonel esneklik kazandırılması piyasalardaki baskıyı azaltacaktır. Bu bağlamda, doğal gaz kombine çevrim santralına elektrokimyasal enerji depolamasının entegre edilmesi seçeneği bir alternatif olarak düşünülebilir. Elektrokimyasal enerji depolamasındaki ikincil ve akış bataryaların (çinko-brom batarya hariç) spesifik teknoloji değerlendirmesi ve santral entegrasyonu yüksek belirsizlik içeren karmaşık bir karar sorunudur. Önceki çalışmalardan bilindiği kadarıyla, nadiren uygulama alanı olarak seçilen batarya enerji depolamasının büyük ölçekli (özellikle DGKÇS) santrallara entegrasyonunun bu amaç altında uygulama kapsamının belirlenmesi, çalışmanın literatüre katkı sağlayacağını kanıtlar niteliktedir.

- Uygulanabilirlik ve metodoloji: Sürdürülebilir enerji sistemlerinde önemli bir rolü olan doğal gaz kombine çevrim santrallerinin batarya enerji depolama teknolojilerinin teknik gelişimi ile birleştirilebilmesi, kesintisiz enerji arzına ivme kazandırmaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi bu problem, yüksek belirsizlik ve birbiriyle çatışan kriterleri içermektedir. Dolayısıyla, ileriye dönük bir karar verme problemi göz önüne alındığında, nicel verilerle ilişkilendirilmiş olası geliştirmeler (varyasyonlar, rastgelelik gibi) ve nitel verilerle ilişkilendirilmiş epistemik belirsizlikler (parametreleştirmedeki bilişsel sınırlamalar gibi) karar verme sürecine dahil edilmelidir. Buna izin veren aralık değerli Pisagor Bulanık dil ölçeği, karar verme algoritmalarından sıklıkla kullanılan AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sentezlenerek kullanılmıştır. Bu sayede, belirsizlik ortamında hem karar vermeyi kolaylaştıran hem de tutarlı sonuçlara ulaştıran karar verme algoritmalarının 1. aşamadaki uygulamada spesifik teknoloji parametrelerinin önceliklendirilmesi ve alternatiflerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılması, literatürdeki bahsedilen boşlukları dolduracak niteliktedir. Buna ek olarak, doğal gaz kombine çevrim santralleri enerji sisteminde birçok farklı şebeke hizmeti için kullanılmaktadır. Bu operasyonel amaçlarının önceliklendirilmesi ve amaçlara yönelik hızla gelişen ve sürdürülebilir enerji sistemlerine ivme kazandıran batarya depolama teknolojilerinin santral çalışma rejimlerine göre sıralanması, COPRAS yönteminin maliyet ve fayda kriterlerine dayalı karmaşık orantılı değerlendirme avantajı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemin önerilen metodolojiye uygunluğu ise, aynı anda en kötü ve en iyi sonuçların oranını hesaplayabilme kabiliyetinin olmasındandır. Dolayısıyla, önerilen metodolojinin çok yönlülüğü literatürdeki bahsedilen boşluklara ışık tutacak niteliktedir.
- Değerlendirme: Sürdürülebilir teknolojilerin enerji sistemlerindeki yerinin toplum temelli düşünme ve öğrenme süreçleriyle sentezlenmesi, probleme ilişkin uzun vadeli bir bakış açısı sunacaktır. Dolayısıyla, akademik ya da akademik olmayan aktörlerin aktif olarak araştırmaya dahil edilmesi inovasyon süreçlerini anlamak, entegrasyonun gerekliliği hakkında bilgi edinmek ve BEDS'in bir dizi teknolojik karakterizasyonunu belirlemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada da alternatiflerin analiz edilmesi için kriterlerin değerlendirilmesinde doğrudan teknolojinin geliştirilmesinde yer alan karar vericilerin (Enactor) ve dolaylı etki sağlayan seçicilerin (Selector) görüşleri dikkate alınmıştır. Bu sayede, teknolojik

parametreleri içeren bir dizi kriter içerisinde en kritik olanlarının problem kapsamına dahil edilmesi, algoritma çözümlerinde de önemli bir sadeleştirmeyi ve zaman karmaşıklığındaki minimizasyonu kritik derecede etkilemiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, entegrasyonun kapsamlı araştırılması ve teknik rejimlerinin paydaş görüşleri ile değerlendirilmesi, bilimsel ve toplumsal uygulamalar için çözüm odaklı, sosyal ve sağlam bilgi oluşturulması açısından literatüre önemli katkılar sunacağına işaret etmektedir.

- Analiz: Çok kriterli karar verme yöntemlerine bağlı olarak, alternatiflerin çok benzer olduğu durumlarda farklı çözüm sonuçlarına ulaşılabilir. Bu nedendir ki, önerilen çok kriterli karar verme yaklaşımının geçerliliğini ve sonuçların doğruluğunu hesaplamak için karşılaştırmalı analize ihtiyaç vardır. Bu analiz, kullanılan yöntemlere uygunluk göstermesi açısından benzer matematiksel adımlara sahip algoritmalar ile yapılabilir [145]. Bu çalışmanın 1. aşamasında da PBAHP ile değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması ve bu ağırlıkların kullanılarak PBTOPSIS ile alternatiflerin sıralanması sağlanmıştır. Önerilen yaklaşımın geçerliliği sıralama algoritmalarından klasik bulanık küme setleri ile sentezlenmiş BTOPSIS ve BCOPRAS yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Bunun nedeni, BTOPSIS ve BCOPRAS yöntemlerinin aynı matematiksel prosedürleri içermesinden kaynaklanmaktadır. BTOPSIS yönteminin değerlendirme kriterlerini maliyet ve kâr olarak işaretleme özgürlüğü sunması, BCOPRAS yöntemi için yine aynı kriterleri faydalı ve faydasız olarak ayırt etmesi ile benzer mantığı içermektedir. Ayrıca, her iki algoritmada normalleştirme ve ağırlıklandırma prosedürleri bulunmaktadır. Son olarak, BTOPSIS yönteminin ideal çözüme negatif ve pozitif mesafelerinin hesaplanması ile BCOPRAS yönteminin maksimum minimum değerlerinin her bir alternatif için tercih sıralamasını yapmak her iki yöntemin de karşılaştırmalı olarak sunulmasına imkân vermektedir. Yapılan bu karşılaştırmalar, önerilen yöntemin geçerliliğini ve doğruluğunu analiz etmenin dışında, uzun vadede hangi karar verme algoritmalarının uygulanacağını seçmek konusunda karar vericiye kılavuz olmaktadır. Dolayısıyla, bu kılavuzun kapsamını duyarlılık analiz ile detaylandırmak yöntem çiftleri hakkında geniş bir bilgi sunmaktadır [146]. Bu amaç ile değerlendirme sürecindeki yüksek belirsizliği, önerilen hiyerarşik model ile aynı zamanda rasyonel kılmak literatüre önemli projeksiyon sunacaktır.

- Ekonomik fayda: Doğal gaz kombine çevrim santrallerinin birim elektrik satış fiyatı ile birim elektrik üretim fiyatı arasındaki farkın pozitif değer aldığı zaman dilimlerinde çalıştırılması en önemli amaçtır. Bunu, arz ve talebi dengeleme de önemli bir piyasa katılımcısı olması durumu takip etmektedir. Bu durum, sistem dengeleme maliyetlerinin azaltılmasının bir diğer önemli amaç olduğu sonucuna götürmektedir. Sadece bu iki önemli amaç dikkate alındığında dahi, dakikalardan saatlere varan uygulamalarda santral açısından ekonomik getiri sağlayabilecek modüler çözüm sunan BEDS'in santrale entegrasyonunun sağlanabilmesini çok yönlü ele almak bu çalışmanın önemli bir katkısıdır. Buna ek olarak, santrallar için emre amadelik faktörü, bir elektrik santralının elektrik üretebileceği zaman miktarının, toplam zamana bölünmesi ile bulunan ve santralin işletme performansını gösteren en önemli parametredir. Çoğunlukla, elektrik üretim kuruluşları için işletme ve yönetsel kalitenin de bir göstergesidir. Ayrıca, şebeke ve elektrik piyasaları göz önüne alındığında, düzenlemeye tabi olan ikili anlaşmalarda yer alan hususların da karşılanması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, arz güvenliğini sağlamak için puant talebi karşılayacak ve yeterli yedek tutulmasına imkân verecek üretimin emre amade olması gereklidir. BEDS, stratejik rezerv kaynağı olarak bu amaca hizmet edebilir ikame bir teknolojidir. Ayrıca, modern ve temiz enerji idolü ile küresel bir enerji dönüşümü içerisinde giren ülkelerde günümüzdeki elektrik arz fazlası ve Covid-19 salgınına bağlı yaşanan iktisadi durgunluğun orta vadede artış trendi yakalayacağı ve talebin hızlı bir şekilde yükseleceği öngörülmektedir [24,25]. Dolayısıyla elektrik sistemindeki yenilikçi yatırımlara olan ihtiyacın gerekliliği gün geçtikçe daha da gün yüzüne çıkmaktadır. En faydalı sonuçlar için bu yatırımların, doğru alanlara yönlendirilmesi ve burada objektif karar araçlarının kullanılması gerektiği, cevaplanmaya muhtaç bir soru olarak durmaktadır. Bu kapsamda, alınacak kararların enerji sistemi üzerindeki etkisinin yıllarca sürecektir olacağı unutulmamalıdır. Dolayısıyla, bu entegrasyonun ekonomik getirilerinin farklı koşullardaki santral işletmeciliği kolay olan doğalgaz kombine çevrim santralleri için kritik bir çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Sprake, Y. Vagapov, S. Lupin, A. Anuchin, Housing estate energy storage feasibility for a 2050 scenario. 2017 Internet Technol. Appl. 137–142, 2017.
- [2] T. Li, A. Li, X. Guo, The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry - A comprehensive analysis of MCDM methods, Energy. 212, 118694, 2020.
- [3] Turkey’s Erdogan announces discovery of large natural gas reserve off its Black Sea coast | Euronews, (y.y.). <https://www.euronews.com/2020/08/21/turkey-s-erdogan-announces-discovery-of-large-natural-gas-reserve-off-its-black-sea-coast> (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [4] Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim İstatistikleri: Temmuz 2020, Enerji. Portalı. (2020). <https://www.enerjiportali.com/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-istatistikleri-temmuz-2020/> (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [5] M.C. Kocer, C. Cengiz, M. Gezer, D. Gunes, M.A. Cinar, B. Alboyaci, A. Onen, Assessment of Battery Storage Technologies for a Turkish Power Network, Sustain. 11, 2019.
- [6] S. Briola, R. Gabbrielli, A. Delgado, Energy and economic performance assessment of the novel integration of an advanced configuration of liquid air energy storage plant with an existing large-scale natural gas combined cycle, Energy Convers. Manag. 205, 112434, 2020.
- [7] H. Gürbüz, E. Cömert, Bakım Planlama Faaliyetlerinde Tamsayılı Doğrusal Proglama ve Bir Uygulama, Karadeniz Sos. Bilim. Derg. 4, 101–122, 2012.
- [8] E.H. Özder, E. Özcan, T. Eren, Sustainable personnel scheduling supported by an artificial neural network model in a natural gas combined cycle power plant, Int. J. Energy Res. 44, 7525–75470, 2020.
- [9] Power blocks in natural gas-fired combined-cycle plants are getting bigger - Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA), (y.y.). <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=38312> (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [10] A. Bolt, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, A Critical Review of Synthetic Natural Gas Production Techniques and Technologies, J. Nat. Gas Sci. Eng. 103670,

2020.

- [11] M. Baumann, J. Peters, M. Weil, Exploratory Multicriteria Decision Analysis of Utility-Scale Battery Storage Technologies for Multiple Grid Services Based on Life-Cycle Approaches, *Energy Technol.* 1901019, 2019.
- [12] M. Çolak, İ. Kaya, Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey, *J. Energy Storage.* 28, 2020.
- [13] J. Figgenger, P. Stenzel, K.-P. Kairies, J. Linßen, D. Haberschusz, O. Wessels, G. Angenendt, M. Robinius, D. Stolten, D.U. Sauer, The development of stationary battery storage systems in Germany - A market review, *J. Energy Storage.* 29, 101153, 2020.
- [14] D.M. Davies, M.G. Verde, O. Mnyshenko, Y.R. Chen, R. Rajeev, Y.S. Meng, G. Elliott, Combined economic and technological evaluation of battery energy storage for grid applications, *Nat. Energy.* 4, 42–50, 2019.
- [15] J.R. Martinez-Bolanos, M.E.M. Udaeta, A.L.V. Gimenes, V.O. da Silva, Economic feasibility of battery energy storage systems for replacing peak power plants for commercial consumers under energy time of use tariffs, *J. Energy Storage.* 29, 101373, 2020.
- [16] M. Wesselmann, L. Wilkening, T.A. Kern, Techno-Economic evaluation of single and multi-purpose grid-scale battery systems, *J. Energy Storage.* 32, 101790, 2020.
- [17] M. Müller, L. Viernstein, C.N. Truong, A. Eiting, H.C. Hesse, R. Witzmann, A. Jossen, Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe, *J. Energy Storage.* 9, 1–11, 2017.
- [18] M.J. Baumann, Battery storage systems as balancing option in intermittent renewable energy systems - A transdisciplinary approach under the frame of Constructive Technology Assessment, Doctoral Thesis, Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [19] L.A. Zadeh, Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets Syst.* 100, 9–34, 1999.
- [20] K.T. Atanassov, Intuitionistic fuzzy sets, *Fuzzy Sets Syst.* 20, 87–96, 1986.
- [21] F. Smarandache, Neutrosophic set-a generalization of the intuitionistic fuzzy set, *Int. J. pure Appl. Math.* 24, 287, 2005.

- [22] V. Torra, Hesitant fuzzy sets, *Int. J. Intell. Syst.* 25, 529–539, 2010.
- [23] R.R. Yager, Pythagorean Membership Grades in Multicriteria Decision Making, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 22, 958–965, 2014.
- [24] SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2030 yılına doğru Türkiye'nin optimum elektrik üretim kapasitesi, 2020. https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/07/2030_yilina_dogru_Turkiyenin_optimum_elektrik_kapasitesi-.pdf (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [25] SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, COVID-19 Sonrası Türkiye Ekonomisinin Canlanması ve İyileşmesi için Enerji Dönüşümünün Sunduğu Fırsatlar, 2020. https://www.shura.org.tr/covid-19_sonrasi_turkiye_ekonomisinin_canlanmasi_ve_iyilesmesi_icin_enerji_donusumunun_sundugu_firsatlar/ (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [26] R. Çevik, Türkiye 2020 Elektrik İstatistikleri, <https://www.elektrikport.com/haber-roportaj/turkiye-2020-elektrik-istatistikleri/22927#ad-image-0> (Erişim tarihi: 21.11.20).
- [27] G. Huff, DOE Global Energy Storage Database., Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1240839>. (Erişim tarihi: 22.11.20)
- [28] E. Özcan, T. Eren, Application of TOPSIS Method for Maintenance Planning: Natural Gas Combined Cycle Power Plant Case Study, *Int. J. Eng. Res. Dev.* 6, 26–38, 2014.
- [29] F. Kremer, D. Remy, W. Merville, S. Rael, M. Urbain, Battery Energy Storage System Integration in a Combined Cycle Power Plant for the Purpose of the Angular and Voltage Stability. 84–94. Ed by: B. Németh, L. Ekonomou, Flexitranstore, Springer International Publishing, Cham, 2020.
- [30] Acwa Power Kırıkkale Natural Gas Combined Cycle Power Plant And Overhead Transmission Line Project, (2014). <https://www.ebrd.com/english/pages/project/eia/42896.pdf>.
- [31] M. Baumann, M. Weil, J.F. Peters, N. Chibeles-Martins, A.B. Moniz, A review of multi-criteria decision making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 107, 516–534, 2019.
- [32] G.J. May, A. Davidson, B. Monahov, Lead batteries for utility energy storage:

- A review, *J. Energy Storage*. 15, 145–157, 2018.
- [33] C. Acar, A. Beskese, G.T. Temur, A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems, *Int. J. Energy Res.* 43, 6419–6441, 2019.
 - [34] L. Li, P. Liu, Z. Li, X. Wang, A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems, *Comput. Chem. Eng.* 115, 213–225, 2018.
 - [35] A. Geetha, C. Subramani, A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles, *Int. J. Energy Res.* 41, 1817–1834, 2017.
 - [36] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, G. Pasaoglu, The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 89, 292–308, 2018.
 - [37] M. Krishna, E.J. Fraser, R.G.A. Wills, F.C. Walsh, Developments in soluble lead flow batteries and remaining challenges: An illustrated review, *J. Energy Storage*. 15, 69–90, 2018.
 - [38] J.F. Manwell, J.G. McGowan, Lead acid battery storage model for hybrid energy systems, *Sol. Energy*. 50, 399–405, 1993.
 - [39] C. Spanos, D.E. Turney, V. Fthenakis, Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 478–494, 2015.
 - [40] G.L. Soloveichik, Battery technologies for large-scale stationary energy storage., *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2, 503–527, 2011.
 - [41] L.T. Lam, R. Louey, N.P. Haigh, O. V Lim, D.G. Vella, C.G. Phyland, L.H. Vu, J. Furukawa, T. Takada, D. Monma, T. Kano, VRLA Ultrabattery for high-rate partial-state-of-charge operation, *J. Power Sources*. 174, 16–29, 2007.
 - [42] R. Guo, L. Zhao, W. Yue, Assembly of core-shell structured porous carbon-graphene composites as anode materials for lithium-ion batteries, *Electrochim. Acta*. 152, 338–344, 2015.
 - [43] J.-M. Tarascon, M. Armand, Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. 171–179. *Mater. Sustain. Energy*, Co-Published with Macmillan Publishers Ltd, UK, 2010.
 - [44] G.M. Koenig, I. Belharouak, H. Deng, Y.-K. Sun, K. Amine, Composition-

- Tailored Synthesis of Gradient Transition Metal Precursor Particles for Lithium-Ion Battery Cathode Materials, *Chem. Mater.* 23, 1954–1963, 2011.
- [45] J.-Z. Chen, W.-Y. Liao, W.-Y. Hsieh, C.-C. Hsu, Y.-S. Chen, All-vanadium redox flow batteries with graphite felt electrodes treated by atmospheric pressure plasma jets, *J. Power Sources.* 274, 894–898, 2015.
- [46] N. Pour, D.G. Kwabi, T. Carney, R.M. Darling, M.L. Perry, Y. Shao-Horn, Influence of Edge- and Basal-Plane Sites on the Vanadium Redox Kinetics for Flow Batteries, *J. Phys. Chem. C.* 119, 5311–5318, 2015.
- [47] X.-G. Yang, Q. Ye, P. Cheng, T.S. Zhao, Effects of the electric field on ion crossover in vanadium redox flow batteries, *Appl. Energy.* 145, 306–319, 2015.
- [48] M.R. Mohamed, P.K. Leung, M.H. Sulaiman, Performance characterization of a vanadium redox flow battery at different operating parameters under a standardized test-bed system, *Appl. Energy.* 137, 402–412, 2015.
- [49] A. Manthiram, X. Yu, Ambient Temperature Sodium–Sulfur Batteries, *Small.* 11, 2108–2114, 2015.
- [50] J.K. Min, M. Stackpool, C.H. Shin, C.-H. Lee, Cell safety analysis of a molten sodium–sulfur battery under failure mode from a fracture in the solid electrolyte, *J. Power Sources.* 293, 835–845, 2015.
- [51] S. Xin, Y.-X. Yin, Y.-G. Guo, L.-J. Wan, A High-Energy Room-Temperature Sodium-Sulfur Battery, *Adv. Mater.* 26, 1261–1265, 2014.
- [52] R.M. Wittman, M.L. Perry, T.N. Lambert, B.R. Chalamala, Y. Preger, Perspective-On the Need for Reliability and Safety Studies of Grid-Scale Aqueous Batteries, *J. Electrochem. Soc.* 167, 90545, 2020.
- [53] C. D’Urso, N. Briguglio, A. Bonanno, M. Ferraro, V. Antonucci, S. Vasta, Thermochemical investigation on a novel sodium-metal-halide battery configuration: Experimental and FEM model results, *J. Energy Storage.* 25, 100818, 2019.
- [54] S. Dambone Sessa, G. Crugnola, M. Todeschini, S. Zin, R. Benato, Sodium nickel chloride battery steady-state regime model for stationary electrical energy storage, *J. Energy Storage.* 6, 105–115, 2016.
- [55] A.M. Nieto-Muñoz, J.F. Ortiz-Mosquera, A.C.M. Rodrigues, Novel sodium superionic conductor of the $Na_{1+y}Ti_2Si_yP_3-yO_{12}$ series for application as solid electrolyte, *Electrochim. Acta.* 319, 922–932, 2019.

- [56] M.C. Kocer, C. Cengiz, M. Gezer, D. Gunes, M.A. Cinar, B. Alboyaci, A. Onen, Assessment of battery storage technologies for a Turkish power network, *Sustain.* 11, 2019.
- [57] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Appl. Energy.* 137, 511–536, 2015.
- [58] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe, W. Rosehart, Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review, *Energy Sustain. Dev.* 14, 302–314, 2010.
- [59] A.B. Gallo, J.R. Simões-Moreira, H.K.M. Costa, M.M. Santos, E. Moutinho dos Santos, Energy storage in the energy transition context: A technology review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65, 800–822, 2016.
- [60] H.L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, J.P. Lopes, Characterisation of electrical energy storage technologies, *Energy.* 53, 288–298, 2013.
- [61] S. Sabihuddin, A.E. Kiprakis, M. Mueller, A numerical and graphical review of energy storage technologies, *Energies.* 8, 172–216, 2015.
- [62] B. Dunn, H. Kamath, J.-M. Tarascon, Electrical energy storage for the grid: a battery of choices, *Science.* 334, 928–935, 2011.
- [63] H.E.O. Farias, L.N. Canha, Battery Energy Storage Systems (BESS) Overview of Key Market Technologies, 2018 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Exhib. - Lat. Am. 1–5, 2018.
- [64] E.O. Ogunniyi, H. Pienaar, Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications, 2017 Int. Conf. Domest. Use Energy. 233–239, 2017.
- [65] M. Aneke, M. Wang, Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, *Appl. Energy.* 179, 350–377, 2016.
- [66] EASE, Sodium-Sulphur (NaS) Battery Electrochemical Energy Storage, (2018) 1–2. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2018/09/2018.07_EASE_Technology-Description_NaS.pdf. (Erişim tarihi: 22.11.20)
- [67] O. Palizban, K. Kauhaniemi, Energy storage systems in modern grids-Matrix of technologies and applications, *J. Energy Storage.* 6, 248–259, 2016.
- [68] M. Richter, G. Oeljeklaus, K. Görner, Improving the load flexibility of coal-

- fired power plants by the integration of a thermal energy storage, *Appl. Energy*. 236, 607–621, 2019.
- [69] Y. Sun, L. Wang, C. Xu, J. Van herle, F. Maréchal, Y. Yang, Enhancing the operational flexibility of thermal power plants by coupling high-temperature power-to-gas, *Appl. Energy*. 263, 114608, 2020.
 - [70] J. Hentschel, U. Babić, H. Spliethoff, A parametric approach for the valuation of power plant flexibility options, *Energy Reports*. 2, 40–47, 2016.
 - [71] M. Dotzauer, D. Pfeiffer, M. Lauer, M. Pohl, E. Mauky, K. Bär, M. Sonnleitner, W. Zörner, J. Hudde, B. Schwarz, B. Faßauer, M. Dahmen, C. Rieke, J. Herbert, D. Thrän, How to measure flexibility – Performance indicators for demand driven power generation from biogas plants, *Renew. Energy*. 134, 135–146, 2019.
 - [72] M.A. Gonzalez-Salazar, T. Kirsten, L. Prchlik, Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 1497–1513, 2018.
 - [73] V. Nian, G. Jindal, H. Li, A feasibility study on integrating large-scale battery energy storage systems with combined cycle power generation – Setting the bottom line, *Energy*. 185, 396–408, 2019.
 - [74] J.D. Wojcik, J. Wang, Feasibility study of Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) power plant integration with Adiabatic Compressed Air Energy Storage (ACAES), *Appl. Energy*. 221, 477–489, 2018.
 - [75] W. Liu, L. Liu, L. Zhou, J. Huang, Y. Zhang, G. Xu, Y. Yang, Analysis and Optimization of a Compressed Air Energy Storage-Combined Cycle System, *Entropy* . 16, 2014.
 - [76] C. Salvini, Techno-Economic Analysis of CAES Systems Integrated into Gas-Steam Combined Plants, *Energy Procedia*. 101, 870–877, 2016.
 - [77] C. Salvini, Performance assessment of a CAES system integrated into a gas-steam combined plant, *Energy Procedia*. 136, 264–269, 2017.
 - [78] M. Wróbel, J. Kalina, Preliminary evaluation of CAES system concept with partial oxidation gas turbine technology, *Energy*. 183, 766–775, 2019.
 - [79] M.J. Kim, T.S. Kim, Integration of compressed air energy storage and gas turbine to improve the ramp rate, *Appl. Energy*. 247, 363–373, 2019.
 - [80] P. Zhao, J. Wang, Y. Dai, Thermodynamic analysis of an integrated energy

- system based on compressed air energy storage (CAES) system and Kalina cycle, *Energy Convers. Manag.* 98, 161–172, 2015.
- [81] P. Zhao, J. Wang, Y. Dai, L. Gao, Thermodynamic analysis of a hybrid energy system based on CAES system and CO₂ transcritical power cycle with LNG cold energy utilization, *Appl. Therm. Eng.* 91, 718–730, 2015.
- [82] D. Li, J. Wang, Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation, *J. Energy Storage*. 20, 140–152, 2018.
- [83] Y. Sun, C. Xu, T. Xin, G. Xu, Y. Yang, A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on low-rank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants, *Appl. Therm. Eng.* 156, 77–90, 2019.
- [84] D. Li, Y. Hu, D. Li, J. Wang, Combined-cycle gas turbine power plant integration with cascaded latent heat thermal storage for fast dynamic responses, *Energy Convers. Manag.* 183, 1–13, 2019.
- [85] M.W. Ajiwibowo, A. Darmawan, M. Aziz, A conceptual chemical looping combustion power system design in a power-to-gas energy storage scenario, *Int. J. Hydrogen Energy*. 44, 9636–9642, 2019.
- [86] A. Farooqui, A. Bose, D. Ferrero, J. Llorca, M. Santarelli, Techno-economic and exergetic assessment of an oxy-fuel power plant fueled by syngas produced by chemical looping CO₂ and H₂O dissociation, *J. CO₂ Util.* 27, 500–517, 2018.
- [87] M. Abarr, J. Hertzberg, L.D. Montoya, Pumped Thermal Energy Storage and Bottoming System Part B: Sensitivity analysis and baseline performance, *Energy*. 119, 601–611, 2017.
- [88] E. Celik, M. Gul, N. Aydin, A.T. Gumus, A.F. Guneri, A comprehensive review of multi criteria decision making approaches based on interval type-2 fuzzy sets, *Knowledge-Based Syst.* 85, 329–341, 2015.
- [89] M. Ortiz-Barrios, M. Gul, P. López-Meza, M. Yucesan, E. Navarro-Jiménez, Evaluation of hospital disaster preparedness by a multi-criteria decision making approach: The case of Turkish hospitals, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 49, 101748, 2020.
- [90] M. Yucesan, M. Gul, Hospital service quality evaluation: an integrated model based on Pythagorean fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS, *Soft Comput.* 24, 3237–

3255, 2020.

- [91] M. Hamurcu, T. Eren, Strategic Planning Based on Sustainability for Urban Transportation: An Application to Decision-Making, *Sustain.* 12, 2020.
- [92] E. Özcan, M. Ahiskalı, 3PL Service Provider Selection with a Goal Programming Model Supported with Multicriteria Decision Making Approaches, *Gazi Univ. J. Sci.* 33, 413–427, 2020.
- [93] M. Hamurcu, T. Eren, Selection of Unmanned Aerial Vehicles by Using Multicriteria Decision-Making for Defence, *J. Math.* 2020, 4308756, 2020.
- [94] S. Carpitella, A. Certa, J. Izquierdo, C.M. La Fata, A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 169, 394–402, 2018.
- [95] M. Gul, M.F. Ak, A comparative outline for quantifying risk ratings in occupational health and safety risk assessment, *J. Clean. Prod.* 196, 653–664, 2018.
- [96] F.E. Boran, S. Genç, M. Kurt, D. Akay, A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method, *Expert Syst. Appl.* 36, 11363–11368, 2009.
- [97] M. Dağdeviren, T. Eren, Analytical hierarchy process and use of 0-1 goal programming methods in selecting supplier firm, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 16, 41–52, 2001.
- [98] M. Bulut, E. Özcan, A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 205, 107238, 2021.
- [99] E.C. Özcan, S. Ünlüsoy, T. Eren, A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78, 1410–1423, 2017.
- [100] F.E. Boran, S. Genç, D. Akay, Personnel selection based on intuitionistic fuzzy sets, *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.* 21, 493–503, 2011.
- [101] B. Oztaysi, S. Cevik Onar, S. Seker, C. Kahraman, Water treatment technology selection using hesitant Pythagorean fuzzy hierachical decision making, *J. Intell. Fuzzy Syst.* 37, 867–884, 2019.
- [102] C. Kahraman, B. Öztayşi, S.Ç. Onar, An Integrated Intuitionistic Fuzzy AHP and TOPSIS Approach to Evaluation of Outsource Manufacturers, *J. Intell.*

- Syst. 29, 283–297, 2020.
- [103] B. Özkan, E. Özceylan, M. Kabak, M. Dağdeviren, Evaluating the websites of academic departments through SEO criteria: a hesitant fuzzy linguistic MCDM approach, *Artif. Intell. Rev.* 53, 875–905, 2020.
 - [104] M. Erbaş, M. Kabak, E. Özceylan, C. Çetinkaya, Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis, *Energy*. 163, 1017–1031, 2018.
 - [105] E. Özceylan, C. Çetinkaya, M. Erbaş, M. Kabak, Logistic performance evaluation of provinces in Turkey: A GIS-based multi-criteria decision analysis, *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 94, 323–337, 2016.
 - [106] C. Zhang, Y.-L. Wei, P.-F. Cao, M.-C. Lin, Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3091–3106, 2018.
 - [107] A. Aktas, M. Kabak, A Hesitant Fuzzy Linguistic Group Decision Making Model for Energy Storage Unit Selection. 265–273. Ed by: C. Kahraman, S. Cevik Onar, B. Oztaysi, İ. Ucal Sari, S. Cebi, A. Cagri Tolga. *Intell. Fuzzy Tech. Smart Innov. Solut. INFUS 2020. Adv. Intell. Syst. Comput.*, 1197. baskı, Springer, Cham., Istanbul, Turkey, 2021.
 - [108] H. Zhao, S. Guo, H. Zhao, Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences, *Energy*. 168, 450–461, 2019.
 - [109] B. Özkan, İ. Kaya, U. Cebeci, H. Başlıgil, A Hybrid Multicriteria Decision Making Methodology Based on Type-2 Fuzzy Sets For Selection Among Energy Storage Alternatives, *Int. J. Comput. Intell. Syst.* 8, 914–927, 2015.
 - [110] F. Ben Ammar, I.H. Hafsa, F. Hammami, Analytic Hierarchy process selection for batteries storage technologies, 2013 *Int. Conf. Electr. Eng. Softw. Appl.* 1–6, 2013.
 - [111] A.T. Gumus, A. Yesim Yayla, E. Çelik, A. Yildiz, A combined fuzzy-AHP and fuzzy-GRA methodology for hydrogen energy storage method selection in Turkey, *Energies*. 6, 3017–3032, 2013.
 - [112] D. Xu, Sustainability prioritization of energy systems by developing an integrated decision support framework with hybrid-data consideration, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 39, 100719, 2020.

- [113] C. Zhang, C. Chen, D. Streimikiene, T. Balezentis, Intuitionistic fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria assessment of the energy storage technologies, *Appl. Soft Comput. J.* 79, 410–423, 2019.
- [114] J. Ren, X. Ren, Sustainability ranking of energy storage technologies under uncertainties, *J. Clean. Prod.* 170, 1387–1398, 2018.
- [115] J. Ren, Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: A novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach, *Renew. Energy.* 121, 666–676, 2018.
- [116] T.T.Q. Vo, A. Xia, F. Rogan, D.M. Wall, J.D. Murphy, Sustainability assessment of large-scale storage technologies for surplus electricity using group multi-criteria decision analysis, *Clean Technol. Environ. Policy.* 19, 689–703, 2017.
- [117] R. Ak, C. Ağlan, Comparison of energy storage alternatives using Fuzzy TOSIS method, *Proc. World Congr. Eng.* 2011. 2, 1170–1173, 2011.
- [118] K. Cowan, T. Daim, T. Anderson, Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States, *Energy.* 35, 4771–4779, 2010.
- [119] S.M.M. Cruz, E.J. Esparcia, J.D.A. Pascasio, R.R. Tan, K.B. Aviso, M.A.B. Promentilla, J.D. Ocon, Optimal multi-criteria selection of energy storage systems for grid applications, *Chem. Eng. Trans.* 76, 1153–1158, 2019.
- [120] G. van de Kaa, T. Fens, J. Rezaei, Residential grid storage technology battles: a multi-criteria analysis using BWM, *Technol. Anal. Strateg. Manag.* 31, 40–52, 2019.
- [121] S.B. Walker, U. Mukherjee, M. Fowler, A. Elkamel, Benchmarking and selection of Power-to-Gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative, *Int. J. Hydrogen Energy.* 41, 7717–7731, 2016.
- [122] T.U. Daim, X. Li, J. Kim, S. Simms, Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions, *Environ. Innov. Soc. Transitions.* 3, 29–49, 2012.
- [123] C. Acar, A. Beskese, G.T. Temur, A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems, *Int. J. Energy Res.* 43, 6419–6441,

- 2019.
- [124] K.L. Tharani, R. Dahiya, Choice of battery energy storage for a hybrid renewable energy system, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 26, 666–676, 2018.
 - [125] D. Murrant, J. Radcliffe, Assessing energy storage technology options using a multi-criteria decision analysis-based framework, *Appl. Energy*. 231, 788–802, 2018.
 - [126] H. Zhao, S. Guo, H. Zhao, Comprehensive performance assessment on various battery energy storage systems, *Energies*. 11, 2018.
 - [127] S.S. Raza, I. Janajreh, C. Ghenai, Sustainability index approach as a selection criteria for energy storage system of an intermittent renewable energy source, *Appl. Energy*. 136, 909–920, 2014.
 - [128] A. Saez-De-Ibarra, A. Milo, H. Gaztanaga, I. Etxeberria-Otadui, P. Rodriguez, S. Bacha, V. Debusschere, Analysis and comparison of battery energy storage technologies for grid applications, 2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH, 2013.
 - [129] A. Barin, L.N. Canha, A.R. Abaide, K.F. Magnago, B. Wottrich, R.Q. Machado, Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection, *Energy Power Eng.* 03, 557–564, 2011.
 - [130] S. Guo, Chapter 14 - Life cycle sustainability decision-making framework for the prioritization of electrochemical energy storage under uncertainties. 291–308. Ed by: J. Ren, S.B.T.-L.C.S.A. for D.-M. Toniolo, Elsevier, 2020.
 - [131] S.S. Bohra, A. Anvari-Moghaddam, B. Mohammadi-Ivatloo, AHP-Assisted Multi-Criteria Decision-Making Model for Planning of Microgrids, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf. 2019)*. 4557–4562, 2019.
 - [132] L. Wei, J. Hou, T. Qin, Z. Yuan, Y. Yan, Evaluation of grid energy storage system based on AHP-PROMETHEE-GAIA, *Chinese Control Conf. CCC.* 9787–9792, 2016.
 - [133] E.K. Zavadskas, A. Kaklauskas, Z. Turskis, J. Tamošaitiene, Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals, *J. Civ. Eng. Manag.* 14, 85–93, 2008.
 - [134] N. Zarbakhshnia, H. Soleimani, H. Ghaderi, Sustainable third-party reverse logistics provider evaluation and selection using fuzzy SWARA and developed

- fuzzy COPRAS in the presence of risk criteria, *Appl. Soft Comput.* 65, 307–319, 2018.
- [135] M. Bulut, E. Özcan, A novel approach towards evaluation of joint technology performances of battery energy storage system in a fuzzy environment, *J. Energy Storage.* 36, 102361, 2021.
 - [136] M. Bulut, E. Özcan, Integration of battery energy storage systems into natural gas combined cycle power plants in fuzzy environment, *J. Energy Storage.* 36, 102376, 2021.
 - [137] E. Ilbahar, A. Karaşan, S. Cebi, C. Kahraman, A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system, *Saf. Sci.* 103, 124–136, 2018.
 - [138] C.-L. Hwang, A.S.M. Masud, *Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1979.
 - [139] N.E. Oz, S. Mete, F. Serin, M. Gul, Risk assessment for clearing and grading process of a natural gas pipeline project: An extended TOPSIS model with Pythagorean fuzzy sets for prioritizing hazards, *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.* 25, 1615–1632, 2019.
 - [140] R. Garud, D. Ahlstrom, Technology assessment: a socio-cognitive perspective, *J. Eng. Technol. Manag.* 14, 25–48, 1997.
 - [141] G. Büyüközkan, F. Göçer, A Novel Approach Integrating AHP and COPRAS Under Pythagorean Fuzzy Sets for Digital Supply Chain Partner Selection, *IEEE Trans. Eng. Manag.* 1–18, 2019.
 - [142] P.C. Shete, Z.N. Ansari, R. Kant, A Pythagorean fuzzy AHP approach and its application to evaluate the enablers of sustainable supply chain innovation, *Sustain. Prod. Consum.* 23, 77–93, 2020.
 - [143] I. Mexis, G. Todeschini, Battery Energy Storage Systems in the United Kingdom: A Review of Current State-of-the-Art and Future Applications, *Energies.* 13, 2020.
 - [144] A. Yoshino, 1 - Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological Trends. 1-20. Ed: by G.B.T.-L.-I.B. Pistoia, Elsevier, Amsterdam, 2014.
 - [145] B. Ceballos, M.T. Lamata, D.A. Pelta, A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods, *Prog. Artif. Intell.* 5, 315–322, 2016.

- [146] S.H. Zanakis, A. Solomon, N. Wishart, S. Dublisch, Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods, *Eur. J. Oper. Res.* 107, 507–529, 1998.



EK 2. 1. AŞAMA İÇİN DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE AĞIRLIKLANDIRILMASI

Fark matrisi	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}	d _{ijL}	d _{ijU}
C1	0,00	0,00	-0,42	-0,18	-0,34	-0,12	-0,62	-0,33	-0,08	0,12	0,14	0,36	0,36	0,64	0,41	0,68
C2	0,18	0,42	0,00	0,00	-0,10	0,10	-0,30	-0,10	0,60	0,80	0,60	0,80	0,81	1,00	0,81	1,00
C3	0,12	0,34	-0,10	0,10	0,00	0,00	-0,60	-0,30	0,10	0,30	0,30	0,60	0,60	0,80	0,60	0,80
C4	0,33	0,62	0,10	0,30	0,30	0,60	0,00	0,00	0,62	0,82	0,60	0,80	0,81	1,00	0,81	1,00
C5	-0,12	0,08	-0,80	-0,60	-0,30	-0,10	-0,82	-0,62	0,00	0,00	0,10	0,31	0,30	0,60	0,81	1,00
C6	-0,36	-0,14	-0,80	-0,60	-0,60	-0,30	-0,80	-0,60	-0,31	-0,10	0,00	0,00	0,30	0,60	0,10	0,30
C7	-0,60	-0,30	-1,00	-0,81	-0,80	-0,60	-1,00	-0,81	-0,64	-0,36	-0,60	-0,30	0,00	0,00	-0,08	0,12
C8	-0,64	-0,36	-1,00	-0,81	-0,80	-0,60	-1,00	-0,81	-1,00	-0,81	-0,30	-0,10	-0,12	0,08	0,00	0,00

İç çarpım matrisi	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}	S _{ijL}	S _{ijU}
C1	1,00	1,00	0,23	0,54	0,31	0,66	0,12	0,32	0,76	1,51	1,62	3,47	3,42	9,12	4,14	10,47
C2	1,86	4,27	1,00	1,00	0,71	1,41	0,35	0,71	7,94	15,85	7,94	15,85	16,41	31,62	16,41	31,62
C3	1,51	3,24	0,71	1,41	1,00	1,00	0,13	0,35	1,41	2,82	2,82	7,94	7,94	15,85	7,94	15,85
C4	3,13	8,51	1,41	2,82	2,82	7,94	1,00	1,00	8,62	16,98	7,94	15,85	16,41	31,62	16,41	31,62
C5	0,66	1,32	0,06	0,13	0,35	0,71	0,06	0,12	1,00	1,00	1,41	2,92	2,82	7,94	16,41	31,62
C6	0,29	0,62	0,06	0,13	0,13	0,35	0,06	0,13	0,34	0,71	1,00	1,00	2,82	7,94	1,41	2,82
C7	0,13	0,35	0,03	0,06	0,06	0,13	0,03	0,06	0,11	0,29	0,13	0,35	1,00	1,00	0,76	1,51
C8	0,11	0,29	0,03	0,06	0,06	0,13	0,03	0,06	0,03	0,06	0,35	0,71	0,66	1,32	1,00	1,00

EK 2. (devam)

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1,00	0,76	0,78	0,71	0,80	0,78	0,72	0,73
C2	0,76	1,00	0,80	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81
C3	0,78	0,80	1,00	0,70	0,80	0,70	0,80	0,80
C4	0,71	0,80	0,70	1,00	0,80	0,80	0,81	0,81
C5	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	0,79	0,70	0,81
C6	0,78	0,80	0,70	0,80	0,79	1,00	0,70	0,80
C7	0,70	0,81	0,80	0,81	0,72	0,70	1,00	0,80
C8	0,72	0,81	0,80	0,81	0,81	0,80	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1,000	0,293	0,378	0,155	0,909	1,985	4,493	5,346
C2	2,329	1,000	0,848	0,425	9,517	9,517	19,452	19,452
C3	1,852	0,848	1,000	0,168	1,692	3,767	9,517	9,517
C4	4,131	1,692	3,767	1,000	10,289	9,517	19,452	19,452
C5	0,792	0,076	0,425	0,070	1,000	1,710	3,767	19,452
C6	0,353	0,076	0,168	0,076	0,415	1,000	3,767	1,692
C7	0,168	0,037	0,076	0,037	0,144	0,168	1,000	0,909
C8	0,144	0,037	0,076	0,037	0,037	0,425	0,792	1,000

EK 3. 1. AŞAMA İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN PBTOPSIS DİL ÖLÇEĞİNE GÖRE ALINAN UZMAN GÖRÜŞLERİ

E1	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

E2	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,60	0,71	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80

E3	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,40	0,87	0,60	0,71	0,25	0,92	0,40	0,87	0,60	0,71	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80	0,70	0,60	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,60	0,71	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87

EK 3. (devam)

E4	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

E5	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

E6	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
A1	0,60	0,71	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80

E7	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

EK 3. (devam)

E8	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,40	0,87	0,60	0,71	0,25	0,92	0,40	0,87	0,60	0,71	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80	0,70	0,60	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,60	0,71	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87

E9	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

E10	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
A1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92	0,50	0,80	0,60	0,71	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
A2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80	0,50	0,80	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
A3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	0,71
A4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87
A5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87	0,50	0,80	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80	0,40	0,87

K 4. 1. AŞAMA İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN BTOPSIS Dİ

[illegible][illegible][illegible]

C4				E1				E2				E3				E4				E5				E6				E7				E8				E9				E10			
A1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8							
A2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.3	0.4	0.5	0.6							
A3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8							
A4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6							
A5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.7	0.8							

[illegible]

C6	E1				E2				E3				E4				E5				E6				E7				E8				E9				E10			
A1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1				
A2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4				
A3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6				
A4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6				
A5	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6				

C7	E1				E2				E3				E4				E5				E6				E7				E8				E9				E10			
A1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1				
A2	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.8	0.9	1				
A3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6				
A4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4				
A5	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4				

C8	E1					E2					E3					E4					E5					E6					E7					E8					E9					E10				
A1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1				
A2	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1			
A3	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1	0,7	0,8	0,9	1	1			
A4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6			
A5	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0	0,1	0,2	0,3	0,4	

EK 5. 1. AŞAMA İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN BTOPSIS YÖNTEMİNE GÖRE AĞIRLIKLANDIRILMASI

Adım 1 Karar matrisi		C1 (faydalı)				C2 (faydalı)				C3 (faydalı)				C4 (faydalı)				C5 (faydalı)				C6 (faydalı)				C7 (faydalı)				C8 (maliyet)			
	A1	0,44	0,54	0,64	0,74	0,7	0,8	0,9	1	0,08	0,18	0,28	0,38	0,5	0,6	0,7	0,8	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,66	0,76	0,86	0,96
	A2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,62	0,72	0,82	0,92	0,3	0,4	0,5	0,6	0,48	0,58	0,68	0,78	0,5	0,6	0,7	0,8	0,28	0,38	0,48	0,58	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1
	A3	0,22	0,32	0,42	0,52	0,11	0,21	0,31	0,41	0,09	0,19	0,29	0,39	0,5	0,6	0,7	0,8	0,5	0,6	0,7	0,8	0,28	0,38	0,48	0,58	0,26	0,36	0,46	0,56	0,7	0,8	0,9	1
	A4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,11	0,21	0,31	0,41	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6
	A5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,48	0,58	0,68	0,78	0,5	0,6	0,7	0,8	0,28	0,38	0,48	0,58	0,24	0,34	0,44	0,54	0,06	0,16	0,26	0,36

Adım 2		C1 (faydalı)				C2 (faydalı)				C3 (faydalı)				C4 (faydalı)				C5 (faydalı)				C6 (faydalı)				C7 (faydalı)				C8 (maliyet)			
	A1	0,55	0,68	0,80	0,93	0,70	0,80	0,90	1,00	0,13	0,30	0,47	0,63	0,63	0,75	0,88	1,00	0,63	0,75	0,88	1,00	0,70	0,80	0,90	1,00	0,70	0,80	0,90	1,00	0,06	0,07	0,08	0,09
	A2	0,63	0,75	0,88	1,00	0,62	0,72	0,82	0,92	0,50	0,67	0,83	1,00	0,60	0,73	0,85	0,98	0,63	0,75	0,88	1,00	0,28	0,38	0,48	0,58	0,70	0,80	0,90	1,00	0,06	0,07	0,08	0,09
	A3	0,28	0,40	0,53	0,65	0,11	0,21	0,31	0,41	0,15	0,32	0,48	0,65	0,63	0,75	0,88	1,00	0,63	0,75	0,88	1,00	0,28	0,38	0,48	0,58	0,26	0,36	0,46	0,56	0,06	0,07	0,08	0,09
	A4	0,63	0,75	0,88	1,00	0,11	0,21	0,31	0,41	0,17	0,33	0,50	0,67	0,38	0,50	0,63	0,75	0,38	0,50	0,63	0,75	0,30	0,40	0,50	0,60	0,10	0,20	0,30	0,40	0,10	0,12	0,15	0,20
	A5	0,13	0,25	0,38	0,50	0,30	0,40	0,50	0,60	0,17	0,33	0,50	0,67	0,60	0,73	0,85	0,98	0,63	0,75	0,88	1,00	0,28	0,38	0,48	0,58	0,24	0,34	0,44	0,54	0,17	0,23	0,38	1,00

Adım 3		C1 (faydalı)				C2 (faydalı)				C3 (faydalı)				C4 (faydalı)				C5 (faydalı)				C6 (faydalı)				C7 (faydalı)				C8 (maliyet)			
	A1	0,04	0,05	0,05	0,06	0,20	0,23	0,26	0,29	0,02	0,04	0,06	0,08	0,20	0,24	0,28	0,32	0,08	0,10	0,11	0,13	0,02	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	A2	0,04	0,05	0,06	0,07	0,18	0,21	0,24	0,27	0,07	0,09	0,11	0,13	0,19	0,23	0,27	0,31	0,08	0,10	0,11	0,13	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	A3	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	0,06	0,09	0,12	0,02	0,04	0,06	0,09	0,20	0,24	0,28	0,32	0,08	0,10	0,11	0,13	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	A4	0,04	0,05	0,06	0,07	0,03	0,06	0,09	0,12	0,02	0,04	0,07	0,09	0,12	0,16	0,20	0,24	0,05	0,06	0,08	0,10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A5	0,01	0,02	0,03	0,03	0,09	0,12	0,15	0,17	0,02	0,04	0,07	0,09	0,19	0,23	0,27	0,31	0,08	0,10	0,11	0,13	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01

Adım 4	C1 (faydalı)				C2 (faydalı)				C3 (faydalı)				C4 (faydalı)				C5 (faydalı)				C6 (faydalı)				C7 (faydalı)				C8 (maliyet)			
A ⁺	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
A ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Adım 5 (S _j ⁺)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Adım 5 (S _j ⁻)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	1,7074	1,3391	1,6982	1,3066	1,6069	1,7467	1,7839	1,8011	A1	0,0966	0,4672	0,1116	0,5027	0,1980	0,0564	0,0190	0,0017
A2	1,6982	1,3811	1,6109	1,3211	1,6069	1,7733	1,7839	1,8012	A2	0,1056	0,4255	0,1960	0,4883	0,1980	0,0300	0,0190	0,0016
A3	1,7410	1,6488	1,6942	1,3066	1,6069	1,7733	1,7933	1,8012	A3	0,0635	0,1625	0,1153	0,5027	0,1980	0,0300	0,0097	0,0016
A4	1,6982	1,6488	1,6902	1,4519	1,6642	1,7721	1,7967	1,7995	A4	0,1056	0,1625	0,1191	0,3592	0,1415	0,0313	0,0064	0,0033
A5	1,7593	1,5491	1,6902	1,3211	1,6069	1,7733	1,7937	1,7919	A5	0,0458	0,2593	0,1191	0,4883	0,1980	0,0300	0,0093	0,0130

Adım 6-7	Alternatifler								Sj*		Sj-		Ci*				Sıralama	
	Pb-acid								12,99		1,45		0,1006				2	
	Li-ion								12,98		1,46		0,1014				1	
	VRFB								13,37		1,08		0,0750				4	
	NaNiCl2								13,52		0,93		0,0643				5	
	NaS								13,29		1,16		0,0805				3	

EK 6. 1. AŞAMA İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN BCOPRAS DİL ÖLÇEĞİNE GÖRE ALINAN UZMAN GÖRÜŞLERİ

C1	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A2	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A3	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A4	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9
A5	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3

C2	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	3	5	7	3	5	7	5	7	9
A2	5	7	9	3	5	7	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	3	5	7	3	5	7	5	7	9
A3	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A4	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A5	0	1	3	0	0	1	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	0	1	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	0	1

C3	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A2	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A3	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A4	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
A5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	0	1	3	1	3	5	0	1	3	0	1	3	0	1	3	1	3	5

C4	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A2	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A3	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A4	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7

EK 6. (devam)

C5	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	5	7	9	3	5	7	3	5	7	5	7	9
A2	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5
A3	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A4	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7

C6	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5
A2	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	3	5	7	5	7	9	5	7	9	3	5	7	5	7	9	5	7	9
A3	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5
A4	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A5	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5

C7	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10
A2	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	5	7	9	7	9	10	5	7	9	5	7	9
A3	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5
A4	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A5	1	3	5	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	1	3	5

C8	E1			E2			E3			E4			E5			E6			E7			E8			E9			E10		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	5	7	9	5	7	9	5	7	9	7	9	10	5	7	9	5	7	9	7	9	10	5	7	9	7	9	10	7	9	10
A2	7	9	10	5	7	9	7	9	10	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9
A3	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	5	7	9	5	7	9	5	7	9	5	7	9	3	5	7	5	7	9
A4	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
A5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7

EK 7. 1. AŞAMA İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN BCOPRAS YÖNTEMİNE GÖRE AĞIRLIKLANDIRILMASI

Adım 1	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
	w ₁		0,0678	w ₂		0,2913	w ₃		0,1321	w ₄		0,3228	w ₅		0,1271	w ₆		0,0352	w ₇		0,0118	w ₈		0,0119
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	3,75	5,75	7,63	3,75	5,75	7,63	3,50	5,50	7,38	4,00	6,00	7,75	3,75	5,75	7,63	3,25	5,25	7,13	3,75	5,75	7,50	3,25	5,25	7,13
A2	4,50	6,50	8,25	4,00	6,00	7,88	4,25	6,25	8,00	4,00	6,00	7,88	4,00	6,00	7,88	4,00	6,00	7,88	3,75	5,75	7,75	3,75	5,75	7,63
A3	2,50	4,50	6,50	2,50	4,50	6,50	3,25	5,25	7,25	2,25	4,25	6,25	2,50	4,50	6,50	2,50	4,50	6,50	1,75	3,75	5,75	2,00	4,00	6,00
A4	2,75	4,75	6,75	2,75	4,75	6,75	2,50	4,50	6,50	2,75	4,75	6,75	2,75	4,75	6,75	2,75	4,75	6,75	2,75	4,75	6,75	2,75	4,75	6,75
A5	1,50	3,25	5,25	1,25	2,88	4,75	2,00	3,75	5,75	1,25	3,00	5,00	1,88	3,50	5,50	1,25	2,88	4,75	1,88	3,50	5,50	1,88	3,50	5,50

Adım 2	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
	w ₁		0,0678	w ₂		0,2913	w ₃		0,1321	w ₄		0,3228	w ₅		0,1271	w ₆		0,0352	w ₇		0,0118	w ₈		0,0119
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	0,18	0,28	0,37	0,19	0,29	0,38	0,17	0,27	0,36	0,20	0,30	0,39	0,19	0,28	0,38	0,17	0,27	0,37	0,19	0,29	0,38	0,17	0,27	0,37
A2	0,22	0,32	0,40	0,20	0,30	0,40	0,21	0,30	0,39	0,20	0,30	0,39	0,20	0,30	0,39	0,21	0,31	0,40	0,19	0,29	0,40	0,19	0,30	0,40
A3	0,12	0,22	0,32	0,13	0,23	0,33	0,16	0,25	0,35	0,11	0,21	0,31	0,12	0,22	0,32	0,13	0,23	0,33	0,09	0,19	0,29	0,10	0,21	0,31
A4	0,13	0,23	0,33	0,14	0,24	0,34	0,12	0,22	0,31	0,14	0,24	0,34	0,14	0,23	0,33	0,14	0,24	0,35	0,14	0,24	0,35	0,14	0,25	0,35
A5	0,07	0,16	0,26	0,06	0,14	0,24	0,10	0,18	0,28	0,06	0,15	0,25	0,09	0,17	0,27	0,06	0,15	0,24	0,10	0,18	0,28	0,10	0,18	0,29

Adım 3	Faydalı			Faydalı			Faydalı			Faydalı			Faydalı			Faydalı			Faydalı			Faydasız		
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
	w ₁		0,0678	w ₂		0,2913	w ₃		0,1321	w ₄		0,3228	w ₅		0,1271	w ₆		0,0352	w ₇		0,0118	w ₈		0,0119
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,02	0,04	0,05	0,06	0,10	0,13	0,02	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A2	0,01	0,02	0,03	0,06	0,09	0,12	0,03	0,04	0,05	0,06	0,10	0,13	0,03	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A3	0,01	0,01	0,02	0,04	0,07	0,10	0,02	0,03	0,05	0,04	0,07	0,10	0,02	0,03	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A4	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	0,11	0,02	0,03	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A5	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,01	0,02	0,04	0,02	0,05	0,08	0,01	0,02	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Adım 4	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	0,012	0,019	0,025	0,055	0,084	0,112	0,022	0,035	0,047	0,065	0,097	0,125	0,024	0,036	0,048	0,006	0,009	0,013	0,002	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000
A2	0,015	0,021	0,027	0,059	0,088	0,115	0,027	0,040	0,051	0,065	0,097	0,127	0,025	0,038	0,049	0,007	0,011	0,014	0,002	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000
A3	0,008	0,015	0,021	0,037	0,066	0,095	0,021	0,034	0,046	0,036	0,069	0,101	0,016	0,028	0,041	0,005	0,008	0,012	0,001	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000
A4	0,009	0,016	0,022	0,040	0,070	0,099	0,016	0,029	0,041	0,044	0,077	0,109	0,017	0,030	0,042	0,005	0,009	0,012	0,002	0,003	0,004	0,000	0,000	0,000
A5	0,005	0,011	0,017	0,018	0,042	0,070	0,013	0,024	0,037	0,020	0,048	0,081	0,012	0,022	0,035	0,002	0,005	0,009	0,001	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000

EK 7. (devam)

Adım 5	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003	0,004
A2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,005
A3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004
A4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003	0,004
A5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003

Adım 6-8	Alternatifler	Pj			Rj			Qj			BNP/ Qj	Nj	Sıralama
A1	Pb-acid	0,186	0,284	0,374	0,002	0,003	0,004	0,186	0,287	0,398	0,871	95,704	2
A2	Li-ion	0,200	0,298	0,389	0,002	0,004	0,005	0,200	0,300	0,410	0,910	100,000	1
A3	VRFB	0,123	0,222	0,320	0,001	0,002	0,004	0,123	0,225	0,359	0,707	77,669	4
A4	NaNiCl ₂	0,134	0,232	0,330	0,002	0,003	0,004	0,134	0,235	0,358	0,727	79,876	3
A5	NaS	0,071	0,154	0,251	0,001	0,002	0,003	0,072	0,158	0,292	0,522	57,352	5

EK 8. 2. AŞAMA 1. FAZ OPERASYONEL AMAÇLARI DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN PBAHP DİL ÖLÇEĞİNE GÖRE ALINAN UZMAN GÖRÜŞLERİ

E11	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E12	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,35	0,65	0,80
X2	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,65	0,80	0,20	0,35	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E13	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E14	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E15	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,45	0,55
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,45	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E16	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

EK 8. (devam)

E17	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E18	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E19	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,35	0,65	0,80
X2	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,65	0,80	0,20	0,35	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

E20	X1				X2				X3			
	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU	μL	μU	vL	vU
X1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,35	0,45	0,55	0,65
X2	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
X3	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

EK 9. 2. AŞAMA 1. FAZ OPERASYONEL AMAÇLARI DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE AĞIRLIKLANDIRILMASI

Fark matrisi	X1		X2		X3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
X1	0,00	0,00	-0,42	-0,18	-0,34	-0,12
X2	0,18	0,42	0,00	0,00	-0,10	0,10
X3	0,12	0,34	-0,10	0,10	0,00	0,00

İç çarpım matrisi	X1		X2		X3	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
X1	1,00	1,00	0,23	0,54	0,31	0,66
X2	1,86	4,27	1,00	1,00	0,71	1,41
X3	1,51	3,24	0,71	1,41	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	X1	X2	X3
X1	1,00	0,76	0,78
X2	0,76	1,00	0,80
X3	0,78	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	X1	X2	X3
X1	1,000	0,293	0,378
X2	2,329	1,000	0,848
X3	1,852	0,848	1,000

EK 10. 2. AŞAMA 1. FAZ OPERASYONEL AMAÇLARIN PBTOPSIS DİL ÖLÇEĞİNE GÖRE ALINAN UZMAN GÖRÜŞLERİ

E11	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,40	0,87	0,60	0,71	0,50	0,80
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E12	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,60	0,71	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,40	0,87	0,60	0,71	0,60	0,71
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E13	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,40	0,87	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,70	0,60	0,60	0,71	0,60	0,71
Y3	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E14	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,50	0,80	0,60	0,71	0,50	0,80
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E15	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,70	0,60	0,60	0,71	0,60	0,71
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

EK 10. (devam)

E16	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,60	0,71	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,70	0,60	0,60	0,71	0,50	0,80
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E17	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,40	0,87	0,60	0,71	0,50	0,80
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E18	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,40	0,87	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
Y3	0,25	0,92	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,50	0,80	0,40	0,87	0,50	0,80
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E19	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,50	0,80
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,40	0,87
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

E20	X1		X2		X3	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
Y1	0,50	0,80	0,60	0,71	0,25	0,92
Y2	0,60	0,71	0,60	0,71	0,60	0,71
Y3	0,40	0,87	0,40	0,87	0,40	0,87
Y4	0,60	0,71	0,40	0,87	0,50	0,80
Y5	0,25	0,92	0,25	0,92	0,40	0,87

EK 11. 2. AŞAMA 2. FAZ Y1 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE ANA KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,28	0,59	0,69	0,34	0,46	0,54	0,66
C2	0,59	0,69	0,18	0,28	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,78	0,23	0,35
C3	0,54	0,66	0,34	0,46	0,24	0,36	0,64	0,76	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C1		C2		C3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C1	0,00	0,00	-0,45	-0,27	-0,32	-0,08
C2	0,27	0,45	0,00	0,00	0,30	0,55
C3	0,08	0,32	-0,52	-0,28	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C1		C2		C3	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C1	1,00	1,00	0,21	0,39	0,33	0,76
C2	2,56	4,70	1,00	1,00	2,82	6,68
C3	1,32	3,02	0,17	0,38	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3
C1	1,00	0,82	0,76
C2	0,82	1,00	0,75
C3	0,76	0,76	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3
C1	1,000	0,249	0,414
C2	2,993	1,000	3,563
C3	1,649	0,208	1,000

EK 12. 2. AŞAMA 2. FAZ Y1 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C1 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C11				C12				C13			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C11	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,80	0,90	0,65	0,80	0,20	0,35
C12	0,80	0,90	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
C13	0,20	0,35	0,65	0,80	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C11		C12		C13	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C11	0,00	0,00	-0,80	-0,60	0,30	0,60
C12	0,60	0,80	0,00	0,00	-0,10	0,10
C13	-0,60	-0,30	-0,10	0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C11		C12		C13	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C11	1,00	1,00	0,06	0,13	2,82	7,94
C12	7,94	15,85	1,00	1,00	0,71	1,41
C13	0,13	0,35	0,71	1,41	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C11	C12	C13
C11	1,00	0,80	0,70
C12	0,80	1,00	0,80
C13	0,70	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C11	C12	C13
C11	1,000	0,076	3,767
C12	9,517	1,000	0,848
C13	0,168	0,848	1,000

EK 13. 2. AŞAMA 2. FAZ Y1 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C2 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C21				C22				C23			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55
C22	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,80	0,20	0,35
C23	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C21		C22		C23	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C21	0,00	0,00	0,10	0,30	-0,10	0,10
C22	-0,30	-0,10	0,00	0,00	0,30	0,60
C23	-0,10	0,10	-0,60	-0,30	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C21		C22		C23	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C21	1,00	1,00	1,41	2,82	0,71	1,41
C22	0,35	0,71	1,00	1,00	2,82	7,94
C23	0,71	1,41	0,13	0,35	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C21	C22	C23
C21	1,00	0,80	0,80
C22	0,80	1,00	0,70
C23	0,80	0,70	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C21	C22	C23
C21	1,000	1,692	0,848
C22	0,425	1,000	3,767
C23	0,848	0,168	1,000

EK 14. 2. AŞAMA 2. FAZ Y1 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C3 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C31				C32			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45
C32	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C31		C32	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C31	0,00	0,00	0,10	0,30
C32	-0,30	-0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C31		C32	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
C31	1,00	1,00	1,41	2,82
C32	0,35	0,71	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C31	C32
C31	1,00	0,80
C32	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C31	C32
C31	1,000	1,692
C32	0,425	1,000

EK 15. 2. AŞAMA 2. FAZ Y1 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN COPRAS YÖNTEMİNE ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Adım 2	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
A1	0,0357	0,2143	0,2766	0,0357	0,3571	0,0357	0,3571	0,2857
A2	0,3571	0,3571	0,2350	0,3571	0,0357	0,2778	0,0357	0,3571
A3	0,2143	0,3214	0,3571	0,3151	0,2613	0,0676	0,3158	0,3214
A4	0,2857	0,2413	0,3201	0,2857	0,2857	0,3571	0,2500	0,2500
A5	0,1071	0,0357	0,0357	0,1356	0,3214	0,1190	0,2827	0,0357

Adım 3	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
Alt kriterlerin ağırlıkları	0,0366	0,0859	0,0152	0,2061	0,3023	0,1174	0,1547	0,0819
A1	0,0013	0,0184	0,0042	0,0074	0,1079	0,0042	0,0552	0,0234
A2	0,0131	0,0307	0,0036	0,0736	0,0108	0,0326	0,0055	0,0292
A3	0,0078	0,0276	0,0054	0,0650	0,0790	0,0079	0,0488	0,0263
A4	0,0105	0,0207	0,0049	0,0589	0,0864	0,0419	0,0387	0,0205
A5	0,0039	0,0031	0,0005	0,0280	0,0972	0,0140	0,0437	0,0029

Adım-4-5-6	Si+ (max)	Si- (min)	1/Si-	Qi	Pi	Sıralama
Li-ion	0,0786	0,1434	6,9723	0,2840	100	1
VRLA	0,0348	0,1643	6,0850	0,2140	75	4
NaS	0,0751	0,1928	5,1879	0,2280	80	3
NaNiCl ₂	0,0591	0,2232	4,4796	0,1911	67	5
VRFB	0,0467	0,1466	6,8206	0,2476	87	2
Toplam	0,2943	0,8704	29,5454			

EK 16. 2. AŞAMA 2. FAZ Y2 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE ANA KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,24	0,63	0,73	0,30	0,43	0,57	0,70
C2	0,63	0,73	0,15	0,24	0,20	0,20	0,20	0,20	0,61	0,74	0,26	0,39
C3	0,57	0,70	0,30	0,43	0,26	0,39	0,61	0,74	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C1		C2		C3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C1	0,00	0,00	-0,51	-0,34	-0,40	-0,14
C2	0,34	0,51	0,00	0,00	0,22	0,48
C3	0,14	0,40	-0,48	-0,22	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C1		C2		C3	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C1	1,00	1,00	0,17	0,31	0,25	0,62
C2	3,27	5,81	1,00	1,00	2,14	5,25
C3	1,62	3,98	0,19	0,47	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3
C1	1,00	0,83	0,74
C2	0,83	1,00	0,74
C3	0,74	0,74	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3
C1	1,000	0,199	0,321
C2	3,781	1,000	2,733
C3	2,073	0,244	1,000

EK 17. 2. AŞAMA 2. FAZ Y2 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C1 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C11				C12				C13			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C11	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,55	0,65	0,35	0,45
C12	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,80	0,20	0,35
C13	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C11		C12		C13	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C11	0,00	0,00	-0,30	-0,10	0,10	0,30
C12	0,10	0,30	0,00	0,00	0,30	0,60
C13	-0,30	-0,10	-0,60	-0,30	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C11		C12		C13	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C11	1,00	1,00	0,35	0,71	1,41	2,82
C12	1,41	2,82	1,00	1,00	2,82	7,94
C13	0,35	0,71	0,13	0,35	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C11	C12	C13
C11	1,00	0,80	0,80
C12	0,80	1,00	0,70
C13	0,80	0,70	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C11	C12	C13
C11	1,000	0,425	1,692
C12	1,692	1,000	3,767
C13	0,425	0,168	1,000

EK 18. 2. AŞAMA 2. FAZ Y2 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C2 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C21				C22				C23			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55
C22	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
C23	0,45	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C21		C22		C23	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C21	0,00	0,00	0,10	0,30	-0,10	0,10
C22	-0,30	-0,10	0,00	0,00	-0,10	0,10
C23	-0,10	0,10	-0,10	0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C21		C22		C23	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C21	1,00	1,00	1,41	2,82	0,71	1,41
C22	0,35	0,71	1,00	1,00	0,71	1,41
C23	0,71	1,41	0,71	1,41	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C21	C22	C23
C21	1,00	0,80	0,80
C22	0,80	1,00	0,80
C23	0,80	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C21	C22	C23
C21	1,000	1,692	0,848
C22	0,425	1,000	0,848
C23	0,848	0,848	1,000

EK 19. 2. AŞAMA 2. FAZ Y2 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C3 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C31				C32			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45
C32	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C31		C32	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C31	0,00	0,00	0,10	0,30
C32	-0,30	-0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C31		C32	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
C31	1,00	1,00	1,41	2,82
C32	0,35	0,71	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C31	C32
C31	1,00	0,80
C32	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C31	C32
C31	1,000	1,692
C32	0,425	1,000

EK 20. 2. AŞAMA 2. FAZ Y2 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN COPRAS YÖNTEMİNE ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Adım 2	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
A1	0,0357	0,2143	0,2766	0,0357	0,3571	0,0357	0,3571	0,2857
A2	0,3571	0,3571	0,2350	0,3571	0,0357	0,2778	0,0357	0,3571
A3	0,2143	0,3214	0,3571	0,3151	0,2613	0,0676	0,3158	0,3214
A4	0,2857	0,2413	0,3201	0,2857	0,2857	0,3571	0,2500	0,2500
A5	0,1071	0,0357	0,0357	0,1356	0,3214	0,1190	0,2827	0,0357

Adım 3	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
Alt kriterlerin ağırlıkları	0,0344	0,0712	0,0176	0,2531	0,1625	0,1928	0,1756	0,0929
A1	0,0012	0,0153	0,0049	0,0090	0,0580	0,0069	0,0627	0,0266
A2	0,0123	0,0254	0,0041	0,0904	0,0058	0,0535	0,0063	0,0332
A3	0,0074	0,0229	0,0063	0,0798	0,0425	0,0130	0,0554	0,0299
A4	0,0098	0,0172	0,0056	0,0723	0,0464	0,0688	0,0439	0,0232
A5	0,0037	0,0025	0,0006	0,0343	0,0522	0,0229	0,0496	0,0033

Adım-4-5-6	Si+ (max)	Si- (min)	1/Si-	Qi	Pi	Sıralama
Li-ion	0,0893	0,0953	10,4931	0,3299	100	1
VRLA	0,0395	0,1916	5,2203	0,1592	48	5
NaS	0,0853	0,1718	5,8219	0,2188	66	3
NaNiCl ₂	0,0671	0,2202	4,5412	0,1713	52	4
VRFB	0,0530	0,1164	8,5938	0,2501	76	2
Toplam	0,3341	0,7952	34,6703			

EK 21. 2. AŞAMA 2. FAZ Y3 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE ANA KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,35	0,66	0,80	0,25	0,39	0,61	0,75
C2	0,66	0,80	0,21	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,33	0,47	0,54	0,67
C3	0,61	0,75	0,25	0,39	0,54	0,67	0,33	0,47	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C1		C2		C3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C1	0,00	0,00	-0,59	-0,31	-0,50	-0,22
C2	0,31	0,59	0,00	0,00	-0,34	-0,07
C3	0,22	0,50	0,07	0,34	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C1		C2		C3	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C1	1,00	1,00	0,13	0,34	0,18	0,47
C2	2,92	7,67	1,00	1,00	0,31	0,79
C3	2,14	5,62	1,27	3,24	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3
C1	1,00	0,72	0,72
C2	0,72	1,00	0,73
C3	0,72	0,73	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3
C1	1,000	0,170	0,232
C2	3,813	1,000	0,399
C3	2,794	1,646	1,000

EK 22. 2. AŞAMA 2. FAZ Y3 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C1 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C11				C12				C13			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C11	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,65	0,80	0,20	0,35
C12	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,80	0,20	0,35
C13	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C11		C12		C13	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C11	0,00	0,00	-0,60	-0,30	0,30	0,60
C12	0,30	0,60	0,00	0,00	0,30	0,60
C13	-0,60	-0,30	-0,60	-0,30	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C11		C12		C13	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C11	1,00	1,00	0,13	0,35	2,82	7,94
C12	2,82	7,94	1,00	1,00	2,82	7,94
C13	0,13	0,35	0,13	0,35	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C11	C12	C13
C11	1,00	0,70	0,70
C12	0,70	1,00	0,70
C13	0,70	0,70	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C11	C12	C13
C11	1,000	0,168	3,767
C12	3,767	1,000	3,767
C13	0,168	0,168	1,000

EK 23. 2. AŞAMA 2. FAZ Y3 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C2 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C21				C22				C23			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55	0,35	0,45	0,55	0,65
C22	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
C23	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C21		C22		C23	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C21	0,00	0,00	-0,10	0,10	-0,30	-0,10
C22	-0,10	0,10	0,00	0,00	-0,10	0,10
C23	0,10	0,30	-0,10	0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C21		C22		C23	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C21	1,00	1,00	0,71	1,41	0,35	0,71
C22	0,71	1,41	1,00	1,00	0,71	1,41
C23	1,41	2,82	0,71	1,41	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C21	C22	C23
C21	1,00	0,80	0,80
C22	0,80	1,00	0,80
C23	0,80	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C21	C22	C23
C21	1,000	0,848	0,425
C22	0,848	1,000	0,848
C23	1,692	0,848	1,000

EK 24. 2. AŞAMA 2. FAZ Y3 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C3 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C31				C32			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45
C32	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C31		C32	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C31	0,00	0,00	0,10	0,30
C32	-0,30	-0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C31		C32	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
C31	1,00	1,00	1,41	2,82
C32	0,35	0,71	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C31	C32
C31	1,00	0,80
C32	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C31	C32
C31	1,000	1,692
C32	0,425	1,000

EK 25. 2. AŞAMA 2. FAZ Y3 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN COPRAS YÖNTEMİNE ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Adım 2	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
A1	0,0357	0,2143	0,2766	0,0357	0,3571	0,0357	0,3571	0,2857
A2	0,3571	0,3571	0,2350	0,3571	0,0357	0,2778	0,0357	0,3571
A3	0,2143	0,3214	0,3571	0,3151	0,2613	0,0676	0,3158	0,3214
A4	0,2857	0,2413	0,3201	0,2857	0,2857	0,3571	0,2500	0,2500
A5	0,1071	0,0357	0,0357	0,1356	0,3214	0,1190	0,2827	0,0357

Adım 3	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
Alt kriterlerin ağırlıkları	0,0388	0,0671	0,0105	0,1155	0,1370	0,1799	0,2951	0,1562
A1	0,0014	0,0144	0,0029	0,0041	0,0489	0,0064	0,1054	0,0446
A2	0,0139	0,0240	0,0025	0,0412	0,0049	0,0500	0,0105	0,0558
A3	0,0083	0,0216	0,0038	0,0364	0,0358	0,0122	0,0932	0,0502
A4	0,0111	0,0162	0,0034	0,0330	0,0391	0,0642	0,0738	0,0390
A5	0,0042	0,0024	0,0004	0,0157	0,0440	0,0214	0,0834	0,0056

Adım-4-5-6	Si+ (max)	Si- (min)	1/Si-	Qi	Pi	Sıralama
Li-ion	0,1500	0,0781	12,7979	0,3136	100	1
VRLA	0,0663	0,1364	7,3323	0,1601	51	5
NaS	0,1434	0,1180	8,4767	0,2518	80	2
NaNiCl ₂	0,1128	0,1670	5,9876	0,1894	60	4
VRFB	0,0890	0,0880	11,3588	0,2342	75	3
Toplam	0,5615	0,5875	45,9533			

EK 26. 2. AŞAMA 2. FAZ Y4 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE ANA KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,34	0,67	0,81	0,23	0,37	0,63	0,78
C2	0,67	0,81	0,19	0,34	0,20	0,20	0,20	0,20	0,22	0,34	0,67	0,78
C3	0,63	0,78	0,23	0,37	0,67	0,78	0,22	0,34	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C1		C2		C3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C1	0,00	0,00	-0,62	-0,33	-0,55	-0,26
C2	0,33	0,62	0,00	0,00	-0,56	-0,33
C3	0,26	0,55	0,33	0,56	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C1		C2		C3	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C1	1,00	1,00	0,12	0,32	0,15	0,41
C2	3,13	8,51	1,00	1,00	0,14	0,32
C3	2,45	6,68	3,13	6,92	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3
C1	1,00	0,71	0,71
C2	0,71	1,00	0,77
C3	0,71	0,77	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3
C1	1,000	0,155	0,198
C2	4,131	1,000	0,179
C3	3,244	3,867	1,000

EK 27. 2. AŞAMA 2. FAZ Y4 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C1 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C11				C12				C13			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C11	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,65	0,80	0,65	0,80	0,20	0,35
C12	0,65	0,80	0,20	0,35	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,80	0,20	0,35
C13	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C11		C12		C13	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C11	0,00	0,00	-0,60	-0,30	0,30	0,60
C12	0,30	0,60	0,00	0,00	0,30	0,60
C13	-0,60	-0,30	-0,60	-0,30	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C11		C12		C13	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C11	1,00	1,00	0,13	0,35	2,82	7,94
C12	2,82	7,94	1,00	1,00	2,82	7,94
C13	0,13	0,35	0,13	0,35	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C11	C12	C13
C11	1,00	0,70	0,70
C12	0,70	1,00	0,70
C13	0,70	0,70	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C11	C12	C13
C11	1,000	0,168	3,767
C12	3,767	1,000	3,767
C13	0,168	0,168	1,000

EK 28. 2. AŞAMA 2. FAZ Y4 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C2 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C21				C22				C23			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,65	0,80	0,20	0,35	0,35	0,45	0,55	0,65
C22	0,20	0,35	0,65	0,80	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55	0,45	0,55
C23	0,55	0,65	0,35	0,45	0,45	0,55	0,45	0,55	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C21		C22		C23	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C21	0,00	0,00	0,30	0,60	-0,30	-0,10
C22	-0,60	-0,30	0,00	0,00	-0,10	0,10
C23	0,10	0,30	-0,10	0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C21		C22		C23	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C21	1,00	1,00	2,82	7,94	0,35	0,71
C22	0,13	0,35	1,00	1,00	0,71	1,41
C23	1,41	2,82	0,71	1,41	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C21	C22	C23
C21	1,00	0,70	0,80
C22	0,70	1,00	0,80
C23	0,80	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C21	C22	C23
C21	1,000	3,767	0,425
C22	0,168	1,000	0,848
C23	1,692	0,848	1,000

EK 29. 2. AŞAMA 2. FAZ Y4 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C3 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C31				C32			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,55	0,65	0,35	0,45
C32	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C31		C32	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C31	0,00	0,00	0,10	0,30
C32	-0,30	-0,10	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C31		C32	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
C31	1,00	1,00	1,41	2,82
C32	0,35	0,71	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C31	C32
C31	1,00	0,80
C32	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C31	C32
C31	1,000	1,692
C32	0,425	1,000

EK 30. 2. AŞAMA 2. FAZ Y4 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN COPRAS YÖNTEMİNE ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Adım 2	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
A1	0,0357	0,2143	0,2766	0,0357	0,3571	0,0357	0,3571	0,2857
A2	0,3571	0,3571	0,2350	0,3571	0,0357	0,2778	0,0357	0,3571
A3	0,2143	0,3214	0,3571	0,3151	0,2613	0,0676	0,3158	0,3214
A4	0,2857	0,2413	0,3201	0,2857	0,2857	0,3571	0,2500	0,2500
A5	0,1071	0,0357	0,0357	0,1356	0,3214	0,1190	0,2827	0,0357

Adım 3	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
Alt kriterlerin ağırlıkları	0,0305	0,0528	0,0083	0,1736	0,0674	0,1184	0,3590	0,1900
A1	0,0011	0,0113	0,0023	0,0062	0,0241	0,0042	0,1282	0,0543
A2	0,0109	0,0189	0,0019	0,0620	0,0024	0,0329	0,0128	0,0679
A3	0,0065	0,0170	0,0030	0,0547	0,0176	0,0080	0,1134	0,0611
A4	0,0087	0,0127	0,0026	0,0496	0,0193	0,0423	0,0897	0,0475
A5	0,0033	0,0019	0,0003	0,0235	0,0217	0,0141	0,1015	0,0068

Adım-4-5-6	Si+ (max)	Si- (min)	1/Si-	Qi	Pi	Sıralama
Li-ion	0,1825	0,0492	20,3263	0,3460	100	1
VRLA	0,0807	0,1290	7,7525	0,1431	41	5
NaS	0,1744	0,1068	9,3645	0,2498	72	2
NaNiCl ₂	0,1373	0,1353	7,3935	0,1967	57	4
VRFB	0,1083	0,0648	15,4411	0,2325	67	3
Toplam	0,6831	0,4850	60,2780			

EK 31. 2. AŞAMA 2. FAZ Y5 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE ANA KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C1				C2				C3			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,54	0,65	0,35	0,46	0,66	0,78	0,22	0,35
C2	0,35	0,46	0,54	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,45	0,54	0,39	0,48
C3	0,22	0,35	0,66	0,78	0,39	0,48	0,45	0,54	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C1		C2		C3	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C1	0,00	0,00	0,08	0,30	0,31	0,56
C2	-0,30	-0,08	0,00	0,00	-0,03	0,14
C3	-0,56	-0,31	-0,14	0,03	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C1		C2		C3	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C1	1,00	1,00	1,32	2,82	2,92	6,92
C2	0,35	0,76	1,00	1,00	0,91	1,63
C3	0,14	0,34	0,61	1,10	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C1	C2	C3
C1	1,00	0,78	0,75
C2	0,78	1,00	0,83
C3	0,75	0,83	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C1	C2	C3
C1	1,000	1,613	3,688
C2	0,434	1,000	1,053
C3	0,183	0,713	1,000

EK 32. 2. AŞAMA 2. FAZ Y5 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C1 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C11				C12				C13			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C11	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,55	0,65	0,35	0,45
C12	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
C13	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C11		C12		C13	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C11	0,00	0,00	-0,30	-0,10	0,10	0,30
C12	0,10	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
C13	-0,30	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C11		C12		C13	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C11	1,00	1,00	0,35	0,71	1,41	2,82
C12	1,41	2,82	1,00	1,00	1,00	1,00
C13	0,35	0,71	1,00	1,00	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C11	C12	C13
C11	1,00	0,80	0,80
C12	0,80	1,00	1,00
C13	0,80	1,00	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C11	C12	C13
C11	1,000	0,425	1,692
C12	1,692	1,000	1,000
C13	0,425	1,000	1,000

EK 33. 2. AŞAMA 2. FAZ Y5 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C2 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C21				C22				C23			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65	0,55	0,65	0,35	0,45
C22	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
C23	0,35	0,45	0,55	0,65	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C21		C22		C23	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C21	0,00	0,00	-0,30	-0,10	0,10	0,30
C22	0,10	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
C23	-0,30	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C21		C22		C23	
	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}	S_{ijL}	S_{ijU}
C21	1,00	1,00	0,35	0,71	1,41	2,82
C22	1,41	2,82	1,00	1,00	1,00	1,00
C23	0,35	0,71	1,00	1,00	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C21	C22	C23
C21	1,00	0,80	0,80
C22	0,80	1,00	1,00
C23	0,80	1,00	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C21	C22	C23
C21	1,000	0,425	1,692
C22	1,692	1,000	1,000
C23	0,425	1,000	1,000

EK 34. 2. AŞAMA 2. FAZ Y5 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS SEÇİMİNE AİT PBAHP YÖNTEMİNE GÖRE C3 ANA KRİTERİNE BAĞLI ALT KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Karar matrisi	C31				C32			
	μ_L	μ_U	v_L	v_U	μ_L	μ_U	v_L	v_U
C31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,35	0,45	0,55	0,65
C32	0,55	0,65	0,35	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20

Farklar matrisi	C31		C32	
	d_{ijL}	d_{ijU}	d_{ijL}	d_{ijU}
C31	0,00	0,00	-0,30	-0,10
C32	0,10	0,30	0,00	0,00

İç çarpımlar matrisi	C31		C32	
	s_{ijL}	s_{ijU}	s_{ijL}	s_{ijU}
C31	1,00	1,00	0,35	0,71
C32	1,41	2,82	1,00	1,00

Belirleyici değer matrisi	C31	C32
C31	1,00	0,80
C32	0,80	1,00

Normalize edilmemiş ağırlık matrisi	C31	C32
C31	1,000	0,425
C32	1,692	1,000

EK 35. 2. AŞAMA 2. FAZ Y5 OPERASYONEL AMACI İÇİN BEDS ALTERNATİFLERİNİN COPRAS YÖNTEMİNE ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Adım 2	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
A1	0,0357	0,2143	0,2766	0,0357	0,3571	0,0357	0,3571	0,2857
A2	0,3571	0,3571	0,2350	0,3571	0,0357	0,2778	0,0357	0,3571
A3	0,2143	0,3214	0,3571	0,3151	0,2613	0,0676	0,3158	0,3214
A4	0,2857	0,2413	0,3201	0,2857	0,2857	0,3571	0,2500	0,2500
A5	0,1071	0,0357	0,0357	0,1356	0,3214	0,1190	0,2827	0,0357

Adım 3	Faydasız C11	Faydasız C12	Faydasız C13	Faydasız C21	Faydasız C22	Faydasız C23	Faydalı C31	Faydalı C32
Alt kriterlerin ağırlıkları	0,1991	0,2358	0,1549	0,0786	0,0931	0,0611	0,0614	0,1160
A1	0,0071	0,0505	0,0428	0,0028	0,0332	0,0022	0,0219	0,0332
A2	0,0711	0,0842	0,0364	0,0281	0,0033	0,0170	0,0022	0,0414
A3	0,0427	0,0758	0,0553	0,0248	0,0243	0,0041	0,0194	0,0373
A4	0,0569	0,0569	0,0496	0,0225	0,0266	0,0218	0,0154	0,0290
A5	0,0213	0,0084	0,0055	0,0107	0,0299	0,0073	0,0174	0,0041

Adım-4-5-6	Si+ (max)	Si- (min)	1/Si-	Qi	Pi	Sıralama
Li-ion	0,0551	0,1387	7,2092	0,2626	71	2
VRLA	0,0436	0,2401	4,1651	0,1635	44	5
NaS	0,0567	0,2270	4,4056	0,1835	50	3
NaNiCl ₂	0,0444	0,2342	4,2692	0,1672	45	4
VRFB	0,0215	0,0831	12,0291	0,3677	100	1
Toplam	0,2213	0,9231	32,0783			