

# TÜRK MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA VE EĞİTİMİ DERGİSİ

2024 - Cilt: 3 Sayı: 1

ISSN: 2822-3454  
E-ISSN: 2980-213X

Turkish Journal of Engineering  
Research and Education

2024 - Vol: 3 No: 1

Bu dergi Türk Eğitim-Sen tarafından yayınlanmaktadır.

This journal is published by Türk Eğitim-Sen.



İmtiyaz Sahibi/ Owner	Talip GEYLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKANI
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü /Director	Cengiz KOCAKAPLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKAN YARDIMCISI
Yazışma Adresi / Correspondence Address	Erzurum Mahallesi Talatpaşa Bulvarı No:160 Kat:6 Cebeci/ANKARA
İnternet Adresi / Web Address	<a href="https://www.tmaed.org">https://www.tmaed.org</a>
Yayın Türü /Publication Type	Sürekli / Periodical Yılda iki sayı yayımlanır: Mayıs, Kasım Published two issues per year: May, November
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Murat Erhan BALCI – Balıkesir Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Nuray GEDİK – Balıkesir Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Baybars Ali FİL- Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Feray KÖÇKAR - Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. İsmail ŞAHİN - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU - İstanbul Ticaret Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa GÜNAY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Osman KOLA - Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Prof. Dr. Recep BİRGÜL – Carroll College Prof. Dr. Şenol GÜRSOY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ - Karadeniz Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Adem TEKEREK - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İlker TEKİN - Karabük Üniversitesi Doç. Dr. Mustafa Selman AYDOĞAN - Balıkesir Üniversitesi Doç. Dr. Nihat DÖNGEL- Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Osman ÖZKARACA - Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Doç. Dr. Tuba GÖZEL - Gebze Teknik Üniversitesi
Editör Kurulu / Editorial Board	Prof. Dr. Abid ABU-TAIR - British University in Dubai Prof. Dr. Ahmed F. ZOBAA-Brunel University Prof. Dr. Adil EL-KORDI - Beirut Arab University Prof. Dr. Ali Fuat BOZ – Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Behnam MOHAMMADI-IVATLOO - University of Tabriz Prof. Dr. Can HAŞIMOĞLU– Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Çetin ELMAS - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. F. P. Garcia MARQUEZ - University of Castilla-La Mancha Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN - Dokuz Eylül Üniversitesi Prof. Dr. Iqbal BABAYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Jamal KHATIB - Beirut Arab University Prof. Dr. John KINUTHIA - University of South Wales Prof. Dr. Maksud BOBOJANOV - Tashkent State Technical University Prof. Dr. Mürsel ERDAL - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nurali YUSUFBEYLİ - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU - Gaziantep Üniversitesi Prof. Dr. Sergey BUSHİYEYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Seyhan FIRAT - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Tuncay YİÇİT – Süleyman Demirel Üniversitesi Prof. Dr. Vilayet VELİYEYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Z. ABDUL-MALEK - Universiti Teknologi Malaysia Assoc. Prof. Dr. S. H. E. Abdel ALEEM- Valley High Institute of Eng. and Tech. Dr. Abbas RABIEE - University of Zanjan Dr. Ali AHMADIAN - University of Bonab Dr. Amin Mohammadpour SHOTORBANI - University of British Columbia Dr. D. R. ALMALYK - The Islam Karimov Tashkent State Technical University Dr. Morteza Zare OSKOU EI - Qatar University Dr. Pouya IFAEİ - Kyung Hee University Dr. Saeed PEYGHAMI - Aalborg University Dr. Vahid VAHIDINASAB - Nottingham Trent University Dr. Zeynep HASIRCI TUĞCU - Karadeniz Teknik Üniversitesi

Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Doç. Dr. Yakup KAYA – Karabük Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Mehmet Serkan YILDIRIM – Gazi Üniversitesi
Dil Editörleri / Language Editors	Türkçe: Dr. Öğr. Üyesi Ünsal Yılmaz YEŞİLDAL-Akdeniz Üniversitesi İngilizce: Prof. Dr. Recep BİRGÜL –Carroll College Doç. Dr. Erkan YÜCE – Aksaray Üniversitesi
Teknik Editörler / Technical Editors	Doç. Dr. Adem TEKEREK - Gazi Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Öğr. Gör. Dr. Şevket CANTÜRK – Balıkesir Üniversitesi Öğr. Gör. Mehmet GÜLSÜN – Gazi Üniversitesi

Bu Sayının Hakemleri/ Reviewers for the Current Issue	Prof. Dr. Canan AKSU CANBAY - Fırat Üniversitesi Prof. Dr. Gülgün YILMAZ - Eskişehir Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Sevda ŞAHİNBAŞ - İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Adem TEKEREK - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE - İzmir Demokrasi Üniversitesi Doç. Dr. Oğuzhan CEYLAN - Kadir Has Üniversitesi Doç. Dr. Serdar BİROĞUL - Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Erdiç ÖZ - Atatürk Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ - Balıkesir Üniversitesi Dr. Hüseyin KARADAĞ – Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI - Düzce Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Oktay KARAKAYA - Balıkesir Üniversitesi Dr. Ayşe Aybike ŞEKER - Aselsan Akademi Dr. Mehmet Türker TAKÇI - University of Cardiff
--	---

## HAKKINDA

Türk Eğitim-Sen'in bilimsel yayın organı olan Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, mühendislik alanında hazırlanan güncel, özgün ve nitelikli çalışmalarını yayımlayan uluslararası hakemli bilimsel bir dergidir. Bu dergi, ilk sayısı 15 Haziran 2014 tarihinde yayımlanan "21. Yüzyılda Fen ve Teknik" dergisinin bölünmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, Mayıs ve Kasım aylarında yılda iki sayı olarak yayımlanmaktadır. Açık erişim bir dergidir ve makaleler için herhangi bir değerlendirme ve başvuru ücreti talep etmez.

## ABOUT

Turkish Journal of Engineering Research and Education, the scientific publication of Türk Eğitim-Sen, is an international peer-reviewed scientific journal that publishes current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal emerged as a result of the division of the "Science and Technology in 21st Century" journal, the first issue of which was published on June 15, 2014. Turkish Journal of Engineering Research and Education is published twice a year, in May and November. It is an open access journal and does not charge any evaluation and submission fee for manuscripts.

## AMAÇ ve KAPSAM

Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitim Dergisi, mühendislik alanında güncel, özgün ve nitelikli çalışmalarını yayımlayarak, mühendislik öğrencilerinin eğitimlerini ve mühendislerin yaşam boyu mesleki gelişimlerini desteklemeyi, ayrıca mühendislik alan yazınına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu dergi, tüm mühendislik disiplinlerinden özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler ve editöre mektupları yayımlamak üzere kabul eder.

## AIMS and SCOPE

Turkish Journal of Engineering Research and Education aims to support the education of engineering students and the lifelong professional development of engineers, and also to contribute to the engineering literature, by publishing current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal welcomes original research articles, reviews, short articles and letters to editor from all engineering disciplines for publication.

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve Tedarikçi Seçimi**  
*Sustainable Supply Chain Management and Supplier Selection with Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods* 1  
Burhan Ülker, Tijen Över Özçelik
- Proof of concept: Green Grass in Novel Waste Plastics Concrete to Mitigate the Effects of Climate Change** 19  
John Kinuthia
- Cost Optimization for Sustainable Economy with Heuristic Algorithms in Power System** 26  
*Güç Sisteminde Sezgisel Algoritmalarla Sürdürülebilir Ekonomi Amaçlı Maliyet Optimizasyonu*  
Serkan İşcan, Gürcan Lokman
- Three-Phase Pole-Changing Winding with Ratio of Poles 4:6** 38  
Makhsud Bobojanov, Dauletbek Rismukhamedov, Furkat Tuychiev, Khusniddin Shamsutdinov
- 6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Zemin Davranışları: Vaka Analizi** 48  
*Determination of Soil Behaviour of 6th February Kahramanmaraş Earthquakes: Case Study*  
Aybüke Nur Tuncel Gökdoğan, Nihat Sinan Işık, Seyhan Fırat

### DERLEME MAKALELERİ / REVIEW ARTICLES

- Sodyum-iyon Bataryaların Yapısı ve Elektrokimyasal Mekanizmaları** 58  
*The Structure and Electrochemical Mechanisms of Sodium-ion Batteries*  
Esra Balcı, Sebahat Altundağ, Serdar Altın

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve Tedarikçi Seçimi

## *Sustainable Supply Chain Management and Supplier Selection with Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods*

Burhan Ülker<sup>1,\*</sup> Tijen Över Özçelik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> OTOKAR Otomotiv Ve Savunma Sanayi A.Ş., Sakarya, Türkiye.

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Sakarya, Türkiye.

Geliş / Received: 20.12.2023

Kabul / Accepted: 08.02.2024

\*Sorumlu Yazar: Burhan Ülker [burhanulkers@gmail.com](mailto:burhanulkers@gmail.com)

**ÖZ:** Bugünün nesillerinin gereksinimlerini giderirken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını şimdiden planlamanın önemi eskiye göre daha da artmıştır. Bu çalışmada, tedarikçi değerlendirme ve seçme sürecine sürdürülebilirlik başlığının eklenmesiyle günümüz şartlarına daha uygun hale getirilerek ve objektif değerlere bağlı kalınması amaçlanmaktadır. İlk olarak literatür araştırması yapılmış ve sürdürülebilir tedarikçi seçimi kriterleri tespit edilmiştir. Daha sonra savunma sanayisinde üretim yapan ana Sanayi firmasından seçilen karar vericilerden, bu çalışmanın uygulamasında kullanılmak amacıyla belirlenmiş olan kriterleri ve alt kriterleri önem derecelerine göre değerlendirmeleri istenmiştir. Kriterlerin Bulanık AHP yöntemi ile ağırlıkları belirlenmiştir. Sürdürülebilir tedarikçi kavramının tedarikçi seçimi süreçlerine dahil olmasıyla çevre, sosyal, kalite güvence, ekonomi ve üretim kriterleri kullanılarak tedarikçi seçimi yapılmıştır. Alternatif seçiminde ise Bulanık EDAS ve Bulanık VIKOR yöntemleri kullanılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde firmanın çalıştığı aktif tedarikçilerin sıralamalarda ilk çıktığı gözlemlenmiştir. Karar vericilerin tutarlı olduğunun bir göstergesidir. Kullanılan iki yöntemde aynı alternatifin ilk çıkması yöntemlerin doğru uygulandığını göstermektedir. Farklı çok kriterli karar verme metodlarının kombinasyonu ve ele alınan çok sayıda alt ölçütlerin sürdürülebilirlik temalı olması, mevcut çalışmalara göre bu tez çalışmasını özgün ve kaliteli kılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık Mantık, Çok Kriterli Karar Verme, Sürdürülebilirlik, Tedarikçi Yönetimi, Tedarik Zinciri

**ABSTRACT:** The importance of planning for the needs of future generations while meeting the needs of today's generations has increased even more compared to the past. In this study, it is aimed to make the supplier evaluation and selection process more suitable for current conditions by adding the sustainability topic and adhering to objective criteria. Firstly, a literature review was conducted, and the criteria for sustainable supplier selection were identified. Subsequently, decision-makers selected from the main industry company producing in the defense industry were asked to evaluate the criteria and sub-criteria determined for use in the application of this study according to their importance ratings. The weights of the criteria were determined using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Sustainable supplier selection was made using environmental, social, quality assurance, economic, and production criteria with the inclusion of the concept of sustainable supply in the supplier selection processes. Fuzzy EDAS and Fuzzy VIKOR methods were used in alternative selection.

When the results were examined, it was observed that the active suppliers with whom the company works came out on top in the rankings. This is an indicator of the consistency of decision-makers. The fact that the same alternative came out on top in both methods indicates that the methods were applied correctly. The combination of different multi-criteria decision-making methods and the large number of sub-criteria considered being sustainability-themed make this thesis study original and high-quality compared to existing studies.

**Keywords:** Sustainability, Supply Chain, Supplier Management, Multi-Criteria Decision Making, Fuzzy

## 1. GİRİŞ

İşletmeler ürünlerinin nihai kullanıcıya ulaşmasını ve satış sonrası hizmetler dahil tüm süreçlerin yönetildiği tedarik zinciri yönetimi kavramının önemi son yıllarda önemli hale gelmiştir. Tedarik zinciri yönetimi, "ham madde tedariki, bu ham maddelerin ara mal ve nihai ürüne dönüştürülmesi ve nihai ürünlerin müşterilere dağıtılmasını içeren, üretici ve dağıtıcıların oluşturduğu bir ağ" biçiminde tanımlanmaktadır [1]. Satın almacılar, tedarik zinciri yöneticileri, akademisyenler ve politikacılar dahil artan rekabetçi küresel ortamda tedarik zinciri yönetiminin kritik rolü olduğunu ve bunu başarıyla yönetenlerin çeşitli avantajlar elde ettiğini kabul etmektedir [2]. Ekonomimiz, maddesel dünyamızın sınırlı fiziksel kaynaklarını kullanma ve işlenmemiş atıkları ele alma konularında ciddi bir baskı altındadır. Çevresel zararlar, rekabet şartları, çalışanların iş ortamı ve koşulları göz önüne alındığında işletmeler için uygun tedarikçi ile iş birliği yapmanın önemi artmaktadır. Özellikle insanlığın gezegenimize yaydığı atıkları düşündüğümüzde, gerçekten gerekli olmayan şeylerin üretimini ve tüketimini durdurmak yerine, doğanın kendi yenilenebilir kapasitesini göz önüne alarak insan ve çevre için zararlı olan üretim süreçlerini düzeltmeye odaklanan yeni üretim yöntemleri ve süreçleri geliştirmek önemlidir [3].

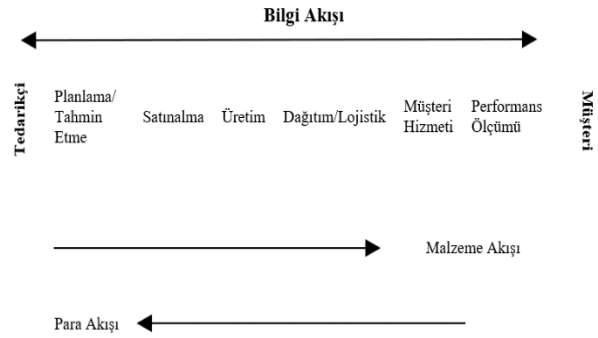
Sürdürülebilir bir perspektifle küreselleşme ve dış kaynak kullanımı, işletmelerin kurumsal gelecek stratejilerini belirleme ve rekabetçi bir ortamda varlıklarını sürdürme çabalarında sürdürülebilir tedarikçilerle çalışmasının önemini artırmaktadır [4]. Tedarikçiler sürdürülebilir tedarik zinciri çalışmalarının çevresel, ekonomik ve sosyal konularda faydalar sağlanmasında önemli rol üstlenmektedir. Çoğu şirket sürdürülebilirlik konularında hedefler belirlemişler ve bu hedeflere giderken tedarikçilerinin de aynı yolu katetmesini istemektedir. Çevre konularında ana sanayi bilinci arttıkça tedarikçilerin bilinçlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Geçmişte sadece ekonomik ölçütlerin üzerine kurulu olan tedarik zinciri yönetiminde tedarikçi seçilmesi, zaman geçtikçe çevresel unsurların göz önüne alınmasıyla yeşil tedarik zincirinde sürdürülebilir tedarikçi seçimine dönüşmüştür [5].

Günümüzde yapılan sürdürülebilirlik uygulamalarına bakıldığında sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi performansını arttırmak şirketlerin ana performans ölçüm kriterlerinden birisi haline gelmiştir [6].

## 2. TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ

Tedarik zinciri yönetimi satın alma, tedarik, lojistik, planlama ve sipariş yönetimini kapsar [7]. Görüldüğü üzere bu süreç ve akışlar karmaşık ve çok fazla aşamayı içerisinde barındırır. Tedarik zinciri kavramı bir ürünün son müşteri için orta çıkartılması ve lojistik işlemlerinin tüm tedarikçiler ve ana sanayi arasındaki ağ olarak tanımlanabilir (Tablo 1).

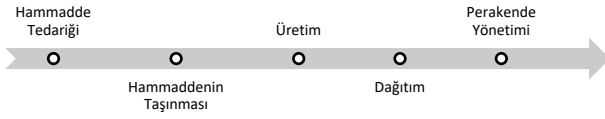
**Tablo 1:** Bir işletmenin tedarik zinciri gösterimi.



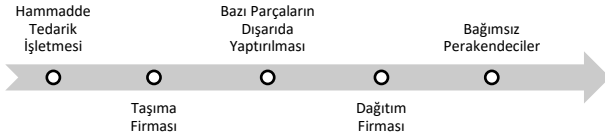
### 2.1 Tedarik Zinciri Yönetimi Kavramı

Tedarik zinciri ve yönetimi, malzeme ve nihai ürünlerin ham maddeden nihai ürün arzına kadar olan sürecin yönetimini kapsayan aynı zamanda tedarikçilerin tedarikçilerinin üretim aşamalarında diğer tedarikçilere avantaj sağlamasına yarayacak teknolojik ve yazılım dahil yeteneklerinden daha verimli faydalanma üzerine odaklanan ve sıradanlaşmış üretim, yönetim ve gelişim faaliyetlerinin ötesinde daha yenilikçi bir felsefeyle yönetilen sistemdir şeklinde tanımlanmışlardır [9]. Tedarik zinciri yönetimi tanımlarına bakıldığı zaman en çok kullanılan başlıkların birleştirilmesiyle şu şekilde bir tanım ortaya çıkmaktadır. Tedarik zinciri yönetimi, ham maddenin başlangıç noktasından nihai ürün haline ulaşana kadar geçen süreçleri kapsar. Ayrıca, ürünün araştırma ve geliştirme aşamalarındaki tüm süreçleri içerir ve bu bağlamda başlatılan araştırma ve geliştirme projelerinin yanı sıra üretim yerinin tüm yazılım bileşenlerini içinde barındırır [8].

Tedarik zinciri yönetiminin başarıya ulaşmasında stok, kalite ve zaman başlıklarının önemi bir gerçektir [10]. Şekil 1'de gösterilen geleneksel tedarik zinciri yönetimi, işletmenin ham maddeden nihai ürün olana kadar olan tüm süreçlerin işletme içerisinde gerçekleşmesini ifade eder. Aynı zamanda daha yavaş karar alma süreçlerini ve daha az operasyonu kapsar. Şekil 2'de gösterilen modern tedarik zinciri yönetimi ise işletmenin bağımsız firmalardan kendi iç süreçlerine destek aldığı durumları kapsar. Modern tedarik zinciri yönetimi daha hızlı ve verimli bir operasyonel süreçtir.



Şekil 1: Geleneksel tedarik zinciri yönetimi.



Şekil 2: Modern tedarik zinciri yönetimi.

## 2.2 Tedarik Zinciri Tarihçesi

1950'lerde ve 1960'larda çoğu üretici, ürün çeşidini az tutarak en az birim maliyete ulaşmayı hedefleyerek seri üretim yapmışlardır. Ürün çeşitliliği açısından bakıldığında ise müşterinin istediği ürünün önemi yoktur. Seri üretimi amaçlayan üreticilerin amacı çok fazla ürün ortaya çıkartarak bu ürün maliyetini düşürmektir. Tedarik zinciri yönetiminin geçmişi 1960'lara kadar uzanmaktadır. Tedarik zinciri yönetiminin birinci araştırması ve ilk adımı olarak kabul edilen fiziksel dağıtım adımı ile ilgili olarak ilk söz Bowersox tarafından yapılmıştır. Fiziksel dağıtım 1990'larda ana sanayiler, tedarikçiler ve onların tedarikçileri ile üretim süreçlerini devam ettiren yapılan iş birlikleri, satın alma ve tedarik birimlerinin şirket binasında bir arada çalışan yeni bir akım haline geleceği tedarik zinciri yönetiminin bir parçası olarak tanınmaya başlanmıştır [11]. 1970'lere geldiği zaman Malzeme İhtiyaç Planlaması sisteminin keşfedilmesiyle üst düzey şirketlerin liderleri maliyet, kalite, ar-ge ve sevkiyat performansı gibi konuları daha fazla incelemeye başlamışlardır [12]. 1970'lerde Üretim Kaynak Planlaması (günümüzde MRP olarak bilinen) popülerleşmeye başlamıştır ve üretim sektörünün

yöneticileri birim üretim maliyeti, kalite performansı, ür-ge ve sevkiyat performansını arttırıcı etkisini farkına varmaya başladılar. 1970'lerin başında Toyota Motor Company'nin başkan yardımcısı Taiichi Ohno tarafından JIT yöntemi geliştirilmiştir [13]. JIT, üretim sürecindeki israfı tamamen ortadan kaldırma ve üretim süreçlerini optimal iyileştirerek bunu uygulamayan üreticilere üstünlük sağlama fikrine dayanan sürekli üretim iyileştirme yaklaşımıdır. 1980'lerin başında batı tarafından duyulan bu yöntem, 1980'lerin sonunda artık bu sürekli iyileştirme yöntemini yaygın şekilde uygulamaya başlamışlardır. Tüm bu çalışmalar ve geliştirmeler sonucu satın alma, planlama ve lojistik departmanlarının yöneticileri, tedarik edilen malzemelerin yönetimi konusunu geliştirerek aslında bugün popüler bir kavram olan tedarik zinciri yönetimi kavramını ortaya çıkarttılar. 1990'lardan sonra tedarik zinciri kavramı tedarikçi sevkiyat performansı, kalite ve fiyat başlıkları altında sürekli gelişmeye devam etmiştir. 2000'lere yaklaşırken küreselleşen dünya düzeninde pazar rekabeti sertleşerek artmıştır. Müşterilerin davranışları değişmiştir ve artık müşteri kendine özel ürünler istemeye başlamıştır [14]. Şirketler artık farklı departmanlar kurmaya ve geçmiş hiyerarşilerini değiştirmeye başlamışlardır.

## 2.3 Tedarik Zinciri Amaç ve Faydaları

Tedarik Zinciri Yönetimi'nin amacı, zincirin her halkasının sorunsuz ve en optimal şekilde çalışmasını sağlamaktır. Bu halkalar zincirdeki her faaliyeti temsil etmektedir ve aynı zamanda bu faaliyetlerin günümüz şirketler arası rekabette sorunsuz çalışması ve müşteriye istediği ürünün ulaşmasını sağlamaktadır [15].

Tedarik zinciri eğer etkin bir şekilde kullanılırsa ulaşılması beklenen hedefler şu şekildedir [16].

- Satın alma kalifiyesini arttırmak,
- Ürün ve bilgi akışının sürekli olmasını sağlamak,
- Yönetim maliyetlerini optimal seviyeye indirmek,
- Yedek parka ve servis hizmetlerini iyileştirerek en iyi seviyeye ulaştırmak,
- Stok maliyetlerini optimal seviyeye indirmek,
- Tedarikçi geliştirme ve seçme faaliyetlerini çok iyi yapmak.



## 2.4 Covid-19 Etkisi Altında Tedarik Zinciri Yönetimi

COVID-19, günümüzde üretim açısından çok öneme sahip Çin'de ilk defa görülmüştür. Wuhan'dan dünyaya sıçramıştır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından küresel salgın ilan edilmiştir. Ülkelerin salgınla başa çıkma amacıyla aldıkları sokağa çıkma ve kapanma kararları sanayileri durma noktasına kadar getirmiş ve çoğu sanayi durmuştur. Çin dünyanın en büyük ham madde tedarikçisi ve üreticisi olma yolundaki son yıllardaki atağı tüm dünya çağında bilinmektedir. Wuhan bölgesi ise bu konuda adeta merkez gibidir. Bu sebeple Wuhan'da başlayan salgın tüm dünyayı etkilemiş ve koronavirüs dünya savaşından bu güne kadar gerçekleşen en büyük küresel olay olarak gösterilmiştir [17]. Pandeminin etkisi altında ise tedarik zinciri yönetiminin aslında ne kadar önemli olduğunu ortaya çıkmıştır. Pek çok ana sanayi ve tedarikçi aksayan tedarik zincirleri neticesinde üretimleri durma noktasına gelmiş, durmuş veya kapanma ile karşı karşıya kalmıştır. Küresel olarak adeta yaşamın durma noktasına geldiği bir Covid-19 süreci yaşadık ve yaşanmaya devam edilmektedir. Bu sürecin ne zaman biteceğiyle ilgili iyimser tablolar görünse bile henüz tam anlamıyla geçmemiştir. Dünyadaki tüm insanları etkisi altına alan Covid-19 birçok sektör olumsuz etkilemektedir. Küresel ölçekte hizmet veren otomotiv, turizm, seyahat, taşımacılık, lojistik, konaklama, restoran, tüketici ürünleri, elektronik, sağlık başta olmak üzere birçok sektör Covid-19'dan etkilenmiştir. Covid-19 insanlık üzerinde ciddi fiziksel ve ruhsal sorunlara sebep olmaktadır. Pandemi nedeniyle pek çok kişi evden çalışma ile tanışırken Covid-19'dan en çok etkilenen sağlık sektörü çalışanları daha zorlayıcı, tehlikeli ve salgınla yakın temas içerisinde çalışmaktadır [18]. Salgın nedeniyle durma noktasına gelen ekonomik aksiyonların ve küçülen piyasanın iyileşmesi için hükümetler ve sektör liderleri tarafından önlemler alınsa da süreç henüz belirsizliğini koruduğu için risk devam etmektedir. Üretimdeki düşüş, istihdam sorunu ve beklentilerin değişmesi sorunların başında gelmektedir [19].

Pandemi etkisi altında otomotiv sektörü şu sebeplerden sorun yaşamıştır [20].

1. Ham maddelerin yurt içinden tedarik edilememesi,

2. Tedarik zincirinde bu durumun tahmininin planlanmaması,
3. Tedarik zincirinde en fazla parça akışına bakılması ancak bütüncül bakılamaması.

Tüm bu zorlukları yaşarken ayakta kalmayı başaranlar, yeni yaklaşımlar geliştiren, eskici yönetim anlayışlarının dışına çıkarak yeni iş ortaklarıyla geliştirdikleri günümüz sorunlarıyla başa çıkma ve sorunsuz yürütme sistematiği geliştiren ve bu sayede sıçrama yapabilen sanayilerdir [21].

Globalleşen dünya salgının çok hızlı şekilde yayılmasına yol açmıştır. Aynı zamanda salgın, hızla değişen dünya ticaret düzeninde pazar belirsizliğine yol açmıştır. Pazar belirsizliği oyuncuların tedarik zinciri yönetimini zorlaştırmış, daha esnek yapıya geçmelerini ve bu şekilde taleplere daha hızlı cevap verebilmelerini sağlamıştır [10].

## 2.5 Çip Krizinin Tedarik Zinciri Yönetimine Etkisi

Bir araç üretiminde ortalama 1000 ile 1400 çip kullanılmaktadır. Teknolojisi yüksek otomotivlerde bu sayı 2500 ile 3000 çip arasına kadar çıkmaktadır [22]. Covid-19'un küresel ölçekte etkili olmasının ardından otomobil üreticileri yaşanan kısıtlamalar, kapanmalar gibi sıkıntılı dönemin otomobillere olan talebi düşüreceğini tahmin ederek bulunarak var olan çip siparişlerini iptal etmiştir ve bu durum yaşanan talep patlamasında müşterilere cevap verememesine neden olmuştur. 2030 yılında otomotiv üretim maliyetinin %45'ini elektronik aksamların oluşturacağı düşünülmektedir. Araç elektronik alt sistemlerinde kullanılmakta olan mikroçiplerin artacak talebin etkisiyle ve arzın yetişememesi durumu göz önüne alındığında maliyetlerinin bu nedenden dolayı 10 yıl içerisinde 600 dolara kadar çıkabileceği düşünülmektedir [23]. Bir otomobil devi, Almanya'da bulunan fabrikasını 2022 yılına kadar kapatma kararı almış ve bu sebeple 1300 operatörünü geçici olarak işten çıkartmıştır [24].

## 3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Son yıllarda kitlelere hitap edebilen insanlar tarafından çokça dile gelmekte olan yeni yaşanabilir gezegen arayışının aslında bir çıkış noktası vardır.

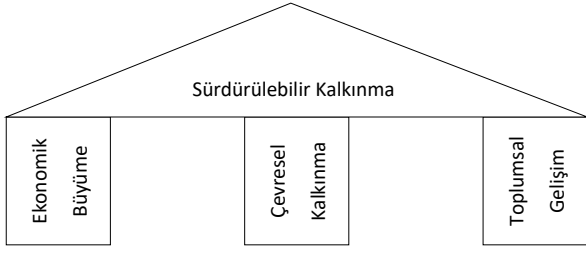
Dünya ekolojik düzeninin bozulması, nesli tükenen hayvanların artması, buzulların erime ve mevsimlerin zamanlarının değişmesi gibi birçok sinyal insanlığı dünya sürdürülebilirliği açısından sorgulatılmaktadır. Tüm yaşanan bu değişimler hem yenilenebilen hem de kıt kaynakların bitmesi, gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerin ekonomilerini sırtlayan endüstriyel üretim organizasyonların siyasi kurumların ve vakıf gibi kar amacı gütmeyen kuruluşların ve öncü paydaşların sürdürülebilirliğe odaklanmasını zorlaştırmıştır [25]. Kamu araştırmacıları, siyasetçiler, profesörler ve çeşitli önde gelenler biyolojik çeşitlilik, su, hava ve enerji benzeri doğal kaynakların, ekonomi sebepli değerlerin yok olma riski ile yüz yüze geldiği bir gerçektir [10]. Tam bu noktada sürdürülebilirliğin çok hızlı ve dönüşü olmayan bir yola girilmeden sağlanması önem kazanmaktadır. Doğa bilimleri ve sosyal bilimler gibi birçok disiplinde sıkça konuşulup üzerinde düşünülen sürdürülebilirlik kavramı, pek çok farklı disiplini içermesi sebebiyle kapsamlı ve tek bir tanım üzerinde görüş birliğine varıldığını söylemek güçtür. Aşağıda literatürde yapılan bazı tanımlardan bahsedilmiştir. Sürdürülebilirlik kavramı ilk kez 1983 yılında Birleşmiş Milletler tarafından yayınlanan "Ortak Geleceğimiz" başlıklı rapor sonrasında şekillenmeye başlamıştır. O tarihten günümüze sürdürülebilirlik kavramı ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma ve yeni tanımlamalar yapılmıştır. Sürdürülebilirlik geniş, çok yönlü ve çok tartışılan bir kavramdır [10]. Sürdürülebilirliği tanımlamak gerekirse, daimi olma yeteneğidir [26]. Doğa bilimleri ve sosyal bilimler gibi pek çok farklı disiplin içerisinde defalarca konuşulan, tartışılan sürdürülebilirlik kavramının, çok farklı içeriği ve çok boyutsal olması sebebiyle herkes tarafından kabul görmüş bir tanımı henüz yoktur. Genel olarak tanımlamak gerekirse sürdürülebilirlik, çevresel ve sosyal koşulların insanın güvenliği, iyi oluşu ve sağlığını süresiz biçimde maksimize edecek şekilde yaşam biçimini dönüştürmektir [27]. Üretim ve değişik türlerin devamlılığı bozulmadan bizlerin varlığının daimi olmasını sağlamaktır. Sürdürülebilirlik aynı zamanda sürdürülebilir gelişmenin eş anlamı olarak da kullanılmaktadır [28]. Başka bir şekilde anlatmak gerekirse, yaşamak için duyduğumuz gereksinimleri gelecek kuşakların gereksinimlerinden harcamadan karşılayabilmektir. Gelecek nesillerin yaşam için duyduğu ihtiyaçları şimdiden harcamak dünyanın

sonunu getirmek olabilir. Doğal kaynakların yönetiminin ve sosyal, ekonomik kaynakların tüketimin böyle olması halinde yok olma riski ile karşı karşıya kalacağını ve dünyada insan yaşamının sonunun geleceği noktaya çok yakınız. Sürdürülebilirlik önemsenmez ise canlıların yok olması kaçınılmaz olacaktır. Ülkeler ve toplumlar kıtlıklar ve varlıklara erişim eşitsizliği nedeniyle yok olma tehlikesiyle karşı karşıyadırlar [29]. Sürdürülebilirlik insanlığın ihtiyaçlarının kişisel tatmin seviyesinde kalıcı memnuniyetini sağlamasını sağlarken kısıtlı arza sahip dünya ekosisteminin şimdiki ve gelecek kuşakların ihtiyaçlarını da karşılayarak yaşam kalitesini arttırdığı faaliyetlerin bütünüdür [30]. Brundtland raporunda ise sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılayabilmesi kapasitesinden kullanmadan günümüz ihtiyaçlarının karşılanmasını sağlayacak gelişme olarak anlatılmıştır [31]. Sabancı Üniversitesi'nden Prof. Dr. Selim Çetiner'in Aralık 2011 tarihinde yayınlanan makalesinde Sürdürülebilir Kalkınma kavramını üç temele dayandırıyor:

1. Ekonomik Büyüme
2. Çevresel Kalkınma
3. Toplumsal Gelişim

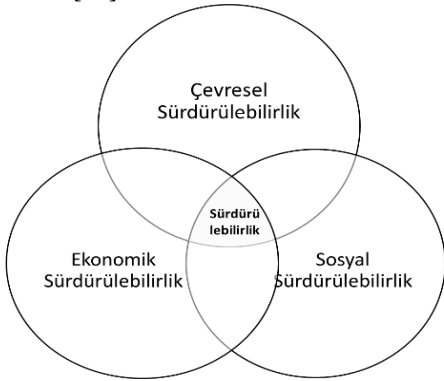
Üç kavram birbiri ile çelişmese dahi rekabet içinde oldukları açık olarak görünüyor(Şekil 3). Bunların hepsini belli bir denge içerisinde yürütüp üstüne bir de kalkınmayı sağlayabilmek oldukça çetin bir görev, ancak imkânsız değil. Son yıllarda çevresel-yeşil bilinç artmış olduğu açıkça görülmektedir. Bankalar ve Holdingler dahi reklamlarında ne kadar yeşil oldukları üzerinde duruyorlardır. Bu gelişmeler oldukça sevindiricidir.

Dünya bu zorlu görev için Binyıl Kalkınma Hedefleri belirlemiş, konferanslar düzenlemeye devam etmektedir. Bu konferansların sonuncusu ise 27 Eylül 2015 tarihinde, New York'da, 17 hedef ve 169 alt hedef olarak "Gündem 2030: BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH)" kabul edilmiştir. 2030 yılı Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile yeni bir küresel kalkınma çerçevesi çizerek sürdürülebilir şehirler, iklim değişikliği, kuraklıkla mücadele, biyoçeşitliliğin korunması gibi çevre konuları sürdürülebilir kalkınma gündemine alınmıştır.



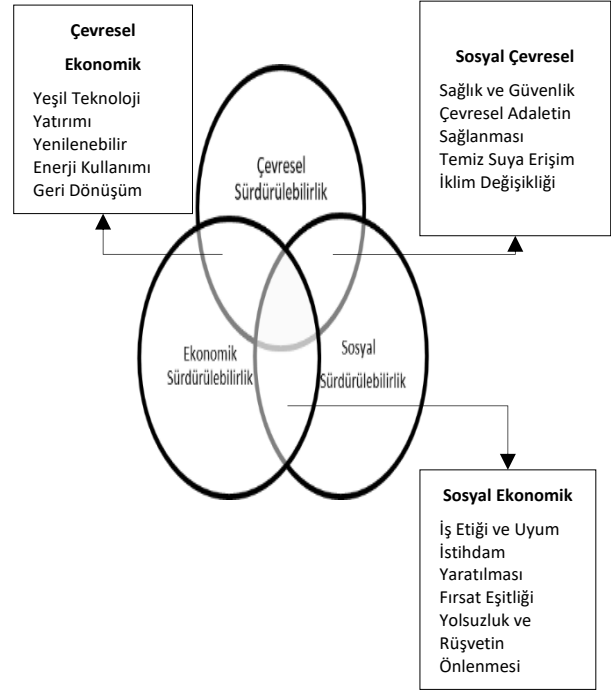
Şekil 3: Sürdürülebilir kalkınma.

Sürdürülebilirlik konusu genellikle sadece çevre ile alakalı olarak bilinmektedir. Ancak sürdürülebilirlik sadece çevre ile ilgili konuları içermez. Ekonomik, sosyal (toplumsal) ve çevre konularının tümüyle ilgilenen bütünsel bir yaklaşımdır [32].



Şekil 4: Sürdürülebilirliğin üçlü kâr hanesi.

Sürdürülebilirlik kavramı içerisinde çevre bilincini barındırır ve bununla kalmamaktadır. Geniş açıdan bakıldığında üç boyutlu bir model ortaya çıkmaktadır (Şekil 4). Bu model çevrenin doğallığına özen gösterme, sosyal sorumlulukları ve ekonomik sağlamlığın önemi olarak ön plana çıkmaktadır [33]. Sürdürülebilirlik ile ilgili olarak literatürde genel çoğunluk üçlü bir yaklaşım üzerinden gitmektedir. Bunlar sürdürülebilirliğin temel üç bileşeni olarak isimlendirilmiştir. Bu yaklaşıma göre çevresel faaliyetlerin (karbon salınımı yüksek doğal kaynakların kullanımı, enerji kullanımının durumu, insan kullanımı sonucunda oluşan doğal olmayan atıkların durumu), ekonomik faaliyetlerin (çevreye duyarlı yatırımların yapılmasının yönetim tarafından kabul görmesi, tedarikçi gelirlerinin sürdürülebilirliğin üç temelinde değer vererek devam etmesi) ve sosyal faaliyetlerin (tedarikçi personelinin çeşitliliğini, çalışanlar arası fırsat eşitliğini artırma, tedarikçinin bulunduğu konuma değer katan işler yapma) birlikte önem verilmesi tedarikçi performansının sürdürülebilir artması için çok önemlidir (Şekil 5).

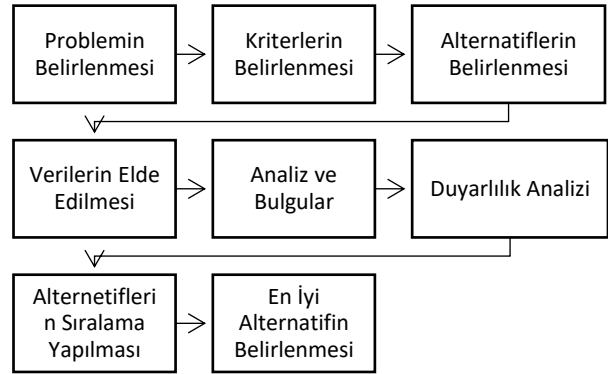


Şekil 5: Sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları.

#### 4. BULANIK ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ

ÇKKV teknikleri karar biliminin bir dalını temsil eder ve çeşitli yaklaşımları içerir. Tablo 2’de uygulama sürecinin akışı gösterilmiştir.

Tablo 2: Uygulama sürecinin akış diyagramı.



##### 4.1 Bulanık AHP Yöntemi

AHP yöntemi ikili karşılaştırma süreci aşamasında, belirsizlik ve karar verememe durumlarında yeterli olamaması tarafından bilim adamları tarafından yoğun eleştirilere maruz kalmaktadır [34]. Ortaya çıkan bu tutarsızlıklar, belirsizlikler ve karar verme sürecini etkileyerek çözüme gitmeyi zorlaştıran

durumları ortadan kaldırmak amacıyla Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) geliştirilmiştir. Bulanık AHP yöntemi ilk olarak Van Laarhoven ve Pedrycz (1983) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Üçgen bulanık sayılar kullanılarak bu araştırma yayınlanmıştır (Tablo 3). BAHP yöntemi bulanık problemlerin rahat çözülebilmesi amacıyla geliştirilmiştir [35].

**Tablo 3:** Bulanık AHP'nin gelişimi



vericilerin karar vermesini belirsizliklerle baş edebilme yeteneği sağlayarak kolaylaştıran bir yöntemdir [36]. Bu teknikte karar vericiler genellikle içeriğinde net ve kesinleşmiş yargılar olan yorumlarında sayısal ifadeler kullanmak yerine farklı olarak problemi gerçek ortama daha uygun şekilde aktarmayı sağlayacak ara değerleri de oluşturarak çözümü daha güvenli bulduklarını söylemişlerdir [37]. BAHP 'de bulunan ana ve alt kriterlerden oluşan kıyaslamalar karar vericinin değerlendirmesine göre farklı dönüşümler geçiren bulanık sayılardır [38]. BAHP karar vericilerden kaynaklanan belirsizliklerin önüne geçebilmek adına ve oluşan tutarsızlıkların ortadan kaldırılması amacıyla belirli aralıklara sahip dilsel değerleri kullanan bir yöntemdir [39].

BAHP'nin klasik AHP'ye göre avantajları şu şekildedir [40].

1. BAHP, asıl değerlere göre insanların görüş ve değerlendirmelerini daha iyi yansıtabilmektedir.
2. BAHP, karar vericilerin ana amaca ulaşmasında değerlendirme yaparken karar vericiye rahatlık sağlamaktadır.

BAHP'nin en büyük avantajı çok sayıda kriterli problemleri çözerken ortaya çıkmaktadır. Deterministik alternatifleri oluşturmak yerine, algı tabanlı yargısal aralıklar kullanılabilir. Ayrıca AHP'de bulunan alternatifler zorunlu olarak karar vericinin düşsel gücüne dayanarak ortaya çıkan sayısal ifadelerdir [41]. Bu ve bunun gibi araştırmalardan çıkartılan sonuçlar şu şekilde ifade edilebilir. ÇKKV problemlerinde en doğru sonuca giderken daha rahat ve kolay ilerlemek adına BAHP yöntemi doğru seçim olacaktır. Literatür araştırması yapıldığında en çok araştırma yapılan ve çalışma sayısına ulaşılan yöntem BAHP'dir.

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

BAHP yöntemi, ÇKKV ile çözülen problemlerin daha etkin şekilde çözüme kavuşturulması ve karar

Yukarıda ifadesi bulunan  $M_{g_i}^1$  ( $j=1,2,\dots,m$ )'ler üçgensel bulanık sayıları temsil etmektedir. Ardından çözülecek problem ile ilgili hiyerarşik yapı oluşturulur. Tüm hiyerarşi içerisinde bulunan elemanların ikili karşılaştırma matrisleri yapılır. Bu işlemin ardından elde edilen matrisler Chang' in merite analizi adımlarına geçilir ve bunlar aşağıdaki gibi ifade edilir. Bu çalışmada Chang tarafından bulunan genişletilmiş Bulanık AHP yöntemi kullanılmaktadır.

**Adım 1:** Klasik AHP 'de bulunan normalizasyon işlemine de benzeyen bir adım gibidir.

$$s_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes [\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} \quad (2)$$

Bu formülasyonda yer alan ifadelerin nasıl hesaplanacağı aşağıda belirtilen denklemlerde ifade edilmektedir.

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{j=1}^m l_i, \sum_{j=1}^m m_i, \sum_{j=1}^m u_i) \quad (3)$$

Yukarıda elde edilen karşılaştırma matrisinde bulunan tüm l değerlerini, tüm m değerlerini ve tüm u değerleri toplayarak yazılır ve ters alma uygulanır.

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^m u_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m l_i} \right) \quad (4)$$

**Adım 2:**  $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 'nın olabilirlik derecesi şu şekilde tanımlanacaktır.

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & m_2 \geq m_1 \\ 0, & l_2 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (5)$$

Buradaki her iki durumda kesişim noktası bulunmaktadır.  $M_1$  ve  $M_2$ 'yi karşılaştırabilmek amacıyla  $V(M_2 \geq M_1)$  ve  $V(M_1 \geq M_2)$  değerlerinin ikisini de bulmak gereklidir.

**Adım 3:** Bu adımda ağırlık vektörü bulunur.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (6)$$

**Adım 4:** Bu adımda W bulanık olmayan bir sayı olmak üzere ağırlık vektörü normalize edilir.

$$W = \left[ \frac{d'(A_1)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)}, \frac{d'(A_2)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)}, \dots, \frac{d'(A_n)}{\sum_{i=1}^n d'(A_i)} \right]^T \quad (7)$$

**Adım 5:** Son adımda, normalleştirilmiş öncelik ağırlık vektörü, toplam ağırlığı belirlemek için ilgili önem ağırlık vektörü ile çarpılır.

İşlemlerin açıklığı ve hesaplama kolaylıkları gibi sebeplerden ötürü genişletilmiş chang yöntemi literatürden pek çok araştırmacı tarafından uygulamalarında tercih edilmiştir. Ancak teknikle ilgili bulanık karşılaştırma matrisinde bulunan ağırlıkların türetilirken yeterli olmadığı konusunda bazı eleştiriler yapılmaktadır [42].

#### 4.2 Bulanık VIKOR Yöntemi

**Adım 1:** Problemin ilk adımında n sayıda karar verici, m adet alternatif ve k adet kriter belirlenir.

**Adım 2:** Alternatifleri derecelendirmek için dilsel değişkenlikler kullanılır.

**Adım 3:**  $w_j^n$  n tane karar vericiden oluşan bir kümede n'inci karar vericinin değerlendirdiği karar kriterinin önem ağırlığını; j kriterine göre i alternatifinin derecesini gösterebilir. Karar kriterlerinin önem ağırlıkları ve alternatiflerin kriter değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla her biri için tek bir değerlendirme olacak şekilde birleştirilir ve bütünleştirilmiş değerler elde edilir [43].

$$w_j = \frac{1}{n} [\tilde{w}_j^1(+) \tilde{w}_j^2(+) \dots (+) \tilde{w}_j^n] \quad (8)$$

$$x_{ij} = \frac{1}{n} [\tilde{x}_{ij}^1(+) \tilde{x}_{ij}^2(+) \dots (+) \tilde{x}_{ij}^n] \quad (9)$$

Denklemlerde  $x_{ij}$  ve  $w_j$  değerleri, sözel değişkenlerin karşılığı olan üçgensel bulanık sayı değerlerini göstermektedir.

**Adım 4:** Alternatif ve kriterler için tek bir değer elde edilir.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k \quad (10)$$

$$\tilde{W}_j = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_j] \quad (11)$$

$\tilde{x}_{ij}$ , j. kriterine göre i. alternatifin derecesi ve j. kriterin önem ağırlığıdır.

**Adım 5:** Tüm kriter fonksiyonlarının en iyi  $\tilde{f}_j^*$  ve en kötü  $\tilde{f}_j^-$  değerleri bulunur.

$$\tilde{f}_j^* = \max_j x_{ij}, j \in J \text{ fayda ölçüleri}; \tilde{f}_j^- = \min_j x_{ij}, j \in J \text{ maliyet ölçüleri} \quad (12)$$

$$\tilde{f}_j^- = \min_j x_{ij}, j \in J \text{ fayda ölçüleri}; \tilde{f}_j^* = \max_j x_{ij}, j \in J \text{ maliyet ölçüleri} \quad (13)$$

**Adım 6:**  $\tilde{w}_j$  kriterlerin ağırlığıdır. i. alternatifin en iyi bulanık değere uzaklığının toplamını veren  $\tilde{S}_i$  değeri elde edilir.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n [\tilde{w}_j(\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_{ij}) / (\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_{ji})] \quad (14)$$

$$\tilde{R}_i = \max_j [\tilde{w}_j(\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_{ij}) / (\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_{ji})] \quad (15)$$

$\tilde{R}_i$  değerleri ise j.kritere göre i.alternatifin bulanık en kötü değerlere olan maksimum uzaklığıdır.  $\tilde{f}_{ij}$ , j kriteri açısından  $A_i$  için performans skorunu gösterir.

**Adım 7:**  $\tilde{S}^*$  maksimum çoğunluk kuralını ve  $\tilde{R}^*$  ise farklı görüşlerin minimum bireysel pişmanlığını ifade etmek üzere  $\tilde{S}_i^-$ ,  $\tilde{S}_i^*$  ve  $\tilde{R}_i^-$ ,  $\tilde{R}_i^*$  değerleri hesaplanır.

$$\tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i \quad \tilde{S}_i^- = \max_i \tilde{S}_i \quad (16)$$

$$\tilde{R}_i^* = \min_i \tilde{R}_i \quad \tilde{R}_i^- = \max_i \tilde{R}_i \quad (17)$$

**Adım 8:** Bu hesaplamalardan sonra  $\tilde{Q}_i$  indeksi, grup faydası ile bireysel pişmanlığı birlikte değerlendirilmesi ile hesaplanır.

$$\tilde{Q}_i = v(\tilde{S}_i - \tilde{S}^*) / (\tilde{S}^- - \tilde{S}^*) + (1-v)(\tilde{R}_i - \tilde{R}^*) \quad (18)$$

v grup faydasının en yüksek değerini gösterir. 1-v ise bireysel pişmanlığı gösterir. Uzlaşmacı çoğunluk için genellikle  $v \approx 0,5$  alınır.

**Adım 9:** Durulaştırma işlemi yapılır.

$$BNP_i = \frac{(n_3 - n_1) + (n_2 - n_1)}{3} + n_1 \quad (19)$$

$n_3$ , üçgen bulanık sayının üst değerini;  $n_2$ , orta değerini ve  $n_1$ , ise alt değerini göstermektedir. Daha sonra elde edilen  $Q_i$  indeks değerine göre alternatif sıralanır. Bu indeksin en küçük değeri en iyi alternatifi gösterir.

**Adım 10:** Koşulların sağlanması kontrol edilir.

**1.Koşul:** Kabul edilebilir avantaj: Bu koşul en iyi ve en yakın seçenek arasında çok fark olmalıdır.

$$Q(A'') - Q(A') \geq DQ \quad DQ = \frac{1}{m-1} \quad (20)$$

m alternatif sayısını ifade eder.

$$(m \leq 4 \text{ ise } DQ = 0,25) \quad (21)$$

$A'$  en iyi  $A''$  2. En iyi alternatiftir.

**2. Koşul:** Kabul edilebilir istikrar: Alternatif  $A'$ , S ve/veya R değerlerine göre yapılan sıralamada en iyi alternatif olacaktır.

Eğer 1. Koşul sağlanmaz ise  $Q(A^m) - Q(A') \leq DQ$  olursa,  $a^{(m)}$  ve  $a'$  aynı uzlaştırıcı çözüm olur. Eğer

2. Koşul kabul edilmezse, her ne kadar  $A'$  nın nispi bir avantajı olsa da karar vermede tutarsızlık vardır.

Bundan dolayı  $A'$  ve  $A''$  uzlaştırıcı çözümleri aynıdır. Q değeri minimum olan en iyi alternatifin seçimi yapılır.

#### 4.3 Bulanık EDAS Yöntemi

İnsanoğlu nasıl her anını karar vermekle geçiriyorsa firmalar da istedikleri hedeflere ulaşabilmek adına karar vermek zorundadır. Bu karar verme süreci günümüzdeki rekabetçi ortamda daha da önem kazanmıştır. Bulanık EDAS ÇKKV tekniklerinden birisidir. EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı (Değerlendirme) yöntemidir. 2015 yılında Keshavarz Ghorabae ve diğerleri tarafından geliştirilmiştir.

**Tanım 1:**  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$  yamur bulanık sayıları içeren bir kümedir.  $\tilde{A}$  kümesinde bulanık olmayan değerler aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$K(\tilde{A}) = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \frac{a_3 a_4 - a_1 a_2}{a_3 + a_4 - a_1 - a_2}) \quad (22)$$

**Tanım 2:**  $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$  bulanık sayıları içeren küme olarak varsayıldığında,  $\psi$  fonksiyonu 0 ile  $\tilde{A}$  arasındaki maximum değeri verir. Burada dikkat edilmesi gereken, değerlendirme sırasında  $K(\tilde{A})$  işleminin uygulanıyor olmasıdır.

$$\Psi(\tilde{A}) = \begin{cases} K(\tilde{A}), & K(\tilde{A}) > 0 \\ 0, & K(\tilde{A}) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

Bulanık karar matrisinin aşağıdaki gibi olduğunu varsayalım.

$$\tilde{x} = [\tilde{x}_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{n1} & \dots & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Yukarıda bulunan varsayım eşliğinde, alternatifleri  $i$  ve kriterlerin  $j$  olarak gösterilmiştir. Karar matrisinin her bir üyesi,  $\tilde{x}_{ij} = (\tilde{x}_{ij1}, \tilde{x}_{ij2}, \tilde{x}_{ij3})$  olacak şekilde üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilecektir.

Her kriter için ağırlıklar ise  $\tilde{w} = w_1, w_2, w_3$  şeklinde ifade edilir. Matriste bulunan  $n$  alternatifleri ifade eder ve  $m$  ise kriterleri ifade etmektedir.

**Adım 1:** Tüm kriterler için ortalama bulanık karar matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$\tilde{A}V_j = (x + a)^n = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_{ij}}{n} \quad (25)$$

**Adım 2:** En uygun çözüm, negatif çözüme maksimum uzaklıkta olmalıdır, aynı zamanda en iyi/ideal çözüme ise minimum mesafede bulunmalıdır. Bu sayede pozitif bulanık mesafe ve negatif bulanık mesafe, ortalama belirlenmektedir.

$$PDA = [p\tilde{d}a_{ij}]_{n \times m} \quad (26)$$

$$NDA = [n\tilde{d}a_{ij}]_{n \times m} \quad (27)$$

$$p\tilde{d}a_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} - \tilde{a}v_j)}{k(\tilde{a}v_j)} & , \quad j \in B \\ \frac{\psi(\tilde{a}v_j - \tilde{x}_{ij})}{k(\tilde{a}v_j)} & , \quad j \in C \end{cases} \quad (28)$$

$$n\tilde{d}a_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\tilde{a}v_j - \tilde{x}_{ij})}{k(\tilde{a}v_j)} & , \quad j \in B \\ \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} - \tilde{a}v_j)}{k(\tilde{a}v_j)} & , \quad j \in C \end{cases} \quad (29)$$

**Adım 3:** Bulanık ağırlıklı toplam, pozitif mesafe için ve negatif mesafe için, ortalama matrisi kullanılarak hesaplanır.

$$\tilde{s}p_i = \otimes_{j=1}^m (\tilde{w}_j \otimes p\tilde{d}a_{ij}) \quad (30)$$

$$\tilde{s}n_i = \otimes_{j=1}^m (\tilde{w}_j \otimes n\tilde{d}a_{ij}) \quad (31)$$

**Adım 4:**  $\tilde{s}p_i$  ve  $\tilde{s}n_i$  'nin bulanık değerleri normalleştirilir.

$$n\tilde{s}p_i = \frac{\tilde{s}p_i}{\max_i(k(\tilde{s}p_i))} \quad (32)$$

$$n\tilde{s}n_i = 1 - \frac{\tilde{s}n_i}{\max_i(k(\tilde{s}n_i))} \quad (33)$$

**Adım 5:** Bütün alternatifler için bulanık değerlendirme puanları hesaplanır. Bu bulanık değerlendirme puanları arasından en yüksek değere sahip ve bulanık olmayan alternatif, en iyi seçenek olarak belirlenmektedir.

$$\tilde{a}s_i = \frac{n\tilde{s}p_i \otimes n\tilde{s}n_i}{2} \quad (34)$$

**Adım 6:** Alternatifler, azalan sırayla düzenlenmiş olan düşük puanlı, bulanık olmayan değerlendirme puanlarına göre sıralanır. Başka bir deyişle, en

yüksek değerlendirme puanına sahip olan alternatif, aday alternatifler içinde en iyi seçenek olarak belirlenmektedir.

## 5. BULANIK ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİKÇİ SEÇİMİ

Çalışılacak tedarikçinin belirlenmesi konusunda şirket içerisinde alanında uzman satın almacı kadro görevlendirilmektedir. Tedarikçi belirlenmesinde tedarikçileri değerlendirecek olan grup satın alma uzmanlarından oluşan 1 satın alma direktörü, 1 satın alma müdürü, 1 Tedarikçi Geliştirme Birim Yöneticisi ve 1 satın alma Uzman Mühendisi olmak üzere toplamda 4 uzmandan oluşmaktadır. 5 tedarikçi adayı mevcuttur. Ana kriter ve alt kriterler Tablo 4'de gösterilmiştir. Tablo 5'de anket sonuçları birleştirilerek gösterilmiştir.

**Tablo 4:** Ana ve alt kriterler.

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Not asy on	Açıklama
<b>ÇEVRE YÖNETİMİ B1</b>	Yeşil Tasarım Uygulamalarının Yapılması	<b>K11</b>	Yeşil üretim uygulamalarının tasarım aşamalarına dahil edilerek nihai ürünün çevre dostu olması beklenir.
	Yenilebilir Olmayan Enerji Kaynaklarının Tüketimi	<b>K12</b>	Kaynak tüketiminin optimal düşüklükte olması beklenir.
	Kirli Atık Yönetim Sisteminin Yapılması	<b>K13</b>	Tedarikçinin üretim süreçlerinden ortaya çıkan atık ve ilgili kirlilikleri minimum seviyede tutmaya çalışması beklenir.
	Çevresel Şirket İçi Eğitim ve Bilinçlendirme Faaliyetlerinin Devamlılığı	<b>K14</b>	Tedarikçinin şirket çevre politikalarını çalışanlarına planlı eğitimler düzenleyerek aktarması beklenir.
<b>SOSYAL YÖNETİM B2</b>	Çocuk İşçi Çalıştırmama	<b>K21</b>	Tedarikçinin yasalara uygundur olarak belirlediği ve çalışma izni olan kişilerin çalıştırılması beklenir.
	Kariyer Destek Programları	<b>K22</b>	Tedarikçinin çalışanı geliştirme ve şirkette tutabilme ayrıca çalışma hayatı boyunca sürdürülebilir gelişimi sağlaması beklenir.
	Özel Sağlık Sigortası Desteği	<b>K23</b>	Çalışanlara özel sağlık sigortası yapılması beklenir.
	Çalışma Koşullarının Sürekli İyileştirilmesi	<b>K24</b>	Tedarikçinin üretim ortamının sürdürülebilir etkinliğe ulaşabilmesi için gereksinimlere göre sürekli iyileştirilmesi beklenir.
	Sosyal Faaliyetler ve Yan Hakların İyileştirilmesi	<b>K25</b>	Günümüz şartlarına uygun iyileştirmelerin yapılması beklenir.
<b>KALİTE GÜVENCE YÖNETİMİ B3</b>	Otomotiv Kalite Yönetiminin Varlığı	<b>K31</b>	Kalite Yönetim Sistemi ile ilgili sertifikalarının (ISO 9001, IATF 16949/AS 9100) akredite edilmiş bir kuruluş tarafından verilmiş olması ve ISO beklentilerinin tedarikçide uygulanıyor olması beklenir.
	İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Varlığı	<b>K32</b>	Tedarikçinin çalışan sağlığını ve güvenliğini iş sağlığı güvenliği yönetim sistemine uygun yapıyor ve güncel belgeye(OHSAS 18001/ISO 45001) sahip olması beklenir.
	Çevre Yönetim Sisteminin Varlığı	<b>K33</b>	Çevre koruma politikalarını ISO14001 gereklilikleri doğrultusunda yapıyor olması ve güncel belge sahipliği beklenir.
	Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Varlığı	<b>K34</b>	Bilgi güvenliği politikalarını ISO 27001 gereklilikleri doğrultusunda yapıyor olması ve güncel belge sahipliği beklenir.
<b>EKONOMİ YÖNETİMİ B4</b>	Fiyat/Kalite Oranı	<b>K41</b>	Bir ana sanayinin tedarik ettiği malzemelerden alacağı performansın kalitesinin yüksek olması beklenirken, fiyatının piyasa şartlarına uygun olması beklenir.
	Ar-Ge,İnovasyon Kapasitesi ve Maliyet Azaltıcı Aktiviteler	<b>K42</b>	Küresel ister ve teknolojik gelişmelerin takip edilerek ürün yelpazesinin ve mevcutta üretilen parçaların geliştirilmesi için Ar-Ge çalışmaları yapılması beklenir.
	Sürdürülebilir Finansal Faaliyetler	<b>K43</b>	Tedarikçinin finansal yönetimini dengeli ve sürdürülebilir olması beklenir.
<b>ÜRETİM YÖNETİMİ B5</b>	Alan Kullanımı	<b>K51</b>	Tedarikçinin üretim sahasını kapasite analizleri sonucunda optimal verimli kullanması beklenir.
	Esneklik	<b>K52</b>	Planlı üretim ve sipariş dışında yaşanan aksaklıklarda açılan öngörülemeden siparişlere tedarikçinin ana sanayinin isterleri doğrultusunda uyum sağlaması beklenir.
	Sevkiyat Performansı	<b>K53</b>	Siparişi verilen parçaların istenilen tarihte istenilen kalitede istenilen miktarda gelmesi beklenir.



**Tablo 5:** Karar vericilerin birleştirilmiş anket sonuçları.

Kategori Adı	Sol kriter daha önemli ise								Sağ kriter daha önemli ise									Toplam uzman sayısı	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Çevre Yönetimi							2	2										Sosyal Yönetimi	4
Çevre Yönetimi						1	2	1										Kalite Güvence Yönetimi	4
Çevre Yönetimi					1	1	1		1									Ekonomi Yönetimi	4
Çevre Yönetimi				1	1			1	1									Üretim Yönetimi	4
Sosyal Yönetim									2	2								Kalite Güvence Yönetimi	4
Sosyal Yönetim							2			1	1							Ekonomi Yönetimi	4
Sosyal Yönetim						1	1			2								Üretim Yönetimi	4
Kalite Güvence Yönetimi									2		1	1						Ekonomi Yönetimi	4
Kalite Güvence Yönetimi							1	1			2							Üretim Yönetimi	4
Ekonomi Yönetimi								3	1									Üretim Yönetimi	4

Kriter sayısının çokluğu sebebi ile çevre ana kriterinin hesaplanması gösterilip diğer kriterlerin sonuç tablosu gösterilecektir. Bulanık AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları bulunur(Tablo 6).

**Adım 1:** İkili karşılaştırma matrisi oluşturulur.

**Tablo 6:** İkili karşılaştırma matrisi.

	K11			K12			K13			K14		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
K11	1,000	1,000	1,000	0,760	1,189	1,732	1,000	1,414	1,732	0,841	1,414	2,060
K12	0,577	0,841	1,316	1,000	1,000	1,000	1,000	1,414	1,732	1,189	1,565	1,861
K13	0,577	0,707	1,000	0,577	0,707	1,000	1,000	1,000	1,000	0,760	1,189	1,732
K14	0,485	0,707	1,189	0,537	0,639	0,841	0,577	0,841	1,316	1,000	1,000	1,000

**Adım 2:** Si değerlerini hesaplamak için her bir satırın bulanık toplamı ile sütun bazında toplamın tersi çarpılır ve normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmaktadır(Tablo 7).

**Tablo 7:** Si değerlerinin hesaplanması.

$\sum l_j$	$\sum m_j$	$\sum u_j$	$S_i$	$S_i$	$S_i$
3,6007	5,0176	6,5239	0,1674	0,3018	0,5064
3,7666	4,8202	5,9093	0,1751	0,2899	0,4587
2,9145	3,6034	4,7321	0,1355	0,2167	0,3673
2,6001	3,1869	4,3462	0,1209	0,1917	0,3374
$\sum l_i$	$\sum m_i$	$\sum u_i$	$1/\sum l_i$	$1/\sum m_i$	$1/\sum u_i$
12,8820	16,6282	21,5114	0,0776	0,0601	0,0465

**Adım 3:** Normalize işlemi tamamlandıktan sonra olası dereceler yani max ve min  $V(s_i \geq s_k)$  değerleri hesaplanarak  $W'$  bulunur ve normalize edilerek  $W$  bulunur(Tablo 8).

**Tablo 8:**  $W'$  'nin bulunması.

$V(S_i \geq S_k)$	$V(S_i \geq S_k)$	$V(S_i \geq S_k)$	$W'$	$W$
1,000	1,000	0,630	0,630	0,308
0,656	1,000	0,218	0,218	0,107
0,582	0,841	0,195	0,195	0,096
1,000	1,000	1,000	1,000	0,490

**Tablo 9:**  $W$  bulunması.

$V(S_i \geq S_k)$	$V(S_i \geq S_k)$	$V(S_i \geq S_k)$	$W'$	$W$
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,3059</b>
0,9608	1,0000	1,0000	0,9608	<b>0,2939</b>
0,7016	0,7243	1,0000	0,7016	<b>0,2146</b>
0,6069	0,6230	0,8896	0,6069	<b>0,1856</b>

Sonuç olarak tüm ana kriter ve alt kriterlerin ağırlıkları bulunur ardından ikisinin çarpımı sonucu her alt kriterin nihai ağırlıkları ortaya çıkmaktadır. Özet Tablo 10’da gösterilmiştir. Bulunan kriter ağırlıkları Bulanık VIKOR ve Bulanık EDAS yöntemlerinde en iyi alternatifi bulmak için kullanılmaktadır.

**Tablo 10:** Kriterlerin nihai ağırlıkları.

Kriterlerin Nihai Ağırlıkları				
Ana Boyutlar	Ağırlıklar	Alt Kriterler	Ağırlıklar	Son Ağırlıklar
	1		1	
ÇEVRE YÖNETİMİ B1	0,578	K11	0,310	0,139
		K12	0,110	0,048
		K13	0,100	0,043
		K14	0,490	0,221
		K21	0,000	0
SOSYAL YÖNETİM B2	0,176	K22	0,600	0
		K23	0,000	0
		K24	0,400	0
		K25	0,000	0
		K31	0,810	0
KALİTE GÜVENCE YÖNETİMİ B3	0,080	K32	0,000	0
		K33	0,060	0
		K34	0,140	0
		K41	0,520	0,103
EKONOMİ YÖNETİMİ B4	0,156	K42	0,130	0,026
		K43	0,340	0,068
		K51	0,420	0,148
ÜRETİM YÖNETİMİ B5	0,010	K52	0,320	0,113
		K53	0,260	0,091

Bulanık VIKOR ile en iyi alternatif Tablo 11’de bulunmuştur.

**Tablo 11:** Alternatif değerlendirmeleri için dilsel değişken.

Rakam	Dilsel Değişkenler	Kod	Bulanık Sayılar			
			l	m	n	u
9	Mükemmel İyi	EG	0,8	1	0	0
8	Çok İyi	VG	0,70	0,90	0,00	0,1
7	Orta İyi	MG	0,60	0,80	0,00	0,2
6	İyi	G	0,50	0,70	0,10	0,3
5	Düşük	AE	0,40	0,60	0,20	0,4
4	Kötü	B	0,30	0,50	0,20	0,5
3	Orta Kötü	MB	0,20	0,40	0,30	0,6
2	Çok Kötü	VB	0,10	0,30	0,40	0,7
1	Mükemmel Kötü	EB	0,0	0,2	0,5	0,8

Değerlendirme kriteri avantaj ise, pozitif ideal çözüm V matrisinin sütununun maksimum değeri,

negatif ideal çözüm ise V matrisinin sütununun minimum değeridir.

Pozitif ve negatif ideal çözümlerin elde edilmiş hali aşağıdaki gibidir(Tablo 12).

**Tablo 12:** Pozitif ve negatif ideal çözümler.

	Pozitif ve Negatif ideal çözümlerin elde edilmiş hali							
	Pozitif İdeal Çözüm				Negatif İdeal Çözüm			
K1	0,75	0,95	0,23	0,50	0,30	0,50	0,00	0,05
K2	0,75	0,95	0,20	0,48	0,33	0,53	0,00	0,05
K3	0,75	0,95	0,33	0,63	0,18	0,38	0,00	0,05
K4	0,50	0,70	0,20	0,43	0,38	0,58	0,10	0,30
K5	0,58	0,78	0,18	0,43	0,38	0,58	0,05	0,23
K6	0,55	0,75	0,20	0,45	0,35	0,55	0,08	0,25
K7	0,58	0,78	0,23	0,48	0,33	0,53	0,05	0,23
K8	0,60	0,80	0,20	0,43	0,38	0,58	0,03	0,20
K9	0,60	0,80	0,15	0,40	0,40	0,60	0,03	0,20
K10	0,65	0,85	0,23	0,45	0,35	0,55	0,03	0,15
K11	0,63	0,83	0,20	0,45	0,35	0,55	0,05	0,18
K12	0,65	0,85	0,30	0,58	0,23	0,43	0,05	0,15
K13	0,53	0,73	0,35	0,65	0,15	0,35	0,10	0,28
K14	0,55	0,75	0,18	0,45	0,35	0,55	0,08	0,25
K15	0,60	0,80	0,25	0,50	0,30	0,50	0,05	0,20
K16	0,60	0,80	0,23	0,53	0,28	0,48	0,00	0,20
K17	0,40	0,60	0,20	0,45	0,35	0,55	0,18	0,40
K18	0,55	0,75	0,48	0,78	0,03	0,23	0,05	0,25
K19	0,50	0,70	0,48	0,78	0,03	0,23	0,10	0,30

Kriter ağırlıklarını bulanık AHP ile bulunmuştur (Tablo 13).

**Tablo 13.**  $\phi$  ve  $\psi$  ve  $\pi$  hesaplama adımları.

	A1	A2	A3	A4	A5	MAX-MİN
K1	0,169	0,200	0,206	0,213	0,225	0,394
K2	0,156	0,194	0,200	0,200	0,213	0,369
K3	0,225	0,275	0,288	0,281	0,288	0,513
K4	0,056	0,056	0,063	0,063	0,063	0,119
K5	0,081	0,088	0,088	0,088	0,100	0,181
K6	0,081	0,088	0,088	0,100	0,100	0,181
K7	0,106	0,113	0,119	0,119	0,131	0,231
K8	0,100	0,106	0,106	0,113	0,113	0,213
K9	0,081	0,088	0,088	0,100	0,094	0,181
K10	0,125	0,144	0,144	0,150	0,150	0,275
K11	0,106	0,125	0,125	0,138	0,138	0,244
K12	0,169	0,194	0,200	0,213	0,213	0,381
K13	0,156	0,169	0,188	0,188	0,188	0,344
K14	0,075	0,075	0,088	0,100	0,081	0,175
K15	0,125	0,131	0,144	0,144	0,150	0,275
K16	0,138	0,138	0,144	0,156	0,163	0,300
K17	0,019	0,013	0,019	0,019	0,025	0,044
K18	0,238	0,238	0,238	0,238	0,263	0,500
K19	0,231	0,231	0,219	0,213	0,238	0,450

$\Phi$ ,  $\psi$  ve  $\pi$  değerleri (uzlaşım koşulların değerlendirildiği indeks değerleri) ve sıralama tablosunu Tablo 14 gibi elde ederiz.

**Tablo 14:**  $\phi$  ve  $\psi$  ve  $\pi$  değerleri.

	A1	A2	A3	A4	A5	MIN	MAX
$\phi$	2,2739	2,4530	2,5297	2,6256	2,7043	2,2739	2,7043
$\psi$	0,2252	0,2252	0,2252	0,2252	0,2489	0,2252	0,2489
$\pi$	0,0000	0,2081	0,2972	0,4086	1,0000		

Tüm bu işlemlerin sonucunda sıralama tablosu aşağıdaki gibi oluşur(Tablo 15).

**Tablo 15:** Sıralama tablosu.

	1	2	3	4	5
$\phi$	A1	A2	A3	A4	A5
$\psi$	A1	A2	A3	A4	A5
$\pi$	A1	A2	A3	A4	A5

En iyi alternatif A1' olarak bulunmuştur. Bulanık EDAS ile en iyi alternatif aşağıdaki gibi bulunur(Tablo 16).

**Tablo 16:** Dilsel değişkenler tablosu.

Rakam	Dilsel Değişkenler	Kod	Bulanık Sayılar			
			l	m	n	u
9	Mükemmel İyi	EG	0,8	1	0	0
8	Çok İyi	VG	0,700	0,900	0,000	0,100
7	Orta İyi	MG	0,600	0,800	0,000	0,200
6	İyi	G	0,500	0,700	0,100	0,300
5	Düşük	AE	0,400	0,600	0,200	0,400
4	Kötü	B	0,300	0,500	0,200	0,500
3	Orta Kötü	MB	0,200	0,400	0,300	0,600
2	Çok Kötü	VB	0,100	0,300	0,400	0,700
1	Mükemmel Kötü	EB	0,000	0,200	0,500	0,800

Karar vericilerin alternatifleri kriter bazında yaptığı değerlendirme anketlerinin sonucu aşağıdaki gibidir(Tablo 17).

**Tablo 17:** Alternatif değerlendirme tablosu.

	UZMAN 1						UZMAN 3						
	No	A1	A2	A3	A4	A5	No	A1	A2	A3	A4	A5	
UZMAN 1	K1	M				M	K1			M	M		
		G	G	G	AE	B		EG	VG	G	G	G	
	K2	M	M						M				
		G	G	AE	AE	B	K2	EG	G	G	AE	B	
	K3	M											
		G	AE	B	EB	EB	K3	EG	AE	B	AE	B	
	K4	G	G	AE	AE	AE							
		VG	G	G	G	B	K4	G	G	AE	AE	AE	
	K5	VG	G	AE	B	B							
	VG	G	VB	B	B	K5	G	G	G	G	G		
K6	VG	G	VB	B	B								
	VG	G	VB	B	B	K6	G	G	G	G	G		
K7	VG	G	VB	B	B								
	VG	G	AE	B	AE	K7	AE	AE	AE	AE	B		
K8	VG	G	AE	B	AE								
	VG	G	AE	B	AE	K8	G	G	G	G	AE		
K9	VG	G	AE	B	AE								
	VG	G	AE	B	AE	K9	G	G	G	G	G		
K10	EG	G	AE	AE	AE								
	EG	G	AE	AE	AE	K10	G	G	G	G	AE		
K11	EG	G	AE	B	AE								
	EG	G	AE	B	AE	K11	M	M	M	M			
K12	EG	G	AE	MB	AE								
	EG	G	AE	MB	AE	K12	G	G	G	G	B		
K13	VG	AE	VB	VB	EB								
	VG	AE	VB	VB	EB	K13	B	B	B	B	VB		
K14	VG	VG	B	B	EG								
	VG	VG	B	B	EG	K14	AE	G	G	B	B		
K15	M	M											
	M	M				K15	M	M					
K16	G	G	AE	AE	AE								
	G	G	AE	AE	AE	K16	VG	VG	B	MB	VB		
K17	M	M											
	M	M				K17	M	M	M				
K18	G	G	B	B	B								
	G	G	B	B	B	K18	G	G	G	G	B		
K19	B	AE	B	B	B								
	B	AE	B	B	B	K19	AE	AE	AE	AE	AE		
K20	G	G	G	G	G								
	G	G	G	G	G	K20	VG	AE	AE	AE	G		
K21	MB	B	AE	EB	EB								
	MB	B	AE	EB	EB	K21	B	B	G	EB	EB		
UZMAN 2	K1	EG	G	G	AE	B	UZMAN 4	K1	EG	G	AE	B	B
		EG	G	AE	AE	AE			EG	AE	B	B	B
	K3	EG	B	B	MB	B							
		EG	B	B	MB	B		K3	EG	B	B	B	B
	K4	G	G	B	B	B							
		G	G	B	B	B		K4	G	AE	AE	AE	AE
	K5	G	G	G	G	B							
		G	G	G	G	B		K5	G	G	AE	AE	AE
	K6	G	G	AE	B	B							
	G	G	AE	B	B	K6	AE	AE	AE	AE	AE		
K7	G	G	AE	AE	B								
	G	G	AE	AE	B	K7	G	G	G	G	AE		
K8	G	G	G	AE	B								
	G	G	G	AE	B	K8	G	G	AE	AE	AE		
K9	G	G	G	B	B								
	G	G	G	B	B	K9	G	G	G	G	G		
K10	VG	G	G	G	AE								
	VG	G	G	G	AE	K10	G	AE	AE	B	B		
K11	VG	G	G	AE	AE								
	VG	G	G	AE	AE	K11	AE	AE	AE	B	B		
K12	VG	G	AE	B	B								
	VG	G	AE	B	B	K12	AE	AE	B	VB	EB		
K13	VG	AE	B	B	B								
	VG	AE	B	B	B	K13	AE	AE	B	B	B		
K14	M	M	M										
	M	M	M			K14	G	AE	AE	B	B		
K15	G	G	G	G	G								
	G	G	G	G	G	K15	M						
K16	AE	AE	AE	AE	AE								
	AE	AE	AE	AE	AE	K16	VG	G	G	AE	B		
K17	M	M	M										
	M	M	M			K17	M	M	M		M		
K18	G	G	G	B	B								
	G	G	G	B	B	K18	G	G	AE	B	B		
K19	AE	AE	AE	AE	B								
	AE	AE	AE	AE	B	K19	G	AE	AE	AE	AE		
K20	VB	G	G	G	G								
	VB	G	G	G	G	K20	M				M		
K21	MB	MB	MB	EB	EB								
	MB	MB	MB	EB	EB	K21	G	AE	G	G	EG		
	MB	MB	MB	EB	EB	K22	AE	AE	AE	VB	VB		

Her bir kriter için tüm alternatiflerin aldığı performans değerlerinin ortalaması alınarak aşağıdaki çözüm matrisi elde edilir(Tablo 18).

**Tablo 18:** Ortalama bulanık değerler tablosu.

Alt Kriterler	Ortalama Bulanık Değerler			
K11	0,52	0,72	0,10	0,29
K12	0,47	0,67	0,13	0,33
K13	0,36	0,56	0,20	0,44
K14	0,41	0,61	0,17	0,39
K21	0,49	0,69	0,11	0,32
K22	0,45	0,65	0,14	0,36
K23	0,42	0,62	0,16	0,38
K24	0,47	0,67	0,13	0,33
K25	0,50	0,70	0,10	0,30
K31	0,51	0,71	0,10	0,29
K32	0,47	0,67	0,13	0,33
K33	0,42	0,62	0,18	0,38
K34	0,32	0,52	0,22	0,48
K41	0,48	0,68	0,11	0,32
K42	0,44	0,64	0,15	0,36
K43	0,46	0,66	0,11	0,35
K51	0,41	0,61	0,18	0,39
K52	0,40	0,60	0,18	0,40
K53	0,29	0,49	0,25	0,51

Alternatiflerin dilsel terimler kullanılarak değerlendirilmesinden sonra yamuksal bulanık sayılara dönüştürülmesiyle ortalama bulanık değerler bulunmaktadır. Daha sonra pozitif ve negatif uzaklık matrisleri bulmamız gerekmektedir. Bu adımda kriterlerin fayda veya maliyet olmasına dikkat edilmektedir. Problemimizde bulunan tüm kriterler fayda temelli olduğu için ilgili denklemlerin fayda kriteri kullanılmaktadır. Alternatiflerin ağırlıklı bulanık pozitif değerleri aşağıdaki gibi bulunmaktadır(Tablo 19).

**Tablo 19:** Ağırlıklı bulanık pozitif değerler.

A1	0,72	1,69	-1,47	-0,72
A2	0,33	1,02	-0,99	-0,33
A3	0,06	0,35	-0,34	-0,06
A4	0,03	0,18	-0,18	-0,03
A5	-0,06	0,17	-0,19	0,06

Alternatiflerin ağırlıklı bulanık toplam negatif değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır(Tablo 20).

**Tablo 20:** Ağırlıklı bulanık negatif değerler.

A1	-0,05	-0,01	0,02	0,06
A2	-0,15	0,00	0,12	3,66
A3	-0,10	0,00	0,08	0,17
A4	-0,16	0,18	0,40	0,71
A5	-0,10	0,09	0,15	0,34

Tüm alternatiflerin SPj ve SNj değerlerinin normalize edilmiş hali aşağıdaki gibidir(Tablo 21).

**Tablo 21:** SPj değerleri.

	Normalize ağırlıklandırılmış pozitif uzaklıklar (nspj)									
A1	0,72	1,69	-1,47	-0,72	0,06	11,62	27,16	-23,60	-11,62	
A2	0,33	1,02	-0,99	-0,33	0,01	5,33	16,35	-15,89	-5,33	
A3	0,06	0,35	-0,34	-0,06	0,00	0,93	5,61	-5,47	-0,93	
A4	0,03	0,18	-0,18	-0,03	0,00	0,46	2,92	-2,84	-0,46	
A5	-0,06	0,17	-0,19	0,06	0,01	-0,98	2,71	-3,06	0,98	
						Maks.	0,06			

**Tablo 22:** SNj değerleri.

	Normalize ağırlıklandırılmış negatif uzaklıklar (nsnj)									
A1	-0,05	0,01	0,02	0,06	0,01	0,95	0,98	1,01	1,04	
A2	-0,15	0,00	0,12	3,66	1,17	-2,12	0,90	1,00	1,13	
A3	-0,10	0,00	0,08	0,17	0,04	0,86	0,94	1,00	1,08	
A4	-0,16	0,18	0,40	0,71	0,28	0,40	0,66	0,84	1,13	
A5	-0,10	0,09	0,15	0,34	0,12	0,71	0,87	0,93	1,09	
						Maks.	1,17			

Tablo 22’de normalize ağırlıklandırılmış negatif uzaklıklar hesaplanmıştır. Yamuksal bulanık sayı değerlendirme skorlarının hesaplanması aşağıdaki gibidir(Tablo 23).

**Tablo 23:** Skor tablosu.

A1	6,29	14,07	-11,30	-5,29
A2	1,61	8,63	-7,44	-2,10
A3	0,90	3,27	-2,23	0,07
A4	0,43	1,79	-1,00	0,34
A5	-0,13	1,79	-1,07	1,03

**Tablo 24:** Sıralama sonucu.

A1	1,00
A2	0,26
A3	0,51
A4	0,39
A5	0,37

## 6. SONUÇ

Son yıllarda popülerleşen sürdürülebilirlik kavramı çok hızlı bir şekilde yönetim süreçlerimize dahil olmuş ve şirketler kendi pozisyonlarını sürdürülebilirlik başlığı altında değerlendirmeye başlamıştır. Çoğu şirket talimat ve prosedürlerini güncellemiş, yayınladıkları hedeflere sürdürülebilirlik öğelerini eklemiştir. Tedarikçiler sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları ile

varlıklarını sürdürülebilir yapacak ve müşteri memnuniyetinin artırılması, ürün kalitesinde standartları yakalama ve üretim süreçlerini güncel tutma gibi amaçlarında başarılı olacaklardır. Bu çalışmada, karar ekibi tüm çok kriterli karar verme tekniklerinde olduğu gibi farklı tecrübe ve bilgi sahibi olan çeşitli kişilerden oluşmuştur. Ayrıca model 5 ana kriter ve 19 alt kriterden oluşmuştur. Karar vericilerin verdiği anket yanıtları tutarlılık analizleri ile kontrol edilmiştir. Tutarlı sonuca ulaşmayan anket sonuçları tekrar karar vericiye iade edilmiş ve tutarlılık analizi sonucu tutarlı çıkana kadar tekrar doldurtulmuştur. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi kapsamında gerçekleştirilecek sürdürülebilir tedarikçi seçimi amacıyla Bulanık AHP, Bulanık EDAS ve Bulanık VIKOR yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanılması sonucu oluşan birçok kriterli karar verme modeli oluşturulmuştur. Bu model öncelikle Bulanık AHP ile ana kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıklarının bulunmasıyla başlamaktadır. Ardından ana kriter ve alt kriterler sonucunda nihai sonuç ağırlıklandırılmış alt kriterler bulunmuştur. Buradan alınan sonuçları en iyi alternatifleri belirlemek amacıyla Bulanık EDAS ve Bulanık VIKOR yöntemleri uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda sürdürülebilir tedarik zincirinin en önemli kriterinin çevre yönetimi olduğu ve sırasıyla sosyal yönetim, ekonomi yönetimi, kalite güvence yönetimi ve üretim yönetimi olduğu gözlemlenmiştir. Oluşturduğumuz modelde Bulanık AHP ile bulunan nihai kriter ağırlıkları Bulanık EDAS ve Bulanık VIKOR yöntemleri kullanılarak alternatifler değerlendirilmiş ve sıralamalar belirlenerek en önemli alternatif seçilmiştir.

**Yazar Katkıları:** Her iki yazar, literatür taraması, model ve yöntemlerin hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

## 7. KAYNAKLAR

[1] H. L. Lee, C. Billington, "Managing supply chain inventory: pitfalls and opportunities," *Solan Management Review*, vol. 33, no. 3, pp. 65-73, Apr. 1992.

- [2] B. S. Silvestre, "Sustainable supply chain management in emerging economies: Environmental turbulence, institutional voids and sustainability trajectories," *International Journal of Production Economics*, vol. 167, pp. 156-169, Sep. 2015.
- [3] G. Pauli, "The Blue Economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs," Paradigm Publications, 2010.
- [4] F. Ecer, "Sustainable supplier selection: fucom subjective weighting method based mairca approach," *Journal of Economics and Administrative Sciences Faculty*, vol. 8, no. 1, pp. 26-48, Mar. 2021.
- [5] C. Martins, M. V. Pato, "Supply chain sustainability: A tertiary literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 225, pp. 995-1016, Jul. 2019.
- [6] S. Luthra, et. al., "An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains," *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, no. 3, pp. 1686-1698, Jan. 2017.
- [7] S. Chopra, et. al., "Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation," Pearson Education, New Jersey, 2013.
- [8] N. Ahmadov, "Yeni Nesil Tedarik Zincirlerinin Gelişimi: Yeşil Tedarik Zinciri," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 2021.
- [9] K. C. Tan, V. R. Kannan, R. B. Handfield, "Supply chain management: supplier performance and firm performance," *International Journal of Purchasing and Material Management*, vol. 34, no. 3, pp. 1-23, 1998.
- [10] A. Ş. Özkan, "Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve İş," Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli, 2021.
- [11] D. J. Bowersox, et. al., "Readings in Physical Distribution Management: The logistics of marketing," Macmillan, New York, 1969.
- [12] A. İ. Özdemir, "Tedarik zinciri yönetiminin gelişimi, süreçleri ve yararları," *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 23, pp. 87-96, Jul. 2004.
- [13] T. C. Cheng, S. Podolsky, "Just-in-Time Manufacturing: An Introduction," Chapman&Hall, London, 1996.

- [14] E. Nebol, U. Tanyeri, E. Uzel, "Tedarik Zinciri ve Lojistik Yönetimi," Nobel Akademik Yayıncılık, 2016.
- [15] J. Heizer, B. Render, C. Munson, "Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management," Pearson, 2020.
- [16] I. F. Karasu, "Tedarik Zinciri Yönetiminin Yapısı ve İşleyişi," Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [17] G. Nakıboğlu, "Covid-19 küresel tedarik zincirlerinde yaşananlar ve dönüşüm," Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, cilt 17, sayı 2, sayfa 1-16, Aralık 2020.
- [18] F. A. Kibar, et. al., "Evaluation of anxiety levels and sleep quality of health care workers working in filiation during the covid-19 pandemic," Sakarya: Turkish Journal of Family Medicine and Primary Care, vol. 16, no. 1, pp. 66-75, Mar. 2022.
- [19] E. Fendoğlu, M. A. Polat, "Covid-19 salgını'nın otomotiv endüstrisi üzerindeki etkileri," İktisadi ve İdari Bilimler Teori, Güncel Araştırmalar ve Yeni Eğilimler, sayfa 514-528. 2020.
- [20] R. Perrin, A. Liescu, V. Iancu, "COVID-19's Impact on the Supply Chain", [Online]. Available: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ro/pdf/2020/COVID-19-impact-on-the-supply-chain.pdf>.
- [21] M. Hammer, "The superefficient company," Harvard business review, vol. 79, no.8, pp. 82-93, Sep. 2001.
- [22] P. Ward. "Experts drill into the motor industry's chip issues", 2021, [Online]. Available: <https://www.autocar.co.uk/car-news/industry-news-tech%2C-development-and-manufacturing/stock-take-experts-drill-motor-industrys>.
- [23] A. Bicer, "Automakers' chip crisis spreading to other sectors," 2021, Anadolu Agency, [Online]. Available: <https://www.aa.com.tr/en/economy/automakers-chip-crisis-spreading-to-other-sectors/2194289>.
- [24] G. Guillaume, "Chip shortage leads carmaker Opel to shut German plant until 2022," Reuters, 2021.
- [25] B. Ageron, A. Gunasekaran, A. Spalanzani, "Sustainable supply management: An empirical study," International Journal of Production Economics, vol. 140, no. 1, pp. 168-182, Nov. 2012.
- [26] Vikipedi, 2022, "Sürdürülebilirlik," [Online]. Available: [tr.wikipedia.org/wiki/Sürdürülebilirlik](https://tr.wikipedia.org/wiki/Sürdürülebilirlik).
- [27] M. A. White, "Sustainability: I know it when I see it," Ecological Economics, vol. 83, pp. 213-217, Feb. 2013.
- [28] T. Koç, "Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Kullanarak Sürdürülebilir Tedarikçi Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [29] E. D. R. S. Gonzalez, "Making real progress toward more sustainable societies using decision support models and tools: introduction to the special volume," Journal of Cleaner Production, vol. 105, pp. 1-13, Oct. 2015.
- [30] R. Allen, "How to Save the World. Strategy for World Conservation," Kogan Page Ltd., 1980.
- [31] World Commission on Environment and Development and G. H. Brundtland, "Our Common Future," Opening Address by Gro Harlem Brundtland... on the Occasion of the Launch of the Report, London, England, Apr. 1987.
- [32] P. Ö. Eşkin, "Sürdürülebilirlik nedir?," Ekolojist, 2019, [Online]. Available: <https://ekolojist.net/surdurulebilirlik-nedir>.
- [33] D. P. Claro, et. al., "Sustainability drivers in food retail," Journal of Retailing and Consumer Services, vol. 20, no. 3, pp. 365-371, May. 2013.
- [34] H. Deng, "Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison," International Journal of Approximate Reasoning, vol. 21, no. 3, pp 215-231, Aug. 1999.
- [35] S. Mahmoodzadeh, et. al., "Project selection by using fuzzy AHP and TOPSIS technique," International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, vol. 1, no. 6, pp. 270-275, 2007.
- [36] G. Akman, A. Alkan, "Tedarik zinciri yönetiminde BAHF yöntemi kullanılarak tedarikçilerin performansının ölçülmesi: otomotiv yan sanayi örneği," İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, cilt 5, sayı 9, sayfa 23-46, Haziran 2006.
- [37] K. Zhu, Y. Jing, D. Chang, "A discussion of extent analysis method and applications of

- fuzzy AHP," *European Journal of Operational Research*, vol. 116, no. 2, pp. 450-456, Jul. 1999.
- [38] C. Kahraman, U. Cebeci, Z. Ulukan, "Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP," *Logistics Information Management*, vol. 16, no. 6, pp. 382-394, Dec. 2003.
- [39] C. Kahraman, "Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments," Springer, 2008.
- [40] H. Güner, "Bulanık AHP ve Bir İşletme için Tedarikçi Seçimi Problemine Uygulanması," Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2005.
- [41] R. J. Kuo, S. C. Chi, S. S. Kao, "A decision support system for locating convenience store through fuzzy AHP," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 37, no. 1-2, pp. 23-326, Oct. 1999.
- [42] B. Öztürk, "Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinden Bulanık Topsis ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, 2011.
- [43] C. T. Chen, C. T. Lin, S. F. Huang, "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management," *International Journal of Production Economics*, vol. 102, no. 2, pp. 289-301, Aug. 2006.

RESEARCH ARTICLE

# Proof of concept: Green Grass in Novel Waste Plastics Concrete to Mitigate the Effects of Climate Change

John Kinuthia

<sup>1</sup> Advanced Materials Testing Centre (AMTeC), Faculty of Computing, Engineering and Science (FCES), University of South Wales (USW), Pontypridd, CF37 1DL United Kingdom.

Received/Geliş: 06.10.2023

Accepted/Kabul: 19.02.2024

\*Corresponding Author: John Kinuthia , e-mail address: [john.kinuthia@southwales.ac.uk](mailto:john.kinuthia@southwales.ac.uk)

**ABSTRACT:** The growth in population and development in industry has led to enhanced construction technologies. As a result, the need for more buildings arises which is followed by more energy consumption and more waste. Concrete is one of the most used materials in construction. However, the production of Portland cement consumes a lot of energy and produces a large amount of carbon dioxide which is emitted into the atmosphere. This in turn impacts on the ozone layer and contributes enormously to climate change. Moreover, there are huge amounts of waste, especially plastic waste, which are produced and delivered to landfill which also impacts significantly on the environment. The utilisation of waste plastic in concrete would help to mitigate the problem of waste by developing a wide range of environmental-friendly special concretes which will ensure both environmental protection and the achievement of appropriate technology. This paper looks at an innovative way of utilising waste plastics for the manufacture of unique concrete types for use in the built environment. The paper is proof of concept, being mainly to show-case one example of the many possibilities of formulating concrete for a wide range of low to medium strength applications. The paper pursues a unique example of composite concrete made from both waste plastics and bio-waste. The preliminary research combines waste plastics and wood waste – saw dust. The aim was to produce a special concrete with special character such as concrete with grass growth, for aesthetical concrete and/or for applications in sports fields or playgrounds. The concrete was made with 100% waste plastics aggregates, with saw-dust waste incorporated to support the growth of grass.

**Keywords:** Plastics, waste, climate, concrete, environment.

## 1. INTRODUCTION

The challenges posed by climate change are increasingly becoming more concerning, and serious action needs to take place immediately. Most world leaders agree with this argument, but meaningful change has been elusive. The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) is the main avenue for global realisation of any efforts towards mitigating the effects of climate change. UNFCCC was formed in 1994, and is the culmination of many years of intricate talking and negotiations, culminating in the Kyoto conference and agreement in 1997. The protocols committed parties by setting

internationally binding emission reduction targets. It is through UNFCCC that both developed and developing countries are facilitated to work together to meet agreed emission targets. After eight years of attempting to reduce the targets depending on individual country efforts, the UNFCCC came to force in 2005, taking the previously loose agreements a notch higher. Here key mechanisms were put in place to facilitate global engagement and cooperation. The Clean Development Mechanism (CDM) projects were muted, which were to use Certified Emission Reduction (CER) units as the trading currency to quantify emission reductions. In the currency, one CER unit is the equivalent of the reduction of carbon dioxide emission into the atmosphere by one



tonne. The entire Emission Trading Scheme (ETS) was to ensure continuity of the mitigation of the effects of climate change. In addition, at Kyoto, an agreement was reached, to assist developing countries to adapt or mitigate against the adverse effects of climate change, and a special fund – Adaptation Fund (AF) was set up for this purpose, to be managed by an AF board (AFB).

The deterioration of the effects of climate change has shown that the agreements set under the UNFCCC are clearly not sufficient as the deterioration of the effects is worrying. The effects require a multi-disciplinary and multi-pronged approach in order to make meaningful change. For materials researchers, there is no limit to the potential contribution that development of sustainable building and construction materials can make. It is well known that the building and construction sectors have an enormous contribution to the global carbon dioxide emission into the atmosphere. With this large contribution to global emission, the manufacture of concrete forms a disproportionately large chunk. For this reason, research into sustainable concrete is a well-known avenue for mitigating the effects of climate change. Whereas the most significant and impactful approach is that towards the replacement of cement, it is also well recognised that replacement of natural aggregates also has notable achievements. For this reason, there have been efforts devoted to utilisation aggregates from construction and demolition waste (CDW), as well as from artificial aggregates. Artificial aggregates are varied and can be based on a wide range of natural, industrial or bio-materials for example from agricultural waste. Thus, the utilisation of natural, industrial, and agricultural waste and by-product materials is increasingly being considered in a wide variety of socio-economic spheres in both technological and environmental contexts.

Plastic waste is increasingly becoming an environmental menace on land and in the sea. Its application in concrete would help to mitigate the problem of waste by developing a wide range of environmental-friendly special concretes which will ensure environmental protection, achievement of appropriate engineering properties [1-3]. Certain niche concrete applications require porosity and/or perviousness, where the aggregates play a far bigger role compared to the role played by cement

and/or sand [4-6]. Other applications require lightweight construction [7,8]. The character of waste plastics means that plastics are very well placed as materials for the imparting the lightweight and/or porosity in concrete, for special characteristics for niche applications.

Polypropylene (PP and Polyethylene Terephthalate (PET) are some of the most commonly encountered streams of waste plastics [9,10]. This paper looks at an innovative way of utilising PP waste plastics for the manufacture of unique concrete types for use in the built environment [11]. The paper is proof of concept, to show-case the possibility of formulating concrete for a wide range of low to medium strength concrete applications. The paper pursues a unique application, by investigating the potential for composite concrete made from both waste plastics and bio-waste. It combines waste plastics and wood waste – saw dust, with the aim of producing a special concrete that not only performs in the environmental, structural as well as in the aesthetic sense.

## 2. MATERIALS

*Portland cement:* Commercial Portland cement (CEM I – 42.5 N) was used as the control binder. It was supplied by Jewson UK Ltd. of Caerphilly, South Wales, UK. It was manufactured as per BS EN 197 - 1:2011 [12]. The physical and chemical properties are shown in Tables 1 and 2 respectively.

**Table 1:** Physical properties of Portland Cement

	Properties	PC
1	Insoluble Residue	0.5
2	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	1400
3	Relative density	3.1
4	Blaine fineness (m <sup>2</sup> /kg)	365
5	Colour	Gray
6	Glass Content	-

*Aggregates:* Polypropylene (PP) plastic is a thermoplastic polymer and is used on a wide variety of applications including in construction, packaging and in textiles. PP comes in many forms and colours as shown in Figure 1a. Figure 1b shows the shredded propylene aggregates used in the current work. It consisted of flexible leathery aggregates of 5-20mm in diameter. The aggregates were excessively flaky and needed significant vibration time to align in a horizontal formation.

The PP plastic waste was provided by a private construction company - Speedbuild UK Ltd.

**Table 2:** Chemical composition of Portland cement.

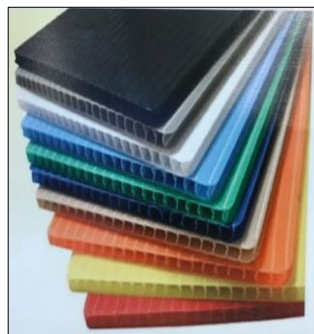
No.	Oxide	PC
1	Lime (CaO)	63
2	Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20
3	Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6
4	Magnesium Oxide (MgO)	4.21
5	Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3
6	Manganese Oxide (MnO)	0.03-1.11
7	Sulphide (S <sub>2</sub> )	-
8	Sulphur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.3
9	Alkalis (Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O)	-
10	Loss on ignition	0.8

### 3. METHODOLOGY

Two waste plastic concrete test regimes were adopted. The first regime comprised of waste plastic aggregates, Portland cement and water. The second regime had all these three ingredients, but also contained wood sawdust to encourage growth of grass.

#### 3.1 Regime without Grass

The regime without grass comprised of two phases. During Phase 1 (see Table 3), the total amount of cement and waste plastics used were kept constant. Mixes 1 and 2 were made, comprising of waste plastics (WP), cement (C) and water (W). The absence of sand was to make mixes with an open porous texture for the proposed growth of grass. The waste plastics were bound using 10% PC by weight of the waste plastics. The two mixes were at two w/c ratios, 0.3 and 0.5. Both mixes visually appeared wet and of good workability.



(a)



(b)

**Figure 1:** (a) Typical propylene plastics showing variety of colours; (b) Shredded polypropylene plastic flaky aggregates (WP) used in the current experiments.

**Table 3:** Mix composition without grass (kg/m<sup>3</sup>) \*

ID	Mix Code	C	WP	T	W	Visual appearance
Phase 1						
1	C10W0.3	420	360	-	140	Wet
2	C10W0.5	420	360	-	210	Wet
Phase 2						
3	C20W0.3	1008	432	-	336	Wet
4	C20W0.5	1008	432	-	504	Wet

**Notes:** \* C-Portland cement; WP – Polypropylene plastic waste; T-Sawdust; W – Water

During Phase 2, Mix formulations Mix 3 and 4 were cast. They aimed at denser formulations, and incorporated higher waste plastics and bound with 20% PC. The two mixes were once again made at

two w/c ratios, 0.3 and 0.5. Both mixes continued to visually appear wet and of good workability. This suggested that the use of clean waste plastics can result in workable concrete. Some unpublished work has shown that impurities in waste plastics can sometimes result in higher water demand.

For mixing, all the dry ingredients - cement and waste plastics were placed in a concrete mixer and thoroughly mixed before adding the required amount of water. For mixes containing saw dust, the saw dust was also added during the mixing of dry ingredients, before the addition of water. The wet mixture was placed in 100 mm×100mm×100 mm cube steel moulds and compacted in three

layers using a square steel rod. Efforts to vibrate the concrete in the normal manner was not successful as the waste plastics were rather too light and the mixed material heaved significantly. For this reason, hand compaction was adopted, and weights placed on top of the fresh concrete in the steel moulds to prevent heaving, until the cement had set. Demoulding was carried as for normal concrete, after 24 hrs. The waste plastic concrete cubes placed in a water bath to cure at room temperature ( $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ), for 7 and 28 days.

*Testing for density:* These tests were carried out in accordance with BS EN 12390-7:2019 [13], after curing for 7 and 28 days in water. An average of results from three test specimens was used for data points. Due to the preliminary nature of the research programme, the density tests were carried out only on the mixes made without grass. This was to study the effect of using waste plastic (not grass or saw dust) on the density of concrete. The growth of grass was meant to be proof of concept only, and hence no tests were carried out on concrete with grass. This aspect is for future more detailed investigation.

*Testing for compressive strength:* These tests were carried out in accordance with BS EN 12390-2:2019 [14], after curing 7 and 28. An average of results from three test specimens was used for data points. Again due to the preliminary nature of the research programme, the compressive strength tests were carried out only on the mixes made without grass, mainly to study the effect of using waste plastic (not grass or saw dust) on the compressive strength of concrete.

### 3.2 Regime with Grass

For the waste plastics concrete mixes that were meant to promote the growth of grass, various strategies were instrumented. To promote growth of grass, all regimes with grass seeds were made at a w/c ratio of 0.5, and varying amounts of saw dust (See Table 4). The mixes with grass were a development of mixes 2 and 4 in Table 3, which had a w/c ratio of 0.5 but at two levels of PC content (10% and 20% respectively). The amount of saw dust was varied in each mix series. In one particular mix (Mix 4a) and excessively high amount of waste plastics was used, to assess the effect of density on grass growth.

**Table 4:** Mix composition with grass ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

**Notes:** \* C-Portland cement; WP – Polypropylene plastic waste; T-Sawdust; W – Water

ID	Mix Code	C	WP	T	W	Visual appearance
2a	C10T10W0.5	378	324	18	190	Wet
2b	C10T20W0.5	378	324	36	190	Wet
2c	C10T30W0.5	378	324	54	190	Wet
2d	C10T40W0.5	378	324	72	190	Dry
4a	C20T10W0.5	756	324	18	378	Dense
4b	C20T20W0.5	630	324	36	315	Wet
4c	C20T30W0.5	630	324	54	315	Wet
4d	C20T40W0.5	630	324	72	315	Wet

For grass growing, cubes that had cured for 28 days were used, after removal from the curing tanks. Grass seeds were mixed with a small quantity of topsoil and a layer of approximately 5-10mm of the soil-grass seed mixture spread on top of the waste plastic concrete cube surfaces. The cubes were then placed in plastic containers, which were kept at room temperature ( $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) and water added using a sprinkler on a regular basis. Germination and growth of grass was monitored on a regular basis, carefully assessing the strength of the germination, rate and condition of growth.

## 4. RESULTS AND ANALYSIS

### 4.1 Test specimens

Figure 2 shows a typical 100 mm×100mm× 100 mm cube made using the flaky aggregates from polypropylene waste plastics. The cube edges were very rugged, due to loosely adhered plastic aggregates, especially at the top finished surface. It was possible to coat the entire concrete cube with a cement paste, presenting a better finished product. The cubes were lightweight and some floated in water as shown in Figure 3.

### 4.2 Density

Figure 4 illustrates the densities of selected mixes (mixes without grass), showing the effect of increasing the w/c ratio and the content of cement on the density of concrete mixes containing waste plastics. The results show low densities in the range of 800 – 1200  $\text{kg}/\text{m}^3$ , suggesting that the concrete for some of the mix formulations could float in water as mentioned earlier. There were also some medium range densities of 1400  $\text{kg}/\text{m}^3$ , although this still suggested very lightweight concrete, considering

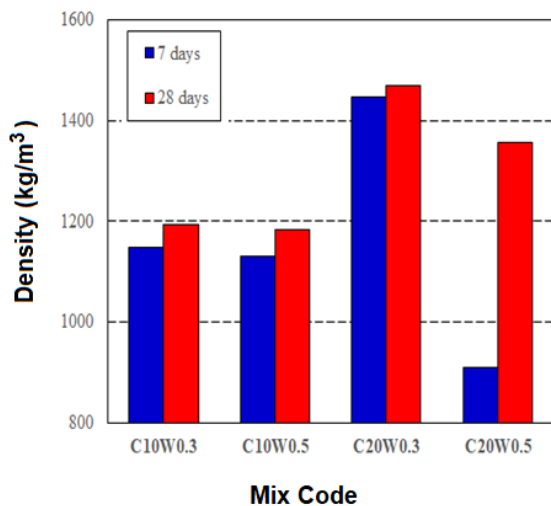
that typical normal concrete has a density of circa 2400kg/m<sup>3</sup>. This lightweight nature is consistent with concrete containing plastics [1-11].



**Figure 2:** Concrete cube made using 100% replacement of natural aggregates with polypropylene (PP) plastic waste (WP-Concrete).



**Figure 3:** An exhibition of the wide variety of concrete containing waste plastics, showcasing growing of grass and floating of the concrete in water (concrete in the plastic container), among other unique characteristics.

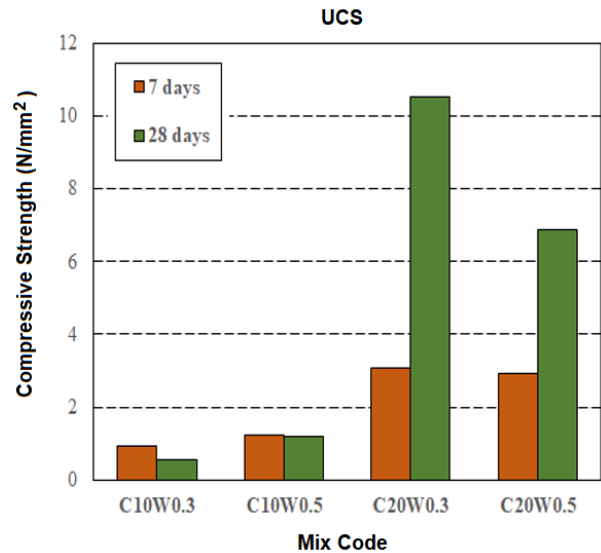


**Figure 4:** Effect of increasing the w/c ratio and the content of cement on the density of selected concrete mixes containing waste plastics.

### 4.3 Compressive Strength

Figure 5 illustrates the compressive strength for selected concrete mixes containing PP waste. The figure shows the effect of increasing the w/c ratio and the content of cement on the compressive strength. It shows that when the appropriate amount of cement is used at low-medium w/c ratios, it is possible to achieve usable strength values.

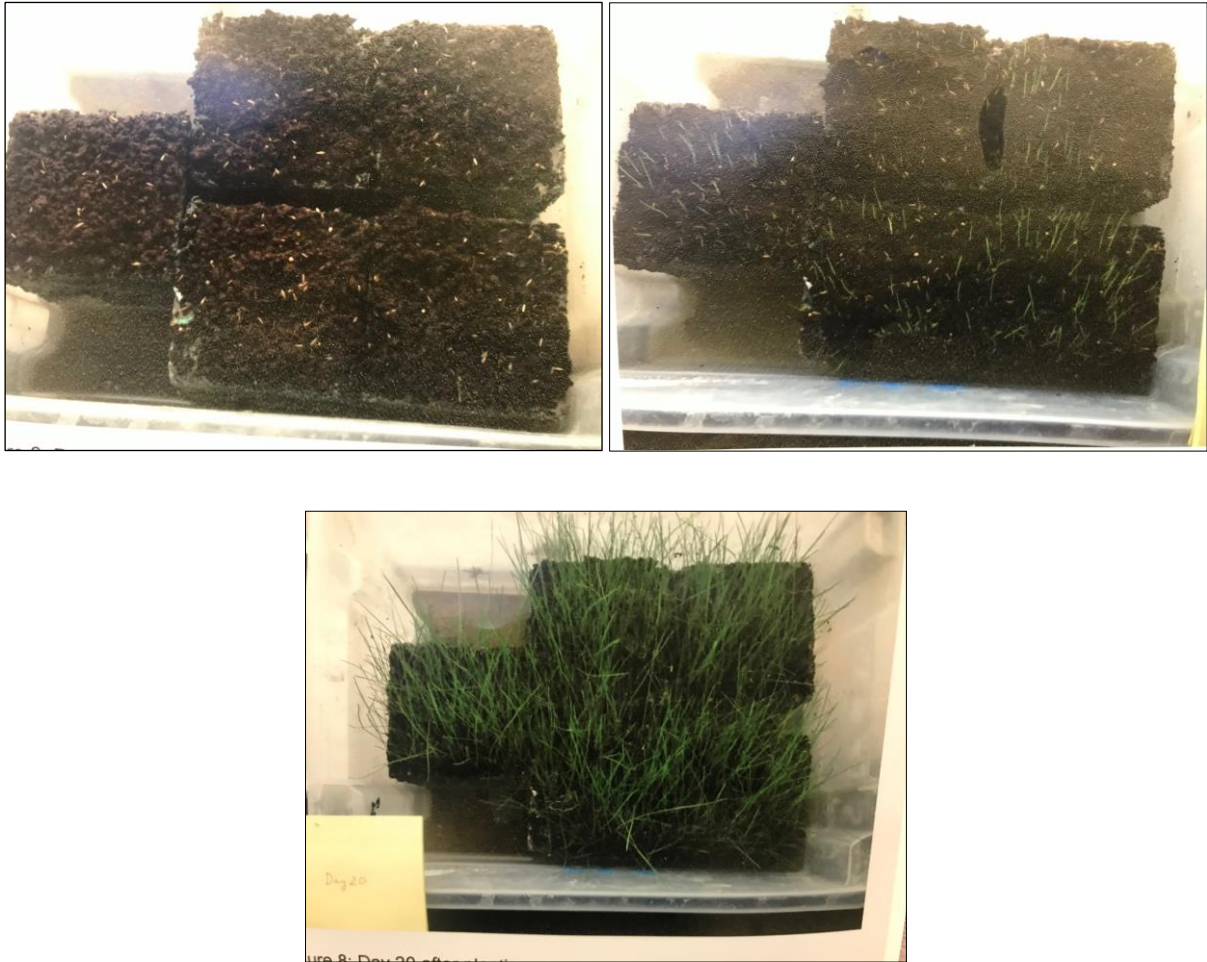
For masonry, the standards for concrete and clay masonry BS EN 771-3 [15] and BS EN 771-1 [16] respectively do not specify any strength values, and the manufacturer is left to declare the performance. Thus, achieving 10N/mm<sup>2</sup> (for mix C20W0.3) suggests clear potential. Upon further research, the repeatability of outcomes and precise code of practice can be developed on how to utilise waste plastics in construction.



**Figure 5:** Effect of increasing the w/c ratio and the content of cement on the density of selected WP-concrete mixes.

### 4.4 Proof of concept - Growing of Grass

Figure 6 illustrates the various stages of growth of grass on concrete containing waste plastics. The grass appears healthy in terms of strength, height, and colour, suggesting that the growth environment is not toxic for growth. Future investigations will include effect on strength, durability, and performance in wide range of applications, such as sports fields and playgrounds.



**Figure 6:** Grass at various stages of growth, on selected WP-concrete mixes.

## 5. CONCLUSIONS

The characteristics of waste plastics are varied. For use in construction, the character of the waste plastics aggregate is significant. The challenge remains on how to cope with the wide variety of shapes, textures, aggregate impact values among other variables. It is therefore likely that different approaches will have to be adopted, depending on the application in question. This paper has reviewed application of polypropylene plastic waste in concrete, where the following conclusions may be drawn:

- It has been possible to use very flexible and very flaky waste polypropylene plastics aggregates of literally no impact value in formulating concrete of low-medium strength.
- Since usable compressive strength values were achieved at both 7 and 28 days using

very flaky and weak plastic aggregates, stronger waste plastic types can achieve far stronger concrete for typical requirements in building and construction.

- With waste plastics, it is possible to formulate a wide variety of concrete forms, some with unique characteristics and applications in building and construction.
- For waste plastic concrete aimed at promoting growth of grass, future investigations are recommended, to investigate among other issues the effect on strength, durability, and performance in wide range of applications, such as sports fields and playgrounds.

**Author Contributions:** John Kinuthia has wholly contributed to the manuscript, and analysed the findings as herein reported.

**Acknowledgement:** Thanks go to Masters student Tuan Do Minh, for helping the laboratory works related to this study.

**Conflicts of Interest:** The author states that there are no conflicts of interest in the work reported.

## 6. REFERENCES

- [1] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, "Use of recycled plastics in concrete: A critical review," *Waste Management*, vol. 51, pp. 19-42, May. 2016.
- [2] M. A. A. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M. I. Martini, M. S. R. Ahmed, A. S. R. Ahmed, "Influence of various plastics-waste aggregates on properties of normal concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 17, pp. 13-22, May. 2018.
- [3] Z. Z. Ismail, E. A. Al-Hashmi, "Use of waste plastics in concrete mixtures as aggregate replacement," *Waste Management*, vol. 90, pp. 524-529, Nov. 2008.
- [4] A. S. Agar-Ozbek, J. Weeheijim, E. Schlangen and K.V. Breugel, "Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 480-490, Apr. 2013.
- [5] M. A. R. Bhutta, K. Tsuruta, J. Mirza, "Evaluation of high-performance porous concrete properties," *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 67-73, Jun. 2012.
- [6] A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino, "Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 480-490, Aug. 2015.
- [7] D. Minh-Tuan, "Development of Vegetation-Friendly High Porosity Concrete for Special Applications in Construction," MSc dissertation, University of South Wales School of Engineering, 2017.
- [8] P. Gorak, P. Postawa, L. N. Trusilewicz, Al. Kalwik, "Cementitious eco-composites and their physicochemical/mechanical properties in Portland cement-based mortars with a lightweight aggregate manufactured by upcycling waste by-products," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, pp. 125156, Mar. 2021.
- [9] P. Gorak, P. Postawa, L. N. Trusilewicz, A. Lagosz, "Lightweight PET based composite aggregates in Portland cement materials - Microstructure and physicochemical performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 34, pp. 101882, Feb. 2021.
- [10] A. A. Mohammed, A. A. F. Rahim, "Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 244, pp. 118350, May. 2020.
- [11] R. H. Faraj, A. F. H. Sherwani, A. Daraei, "Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles," *Journal of Building Engineering*, vol. 25, pp. 100808, Sep. 2019.
- [12] E. N. British Standard. 197-1 Cement-Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, 2019.
- [13] E. N. British Standard. 12390-7: Testing Hardened Concrete: Density of Hardened Concrete, 2019.
- [14] E. N. British Standard. 12390-3:2019: Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens, 2019.
- [15] E. N. British Standard. 771-3:2011+A1:2015: Specification for Masonry Units. Part 3: Aggregate Concrete Masonry Units (Dense and lightweight aggregates), 2015.
- [16] E. N. British Standard. 771-1:2011+A1:2015: Specification for Masonry Units. Part 1: Clay Masonry Units, 2015.

RESEARCH ARTICLE

# Cost Optimization for Sustainable Economy with Heuristic Algorithms in Power System

## *Güç Sisteminde Sezgisel Algoritmalarla Sürdürülebilir Ekonomi Amaçlı Maliyet Optimizasyonu*

Serkan İşcan<sup>1\*</sup>, Gürcan Lokman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sinop Üniversitesi, Sinop, Türkiye.

<sup>2</sup> Milli Savunma Üniversitesi Hava Astsubay MYO, İzmir, Türkiye.

Received / Geliş: 09.12.2023

Accepted / Kabul: 01.04.2024

\*Corresponding Author: Serkan İşcan, [siscan@sinop.edu.tr](mailto:siscan@sinop.edu.tr)

**ABSTRACT:** Economically transmitting the energy obtained from power generation units through transmission and distribution lines is critical for environmentally friendly and sustainable energy management. The component that plays an important role in delivering electrical energy from production units to distribution and consumption units is the transmission/distribution network. At this stage, economic sustainability of the generated active and reactive power is possible by keeping operating costs and loss expenses under control. Insufficient power generation units or increased losses increase the operating costs in power systems. Capacity excess and cost increase affect stability by reducing system reliability. These negativities can cause problems in power systems and negatively affect consumers by making the power transmission network unusable. Developing technology and increasing energy demands bring quality problems in power systems. The operating costs of existing power generation units, which will provide the increasing demand power with the most appropriate cost and power generation, need to be revised with optimization techniques. Thus, the efficiency of power systems can be increased. If power systems are inadequate, new and renewable power generation units should be included in the power system. In this study, power system operation and cost optimizations were carried out with Particle Swarm Optimization (PSO) and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms that use swarm intelligence on IEEE 30-bus test systems. Significant differences in the results were observed when the number of population and re-runs were selected as 20, 30 and 50 for the PSO and GWO algorithms, respectively. When the results for three different situations are compared on the basis of algorithms; In the simulation tests conducted for the third case, where 50 population and re-run values of the PSO algorithm were used, the optimal operating cost value of 800.47 \$/h was reached. As a result of the study, it was seen that the PSO and GWO algorithms used in the power system brought the total operating cost closer to minimum values and made power production more sustainable by increasing the number of population and re-runs.

**Keywords:** Power systems, sustainable energy, cost optimization, PSO, GWO.

**ÖZ:** Güç üretim birimlerinden elde edilen enerjinin iletim ve dağıtım hatları üzerinden ekonomik bir şekilde iletilmesi, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji yönetimi açısından kritiktir. Elektrik enerjisinin üretim birimlerinden dağıtım ve tüketim birimlerine ulaştırılmasında önemli bir rol oynayan bileşen, iletim/dağıtım şebekesidir. Bu aşamada, üretilen aktif ve reaktif gücün ekonomik bir şekilde sürdürülebilirliği, işletme maliyetleri ve kayıp giderlerinin kontrol altında tutulması ile mümkündür. Güç üretim birimlerinin yetersiz olması veya kayıpların artması, güç sistemlerinde işletme maliyetini artırır. Kapasite aşımı ve maliyet artışı ise sistem güvenilirliğini azaltarak kararlılığı etkiler. Bu olumsuzluklar, güç sistemlerinde sorunlara yol açabilir ve güç iletim şebekesini kullanılamaz hale getirerek tüketicileri olumsuz etkiler. Gelişen teknoloji ve artan enerji talepleri, güç sistemlerinde kalite sorunlarını beraberinde getirmektedir. Artan talep gücünü en uygun maliyet ve güç üretimiyle sağlayacak mevcut güç üretim ünitelerinin işletme maliyetlerinin optimizasyon teknikleri ile revize edilmesi gerekmektedir. Böylelikle güç sistemlerinin verimliliği artırılabilir. Güç sistemlerinin yetersiz kalması durumunda yeni ve yenilenebilir güç üretim üniteleri güç

sistemine dahil edilmelidir. Bu çalışmada, IEEE 30-bara test sistemleri üzerinde sürü zekasını kullanan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) algoritmaları ile güç sistemi işletme ve maliyet optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. PSO ve GKO algoritmaları için popülasyon ve tekrar çalıştırma sayısı sırasıyla 20, 30 ve 50 değerlerinde seçildiğinde sonuçlarda önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Üç farklı durum için oluşan sonuçların algoritmalar bazında karşılaştırılması yapıldığında; PSO algoritmasının 50 popülasyon ve yeniden çalıştırma değerlerinin kullanıldığı üçüncü durum için yapılan simülasyon testlerinde en uygun işletme maliyet değeri olan 800,47 \$/Saat'e ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda güç sisteminde kullanılan PSO ve GKO algoritmalarının popülasyon ve tekrar çalıştırma sayısının artışıyla toplam işletme maliyetini asgari değerlere yaklaştırdığı ve güç üretimini daha sürdürülebilir hale getirdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistemleri, sürdürülebilir enerji, maliyet optimizasyonu, PSO, GKO.

## 1. INTRODUCTION

Meeting the challenges of sudden increases in power demand in power systems can lead to potential issues such as the outage of transmission lines or generation units. To overcome such problems, strategies like restructuring power systems, organizing distributed generation, and implementing automatic load management and switchgear strategies are employed [1]. These methods enhance the security and reliability of power systems, providing end consumers with a higher level of energy quality [2]. Among the expectations of end consumers is the delivery of high-quality electrical energy sustainably at optimal costs. To achieve optimum energy costs, enhancing power system reliability by optimal placement of distributed generation units and minimizing transmission line losses is essential [3]. This way, delivering energy to end consumers at the most favourable cost with the lowest power system loss becomes possible.

Economic energy distribution has become a critical element in today's energy generation, transmission, and distribution, given the rise in energy demand and fossil fuel costs [4]. Therefore, transitioning to energy-saving and economic power distribution models has become a necessity [5]. Renewable energy sources used in distributed generation, such as wind, solar, biomass, biogas, etc., can inject active and reactive power into the power system or act as loads when needed [6]. Power plants based on renewable energy sources, with proper placement and accurate power and cost optimization, reduce power system losses, lower total energy costs, and contribute to minimizing global warming. Managing the current power demand and optimizing renewable energy-based generation for

minimum energy costs and a sustainable environment have become indispensable today [7]. Generation costs of generation units are numerically defined to obtain minimum generation costs under current load conditions [8]. The cost function is generally determined as a second-degree nonlinear function. However, this may be insufficient on its own. Therefore, fuel costs and load conditions are also considered in this function. Additionally, transmission line losses and connection point power distribution conditions may require a more comprehensive evaluation, affecting economic power distribution [9]. The combustion of fossil fuels results in significant problems in terms of both climate change and costs. If the optimization problem is defined to provide economic power distribution; in addition to load allocation in power generation units, reliability, continuity of energy supply to demand, appropriate costs, and reduction of fossil fuels will significantly reduce climate change and environmental factor expenditures [10]. While metaheuristic algorithms have been evaluated in terms of efficiency and robustness in economic load distribution (ELD) of power systems in literature studies, in [11] the exploration and exploitation capabilities of clustering cuckoo search optimization have been verified in ELD problems with different numbers of generators. In ELD optimization studies of power systems, comparative solutions of classical metaheuristic algorithms and their hybrid versions have been evaluated in terms of quality and efficiency to solve single or multi-objective functions [12]. Among these methods, in [13], a modified objective function in a power system with wind energy included in MATLAB software and a comparative analysis of the results obtained by applying ELD simulations with the PSO technique were made, emphasizing the speed of PSO in optimal solutions and its effect



on cost reduction. In the study [14], referring to the popularity of PSO, it was evaluated that the performance of the PSO architectural structures used in the studies was quite good in applications. The usefulness and calculation speed of PSO on various scenario situations of power systems and different IEEE bus test systems have been verified [15]. It has been confirmed in CEC functions that the developed GWO, while PSO applications are continuing, produces very assertive results in its use in the optimization of engineering problems and can be applied efficiently in optimization problems [16]. GWO algorithm was subjected to performance tests in the solution of very limited optimization problems using IEEE bus test systems data in the analysis of power systems and successful results were obtained [17]. Although these metaheuristic algorithms tend to get stuck in local minima, they achieve near-optimal results in function solutions. In addition to the metaheuristic algorithms mentioned in the allocation process of ELD, Whale Optimization Algorithm (WOA) etc. [18] algorithms produce effective solutions without getting stuck in local optimum in order to minimize the operating costs of power systems and production units as much as possible. In economical load distribution, mathematical optimization methods can analyse cost functions related to production costs. When defining functions, inputs and outputs in production units need to be formulated. In this context, fuel and its entry points into the system can be defined as input. Environmental sensitivity and fuel-related emissions play an important role in defining the function for economical load distribution. Economical load distribution based on power generation, taking into account load demand, can significantly reduce fuel consumption and emission levels in the system [19].

In this study, cost optimizations of the power system were made using PSO and GWO smart-based algorithms on the IEEE 30-bus test system for economic power distribution. A single objective function was used to minimize fuel usage, emissions, and power losses to optimize power generation and transmission costs. Three cases with different population and re-run numbers were analysed in order to reveal the effects of the population number and number of runs on the use of algorithms and to evaluate the performance of the objective functions. The results obtained are

presented by comparing the performances of the algorithms.

The sections of the study are organized as follows: Section 2, under the title ‘Materials and Methods’, begins with a definition of the problem and an introduction to the bus system used. Subsequently, detailed explanations of the PSO and GWO algorithms employed for optimization are provided, including flowcharts. Section 3 presents comparative results of the PSO and GWO optimizations conducted for three cases on the IEEE 30-bus test system, using various parameters. In Section 4, the outcomes of this study are juxtaposed with previous research findings on the same test system, emphasizing the positioning of this study within the existing literature. Conclusions and evaluations are presented in Section 5.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1 Problem Definition

Economic load distribution relies on optimizing the fuel costs among the generation units to minimize fuel expenses for the requested loads. To calculate the optimal fuel cost for the power system, the mathematical definition of the fuel cost that each generator can demand needs to be formulated as a quadratic function, as shown in Equation (1) [19].

$$F(P_{Gi})_1 = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \text{ \$/h} \quad (1)$$

### 2.2 IEEE 30-Bus Test System

In the optimization study, GWO and PSO algorithms were used to reduce fuel and ere;  $F(P_{Gi})$  is the fuel cost,  $a_i, b_i$  and  $c_i$  are the cost function coefficients for thermal unit  $i$ , and  $P_{Gi}$  is the active power generation of the  $i^{th}$  thermal unit. The cost function can be practically explained in more detail, especially in the case of steam turbines used in thermal power plants, where the opening and closing of steam valves can linearly increase or decrease the cost function. If the fuel cost function is to be expanded, taking into account the effects of the valve point loading of generator units, it can be rewritten as in Equation (2) [20].

$$F(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + |e_i \sin [f_i (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi})]| \quad (2)$$

Here;  $e_i$  and  $f_i$  are the cost function coefficients for fuel type of unit  $i$ th reflecting valve-point effects

and  $P_{Gi}^{min}$  is the minimum active power generation of thermal unit  $i$ . With the addition of valve loading points to this objective function, non-convex fluctuations will occur in the power versus generation cost curve. Overcoming these fluctuations becomes a challenge that needs to be addressed through optimization efforts. In economic power distribution cost optimization, some constraints such as transmission line losses, power flow limits, environmental emission gas values, and generator power limits need to be considered [21]. Among these constraints, the most critical is transmission line power losses. Strategies specified in Equations (3-4) are used to minimize transmission line losses.

$$P_{loss} = P_G^T B_{ij} P_G + B_{io} P_G + B_{oo} \quad (3)$$

$$P_G = [P_{G1} P_{G2} P_{G3} \dots \dots \dots P_{GN}]^T \quad (4)$$

Here;  $B_{ij}$ ,  $B_{io}$  and  $B_{oo}$  are the coefficients of the power loss matrix. The power injected into the power system by generators must be equal to or greater than the sum of the demand power and the loss power.  $P_G$  represents the total power generated by all generators, and the total  $P_{loss}$  is used in calculating the magnitude of losses. Equation (5) defines the demand power ( $P_{load}$ ) and loss power corresponding to the generated power for the entire power system [22].

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} \geq P_{load} + P_{loss} \quad (5)$$

The fundamental issue with fossil-fuel-based thermal power plants is that emissions gases remain as harmful by-products of fuels. Environmental sensitivity is increasing every day, and global efforts are underway to reduce greenhouse gases. The second-degree mathematical expression defined in Equation (6) explains the relationship between emission gases and power generation [23].

$$E(P_{Gi}) = a_{ei} P_{Gi}^2 + b_{ei} P_{Gi} + c_{ei} \quad (6)$$

Here,  $a_{ei}$ ,  $b_{ei}$  and  $c_{ei}$  are the cost function coefficients for thermal unit  $i$ . Instability in the power system can arise when the total generated power is less than the demand power and total losses, leading to voltage and frequency instability conditions. The environmental objective function representing the emissions as a quadratic function of generation unit ( $P_{Gi}$ ) can be defined as in Equation (7) [24]-[26].

$$F(P_{Gi})_2 = \sum_{i=1}^n \mu + \mu_1 \left( \sum_{i=1}^n (P_{Gi}) \right) + \mu_2 \left( \sum_{i=1}^n (P_{Gi} - (P_{load} + P_{loss}))^2 \right) \quad (7)$$

Here,  $\mu$ ,  $\mu_1$  and  $\mu_2$  are the emission gas and load balance weighting factors.  $n$  is the number of generation units. The optimization problem to minimize fuel cost and emissions can be formulated as in Equation (8) [27].

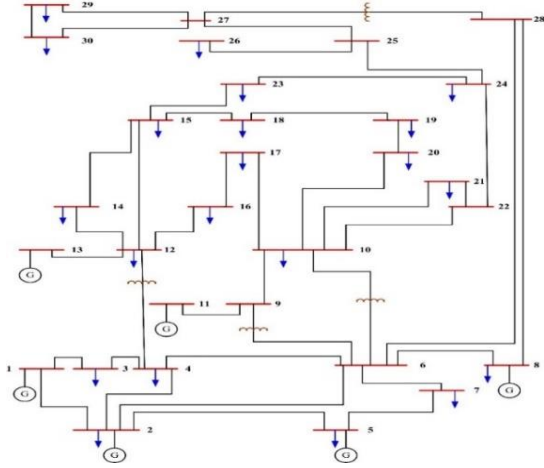
$$\text{Minimize } [F(P_{Gi})_1, F(P_{Gi})_2] \quad (8)$$

In the event that the expected solution cannot be reached in the realization of the economic power distribution objective function, these coefficients are used as determinative penalty coefficients. Each power generation unit is expected to operate within its own generation limits. When this condition is satisfied, the stability of the power system will have been fulfilled as the most important criterion. Equation (9) represents the minimum and maximum power generation range for each generator [26]-[28].

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (9)$$

In addition to these considerations, it is crucial to determine the speed and load limits of generators during extra load acceptance and shedding. Ensuring that the transmitted power on power transmission lines does not exceed the maximum capacity of the transmission lines is valuable for the operational stability of the power system, allowing transmission lines to operate within their limits [29]. power losses on the IEEE 30-bus test system. Figure 1 shows the single-line diagram of the IEEE 30-bus test system used in the study.

This system consists of a total of 30 buses, including 29 connection buses and 1 swing bus. Buses 1, 2, 5, 8, 11, and 13 are generator buses [20], [21]. Additionally, the system has a total of 41 transmission lines, including 37 transmission lines and 4 transformer branches. The system reports a total active load of 283.34 MW and a reactive load of 126.2 MVar [21].



**Figure 1:** IEEE 30-bus system single line diagram.

### 2.3 Metaheuristic Algorithms

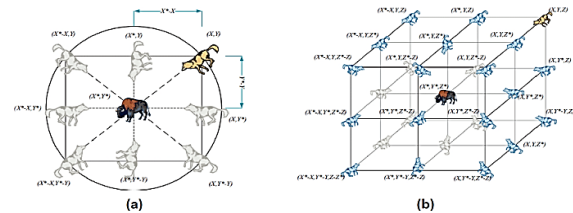
Metaheuristic algorithms are computational methods inspired by intuition and observations in nature. These algorithms are employed to solve complex and multi-dimensional optimization problems. Metaheuristic algorithms based on swarm intelligence are preferred in the restructuring of power systems and the optimization of fuel consumption and emissions in generation units, playing a significant role in solving power flow problems [22]-[27]. Optimization algorithms involved in tasks such as sensitivity analysis, location, and capacity determination, and the restructuring of power systems can produce different results in each run. Although they do not guarantee the best result, they are capable of achieving near-optimal results [28]-[32].

In this study, cost optimization has been conducted on the IEEE 30-bus test system data. During the optimization process, metaheuristic algorithms, specifically Particle Swarm Optimization (PSO) and Grey Wolf Optimization (GWO), were employed to minimize the single-objective function outlined in Equation (7), subject to the constraints specified in Equation (8). Additionally, a simulation and test environment were designed on MATLAB to evaluate the effectiveness of PSO and GWO-based optimization processes developed to reduce the operating costs of power systems.

#### 2.3.1 Grey Wolf Optimization (GWO)

The Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm based on swarm intelligence was initially proposed by Mirjalili and Lewis in 2014 [33]. This algorithm is

designed by drawing inspiration from the social behaviours exhibited by grey wolves during hunting. The interactions among three leader wolves, namely, Alpha, Beta, and Delta, and the rest of the pack are utilized to explore potential solutions in the solution space. Alpha represents the leader type, Beta is the second-ranking leader in the hierarchy, and Delta is the third-ranking leader in the pack, following Alpha and Beta leaders. Omega, consisting of the youngest or newest members at the lowest level of the pack, is responsible for following the other three leader types. The swarm intelligence-based hunting is carried out in four stages: searching for prey after forming the hierarchy, encircling, attacking, and hunting [16],[33]. Figure 2 illustrates the 2D and 3D hunting strategies of a wolf pack.



**Figure 2:** a) 2D, b) 3D hunting strategy of GW [33].

While Alpha and Beta represent the two potential best candidate solutions, Delta produces the third-best solution. The mathematical expressions used for the hunting, approaching the prey, and surrounding stages of Alpha, Beta, and Delta grey wolves are provided in equations (10-20) [33].

$$D = |C \cdot Xp(i) - X(i)| \tag{10}$$

$$X(i + 1) = |Xp(t) - A \cdot D| \tag{11}$$

Here;  $i$  represents the iteration number;  $Xp(i)$  is the current position of the prey;  $A$  and  $C$  are coefficient vectors;  $D$  is the distance to the prey; and  $X$  represents the individual's position. Coefficient vectors  $A$  and  $C$  are calculated as shown in Equations (11) and (12), respectively.

$$A = |2a \cdot r_1 - a| \tag{12}$$

$$C = |2a \cdot r_2| \tag{13}$$

Here; the value of  $a$  is linearly decreased in each iteration between 2 and 0.  $r_1$  and  $r_2$  are random factors generated within the range [0, 1]. While the hunting strategy of wolf packs in 2 and 3-dimensional spaces, as represented in Figure 2, is illustrated, individuals in the search space move on a cube-sphere. The hunting tendencies of individuals are defined as follows [33].

$$D \alpha = |C1.X \alpha - X| \quad (14)$$

$$D \beta = |C2.X \beta - X| \quad (15)$$

$$D \delta = |C3.X \delta - X| \quad (16)$$

$$X1 = |X \alpha - A1.D \alpha| \quad (17)$$

$$X2 = |X \beta - A2.D \beta| \quad (18)$$

$$X3 = |X \delta - A3.D \delta| \quad (19)$$

$$X_{(t+1)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (20)$$

According to the equations, the position information of the prey, which has three valid and valuable solutions obtained by the three leading individuals, is updated by combining the information brought by other herd members. As the value of the hunting agent a decrease, the position of the next iteration, approaching the prey, is determined in a better location than its previous position. The adapted flowchart of the grey wolf algorithm for power system optimization is shown in Figure 3.

### 2.3.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) is another metaheuristic-based swarm intelligence optimization technique used in this study. This algorithm was first introduced by Kennedy and Eberhart in 1995 [34]. PSO is a mathematically modelled optimization algorithm inspired by the foraging behavior of living swarms such as fish and birds. In this mathematical model, each particle seeks the best solution for a function. While each particle has its own unique individual position, among the positions obtained by each individual in the swarm, the best position is defined as the global best position [10]. Each position is associated with a velocity vector. While the individual best position is denoted as  $P_{best}$  and the global best position in the swarm is denoted as  $G_{best}$  in this diagram, the velocity vectors forming the positions are given by the equations for the inertia and weight coefficients Equations (21-23) [34],[35].

$$w = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \right) \quad (21)$$

$$v_{i,j(t+1)} = w v_{i,j(t)} + c_1 r_{1,j(t)} (P_{best_{i,j(t)}} - x_{i,j(t)}) + c_2 r_{2,j(t)} (G_{best(t)} - x_{i,j(t)}) \quad (22)$$

$$x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)} \quad (23)$$

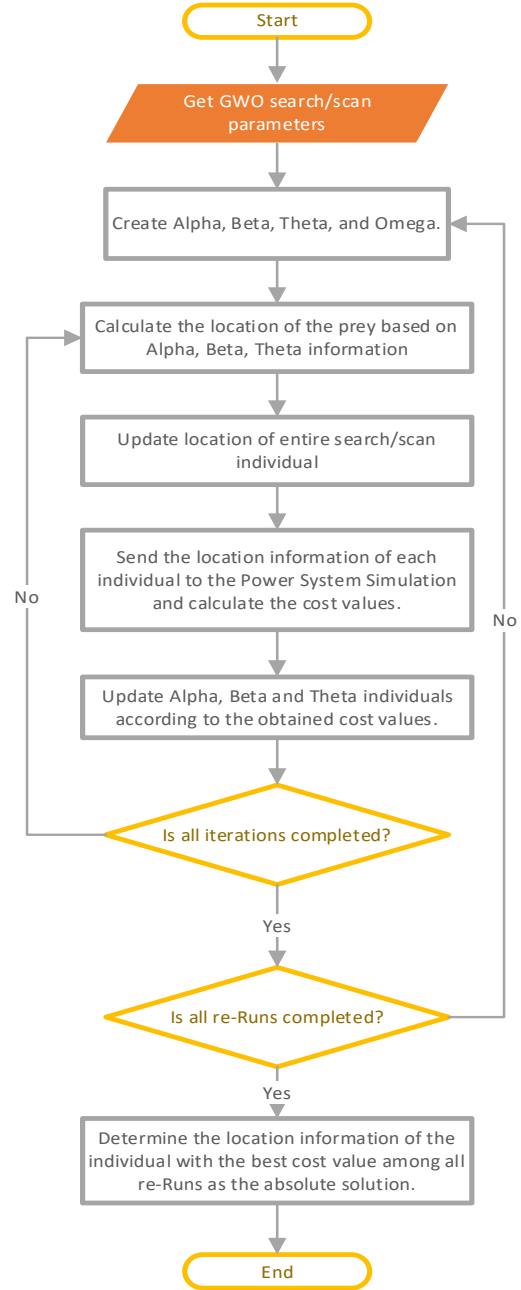


Figure 3: GWO flowchart.

Here;  $w$  is the inertia weight of the particle,  $v_{i,j(t+1)}$  is the particle's next velocity,  $x_{i(t+1)}$  is the particle's position,  $c_1$  and  $c_2$  are coefficients for approaching local and global best positions, and  $r_1$  and  $r_2$  are randomly generated factors for approaching values in the range [0-1]. The flowchart adapted for power system optimization using the PSO algorithm is shown in Figure 4.

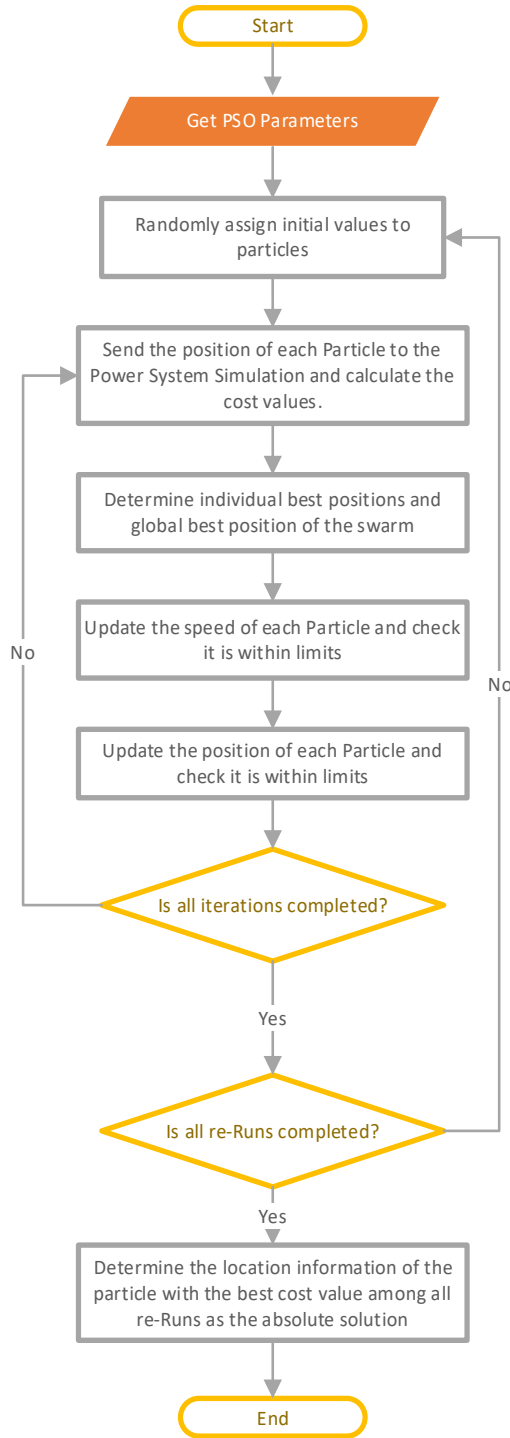


Figure 4: PSO flowchart.

### 3. OPTIMIZATION RESULTS

In the study with a defined single-objective function, simulations were performed using MATLAB R2020a software on a system with an Intel Core i5-3470 CPU, 3.20 GHz processor, and 6 GB RAM to conduct various tests for the optimization process. In all simulation and optimization processes, voltage limits at load buses

were constrained to the range of 0.95-1.05pu. After determining suitable parameter values and population sizes for the GWO and PSO algorithms, each algorithm was run thirty times for 100 iterations with the selected parameters, and the obtained results were evaluated. In this study, significant differences were observed in the results when the population and the number of re-runs for the PSO and GWO algorithms were selected at three different values (20, 30, and 50). Therefore, the optimization results obtained for these values are presented in the study. Table 1 contains the parameters and their specified values for the optimization algorithms.

Table 1: Parameter values of algorithms.

GWO		PSO	
Iteration	100	Iteration	100
a	2	C1	2
a0	2	C2	2
		W <sub>max</sub>	0.9
		W <sub>min</sub>	0.4
Population	20/30/50	Population	20/30/50
re-runs	20/30/50	re-runs	20/30/50

With the values specified in Table 1, the algorithms were individually run thirty times, and the average of the obtained results was calculated. In the initial study, the population size and the number of re-runs were set to 20 for both algorithms, and optimization was performed. The values obtained for the first case are presented in Table 2.

Table 2: Optimization results for the first case.

	GWO	PSO
Min (\$/h)	808.207	805.843
Max (\$/h)	1069.800	1191.000
Average (\$/h)	993.444	990.103
Standard Deviation	18.011	55.999
Avg. Duration (Sec.)	27.659	27.850

According to these results, the PSO algorithm, producing a minimum hourly generation cost of \$805.843, an average value of \$990.103, and a standard deviation of 55.999, performed better than the GWO algorithm. However, it is observed that the standard deviation of the GWO algorithm is lower, meaning that its results are closer to each other. The average CPU usage times for the algorithms are quite close to each other, approximately 27 seconds.

As a result of the parameters obtained through the optimization of the two algorithms, a system simulation was conducted on the system whose block diagram is given in Figure 1. The power values generated, consumed, and lost in the system were obtained. The results are shown in Table 3. As seen in Table 3, the total power generated by the generators is 294.484 MW with the parameters obtained by PSO and 294.442 MW with the parameters obtained by GWO. When examining power losses, it is observed that the values obtained with GWO, with a loss value of 11.102 MW, stand out.

**Table 3:** Generator active power generation, consumption and loss values for the first case.

Bus	GWO P <sub>G</sub> (MW)	PSO P <sub>G</sub> (MW)
1	166.517	177.836
2	46.488	47.665
5	27.313	21.313
8	21.440	23.600
11	13.755	10.001
13	18.929	14.069
Total Power Generation	294.442	294.484
Total Power Consumption	283.340	283.340
Total Power Loss	11.102	11.144

In the second study, the population size and re-runs number for both algorithms were set to 30, and the optimization was repeated. Table 4 presents the performance values obtained after the optimization. Upon examination of this table, it is observed that, for PSO, the minimum hourly generation cost remains the same at \$800.954, but the average value decreases to \$968.141 compared to the initial condition. The standard deviation value is obtained as 6.470, depending on the increase in iterations. The average CPU usage time is determined to be 40.773 seconds. With this optimization, it is concluded that the PSO algorithm produces better results than GWO in terms of all values.

**Table 4:** Optimization results for the second case.

	GWO	PSO
Min (\$/h)	804.537	800.954
Max (\$/h)	1025.000	992.255
Average (\$/h)	985.987	968.141
Standard Deviation	14.159	6.470
Avg. Duration (Sec.)	42.204	40.773

The system's operation with the parameters yielding the best objective function values obtained through optimizations and the resulting values for generation, consumption, and loss of power are presented in Table 5. In Table 5, the total power generated by generators with the parameter values obtained with PSO is 292.941 MW, while with the parameter values obtained with GWO, it is 293.225 MW. When losses are examined, it is observed that the PSO algorithm stands out with a loss value of 9.601 MW. When the first and second cases results are compared, it is observed that the increase in the population size and the number of runs does not reduce the operating cost and power loss values after 30 iterations.

**Table 5:** Generator active power generation, consumption and loss values for the second case.

Bus	GWO P <sub>G</sub> (MW)	PSO P <sub>G</sub> (MW)
1	171.670	177.605
2	48.745	48.929
5	21.354	22.158
8	20.764	21.663
11	16.815	10.439
13	13.877	12.147
Total Power Generation	293.225	292.941
Total Power Consumption	283.340	283.340
Total Power Loss	9.885	9.601

In the third study, the population size and iteration number were set to 50 for both algorithms, and the optimization and simulation processes were repeated. When Table 6 is examined, it is observed that the minimum hourly generation cost for PSO has decreased to \$800.472, but the average value has decreased to \$805.165 compared to the first two cases. It is noted that the standard deviation value has decreased slightly due to the increase in the number of individuals in the swarm and the number of iterations. Also, due to the increase in the swarm size and the number of iterations, the algorithm's computation times are increased. As seen in Table 6, in terms of computation times, the average CPU usage time of the GWO algorithm increases less compared to PSO, with 49.113 seconds. According to the performance criteria, it is observed that the results of PSO are better than GWO.

**Table 6:** Optimization results for the third case.

	GWO	PSO
Min (\$/h)	803.340	800.472
Max (\$/h)	853.105	825.441
Average (\$/h)	820.082	805.165
Standard Deviation	11.729	5.243
Avg. Duration (Sec.)	49.113	79.024

For the third case, the generation, consumption, and loss power values obtained from running the system with the parameters obtained by optimization algorithms are presented in Table 7. In Table 7, when the parameters obtained by PSO are used, the total power generated by the generators is 292.344 MW, while when the parameters obtained by GWO are used, it is 292.471 MW. When losses are examined, it is observed that the PSO results are better with a loss value of 9.004 MW. Compared to the previous two conditions, it is evaluated that the increase in population size and the number of runs does not much reduce the operating cost and power loss values after 50 iterations.

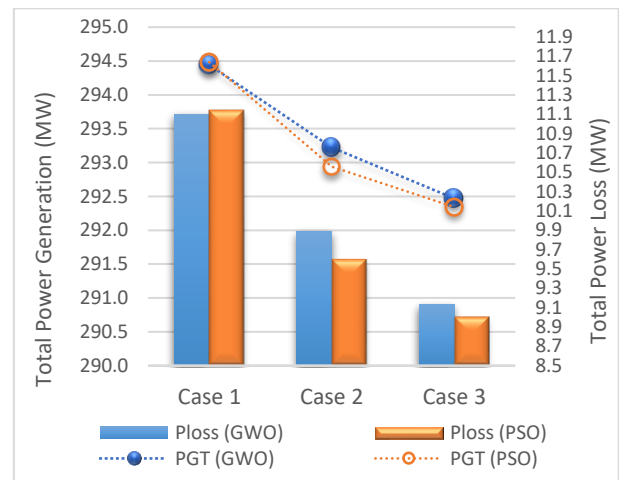
**Table 7:** Generator active power generation, consumption and loss values for the third case.

Bus	GWO	PSO
	P <sub>G</sub> (MW)	P <sub>G</sub> (MW)
1	167.975	178.193
2	52.104	48.496
5	22.203	21.976
8	19.846	21.645
11	16.565	10.007
13	13.778	12.027
Total Power Generation	292.471	292.344
Total Power Consumption	283.340	283.340
Total Power Loss	9.131	9.004

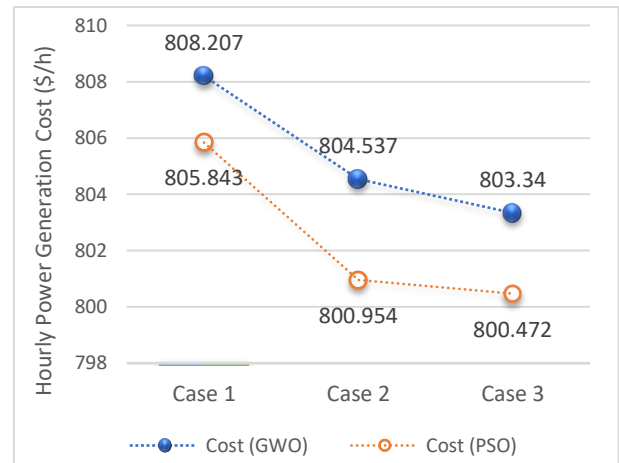
#### 4. DISCUSSION

In the study, the total power generation and total power loss values obtained from three different optimizations are comparatively shown in Figure 5 for GWO and PSO algorithms. Since the total consumption in the system did not change, this value is not included in this graph. In Figure 6, the average hourly power generation costs obtained according to the results of the three cases and two optimization algorithms studied with different parameters in the study are presented comparatively.

The graph in Figure 6 shows both the efficiency of PSO and GWO algorithms in minimizing overall operating costs and the effectiveness of these metaheuristic algorithms in addressing the complex and dynamic nature of power systems. These visual reveals that the PSO algorithm gives better results than the GWO algorithm in all three cases in the study for optimizing the hourly power generation cost. According to these optimization results, the most cost-effective value of 800.47 \$/h was reached in the simulation tests performed for the third case, where 50 population and re-Runs values of the PSO algorithm were used.



**Figure 5:** Total power generation and power loss.



**Figure 6:** Hourly power generation cost.

Previous studies have investigated similar approaches using evolutionary and metaheuristic algorithms on the IEEE 30-bus test system, with their findings compared to the results of the present study in Table 8. The table evaluates the total power loss and generation cost resulting from running these algorithms on the IEEE 30-bus test system.

**Table 8:** Literature comparison.

$P_G$ (MW) \ Buses	Algorithms Used in Previous Studies in the Literature				Proposed Algorithm	
	PS	GA-PS	EP-OPF	ABC	GWO	PSO
	[36]	[36]	[37]	[38]		
1	175.727	175.663	173.826	176.263	167.975	178.193
2	48.681	48.641	49.998	48.383	52.104	48.496
5	21.428	21.422	21.386	20.871	22.203	21.976
8	22.831	22.622	22.630	22.713	19.846	21.645
11	12.067	12.381	12.928	12.453	16.565	10.007
13	12.000	12.000	12.000	12.000	13.778	12.027
Total $P_{Loss}$ (MW)	9.335	9.329	9.368	9.283	9.131	<b>9.004</b>
Generation Cost (\$/h)	802.015	802.014	802.556	801.721	803.340	<b>800.472</b>

One such study employing pattern search and genetic algorithms [36] concluded that these algorithms exhibited superior overall convergence performance, demonstrating competitiveness. In another study [37], it was demonstrated that the total generator fuel cost achieved through an evolutionary algorithm for economic power dispatch on the IEEE 30-bus test system was lower compared to costs incurred by evolutionary programming, tabu search, hybrid tabu search, simulated annealing, and enhanced tabu search, thus yielding significant savings in generator fuel costs. Furthermore, a study [38] utilizing the metaheuristic artificial bee colony optimization algorithm reported a minimum power loss value of 9.283 MW and an hourly generation cost of \$801.721.

In Case 3 of this study, where the population number and the number of runs of the PSO algorithm are set to 50, it is observed that the application of the PSO algorithm yields promising results. With a minimum power loss value of 9.004 MW and a generation cost of \$800.472/hour, the PSO algorithm demonstrates practicality and approaches the global optimum solution efficiently, exhibiting high convergence performance. The positive outcomes highlight PSO's capability to compete effectively with other algorithms [36]-[38], underscoring its robust search ability.

## 5. CONCLUSION

In this research, swarm intelligence-based PSO and GWO algorithms were applied to the optimization problem using the cost-oriented objective function for sustainable economy on the IEEE 30-bus test system. In this study, which aims to reduce the total

power loss and system operating cost, the effects of algorithm parameters such as population and number of runs on the objective function and power loss results were examined through tests carried out in a simulation environment. Significant differences in the results were observed when the population and number of reruns were selected at values of 20, 30 and 50 for the PSO and GWO algorithms, respectively. As the population and number of runs increased, there was no significant change in the minimum values of the objective function, while a decrease was observed in the mean and standard deviation values. On the other hand, it was observed that there was an increase in total power loss values and average CPU usage times. In conclusion, the findings of the study show that swarm intelligence algorithms can be used effectively in power system optimization and that various parameter choices can have a significant impact on the results.

In this research, PSO and GWO algorithms were successfully applied to cost-oriented optimization problems and effective results were obtained in power systems. In the simulation tests conducted for the third case, where the PSO algorithm used 50 population and rerun values, it was determined that it reached the most appropriate operating cost value of 800.47 \$/Hour. It is evaluated that in the future, studies focusing on multiple targets using different objective functions may help to improve power systems more comprehensively. Thus, processes that take an approach that includes reliability, sustainability and other elements as well as operational costs can emerge. Additionally, examining new parameter selections or improved variations to increase algorithm performance can be among the studies that can contribute to the field. Although the IEEE 30 bus test system serves as a standard benchmark, future research involving distributed generation systems may extend the analysis to suit larger, more complex power systems. It has been evaluated that such studies have a significant potential in increasing the efficiency of power systems and minimizing operating costs.

**Author Contributions:** In this study, Serkan İşcan contributed to idea generation, literature review, procurement of resources and materials, data collection, analysis execution, evaluation of results, writing, and review. Gürcan Lokman contributed to



idea generation, literature review, design conceptualization, creation of visuals, simulation development, analysis execution, evaluation of results, writing, and editing.

**Conflict of Interest:** There are no conflicts of interest with any individual or institution in the prepared article.

## 6. REFERENCES

- [1] S. İscan, O. Kaplan, G. Lokman, "Power loss and voltage stability optimization with meta-heuristic algorithms in power system," PAJES, vol. 27, no. 2, pp. 199-209, 2021.
- [2] E. Mahboubi-Moghaddam, M. R. Narimani, M. H. Khooban, A. Azizivahed, M. Javid sharifi, "Multi-Objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations," IJEPES, vol. 76, pp. 35-43, Mar. 2016.
- [3] T. Sen, H. D. Mathur, "A new approach to solve Economic Dispatch problem using a Hybrid ACO-ABC-HS optimization algorithm," IJEPES, vol. 78, pp. 735-744, Jun. 2016.
- [4] H. A. Garnejani, S. Hossainpour, "Single and multi-objective optimization of a TEG system for optimum power, cost and second law efficiency using genetic algorithm," Energy Convers. Manag., vol. 228, p. 113658, Jan. 2021.
- [5] X. He, Y. Rao, J. Huang, "A novel algorithm for economic load dispatch of power systems," Neurocomputing, vol. 171, pp. 1454-1461, Jan. 2016.
- [6] F. Tariq, S. Alelyani, G. Abbas, A. Qahmash, M. R. Hussain, "Solving renewables-integrated economic load dispatch problem by variant of metaheuristic bat-inspired algorithm," Energies, vol. 13, no. 23, p. 6225, Nov. 2020.
- [7] A. Srivastava, D. K. Das, "An adaptive chaotic class toppler optimization technique to solve economic load dispatch and emission economic dispatch problem in power system," Soft Comput., vol. 26, pp. 2913-2934, Jan. 2022.
- [8] A. Srivastava, S. Singh, "Implementation of ant colony optimization and particle swarm optimization in economic load dispatch problem using renewable source," IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), New Delhi, India, Dec. 2020, pp. 1-6.
- [9] C. Chen, L. Qu, M.-L. Tseng, L. Li, C.-C. Chen, M. K. Lim, "Reducing fuel cost and enhancing the resource utilization rate in energy economic load dispatch problem," J. Clean. Prod., vol. 364, p. 132709, Sep. 2022.
- [10] J. N. Kuk, R. A. Gonçalves, L. M. Pavelski, S. M. G. S. Venske, C. P. de Almeida, A. T. R. Pozo, "An empirical analysis of constraint handling on evolutionary multi-objective algorithms for the environmental/economic load dispatch problem," Expert Syst. Appl., vol. 165, p. 113774, Mar. 2021.
- [11] J. Yu, C.-H. Kim, S.-B. Rhee, "Clustering cuckoo search optimization for economic load dispatch problem," Neural Comput. Appl., vol. 32, pp. 16951-16969, Jun. 2020.
- [12] R. P. Parouha, P. Verma, "An innovative hybrid algorithm to solve nonconvex economic load dispatch problem with or without valve point effects," Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 31, no. 1, p. e12682, 2021.
- [13] R. Al-Nahal, A. F. Naiem, Y. G. Hegazy, "Economic load dispatch problem using particle swarm optimization technique considering wind power penetration," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Porto, Portugal, Sep. 2019, pp. 1-6.
- [14] S. Lalwani, H. Sharma, S. C. Satapathy, K. Deep, J. C. Bansal, "A survey on parallel particle swarm optimization algorithms," Arab. J. Sci. Eng., vol. 44, pp. 2899-2923, 2019.
- [15] O. Ceylan, A. Ozdemir, H. Dag, "Heuristic methods for postoutage voltage magnitude calculations," Turk J Elec Eng & Comp Sci, vol. 24, pp. 105-120, 2016.
- [16] M. H. Nadimi-Shahraki, S. Taghian, S. Mirjalili, "An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems," Expert Syst. Appl., vol. 166, p. 113917, Mar. 2021.
- [17] M. B. Atsever, M. H. Hocaoglu, "Comprehensive performance analysis of greywolf optimizer for overcurrent relay coordination", Turkish Journal of Engineering Research and Education., vol.1, no.2, 52-61, Nov. 2022.
- [18] Q. Li, X. Li, Z. Guo, H. Du, "An improved whale optimization algorithm and its application on ELD," 10th Frontier Academic

- Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022), Singapore, 2022, pp. 1287–1295.
- [19] L. dos Santos Coelho, V. C. Mariani, "Particle swarm approach based on quantum mechanics and harmonic oscillator potential well for economic load dispatch with valve-point effects," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 11, pp. 3080–3085, Nov. 2008.
- [20] S. K. Elsayed, S. Kamel, A. Selim, M. Ahmed, "An improved heap-based optimizer for optimal reactive power dispatch", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58319-58336, Apr. 2021.
- [21] Power system test case archive, labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg\_tca14bus.htm, Last access 04.12.2023.
- [22] D. C. Walters, G. B. Sheble, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," *IEEE T Power Syst*, vol. 8, no. 3, pp. 1325-1332, Aug. 1993.
- [23] D. P. Kothari, J. S. Dhillon, "Power System Optimization," 2nd ed., PHI, Delhi, 2013.
- [24] L. C. A. Ferreira, A. C. Z. de Souza, S. Granville, J. W. M. Lima, "Interior point method applied to voltage collapse problems and losses reduction," *IEE Gener Transm Dis*, vol. 149, no. 2, pp. 165-170, Mar. 2002.
- [25] D. Aydin, S. Ozyon, C. Yasar, T. Liao, "Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem," *IJEPES*, vol. 54, pp. 144–153, Jan. 2014.
- [26] M. Basu, "Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 2, pp. 2845–2853, Mar. 2011.
- [27] N. I. Nwulu, X. Xia, "Multi-objective dynamic economic emission dispatch of electric power generation integrated with game theory based demand response programs," *Energy Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 963-974, Jan. 2015.
- [28] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGrawHill, New York, 1994.
- [29] J. d. A. B. Júnior, M. V. A. Nunes, M. H. R. Nascimento, J. L. M. Rodrigues, J. C. Leite "Solution to economic emission load dispatch by simulated annealing: case study," *Electr Eng*, vol. 100, pp. 749–761, 2018.
- [30] C. W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, New York, 1994.
- [31] P. Kundur, "A survey of utility experience with power plant response during partial load rejections and system disturbances", *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. PAS-100, no. 5, pp. 2471-2475, May 1981.
- [32] S. Ganguly, "Multi-Objective planning for reactive power compensation of radial distribution networks with unified power quality conditioner allocation using particle swarm optimization", *IEEE T Power Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1801-1810, Jan. 2014.
- [33] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46-61, Mar. 2014.
- [34] R. Eberhart, J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, Oct. 1995, pp. 39-43.
- [35] J. Kennedy, R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," *ICNN'95*, Perth, WA, Australia, Nov. 1995, pp. 1942-1948.
- [36] Y. Labbi, D. Attous, "A hybrid GA-PS method to solve the economic load dispatch problem," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 15, no.1, 61-68, 2010.
- [37] W. Ongsakul, T. Tantimaporn, "Optimal powers flow by improved evolutionary programming," *Electr Pow Compo Syst*, vol. 34, no. 1, pp. 79-95, Jan. 2006.
- [38] G. P. Dixit, H. M. Dubey, M. Pandit, B. K. Panigrahi, "Economic load dispatch using artificial bee colony optimization," *International Journal of Advances in electronics Engineering*, vol.1, no. 1, pp. 119-124, 2011.

RESEARCH ARTICLE

## Three-Phase Pole-Changing Winding with Ratio of Poles 4:6

Makhsud Bobojanov<sup>1</sup>, Dauletbek Rismukhamedov<sup>1</sup>, Furkat Tuychiev<sup>1</sup> and Khusniddin Shamsutdinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

Received/Geliş: 26.12.2023

Accepted/Kabul: 15.04.2024

\*Corresponding Author: Makhsud Bobojanov, e-mail adress: [mbobojanov@yahoo.com](mailto:mbobojanov@yahoo.com)

**ABSTRACT:** The development and analysis of a new pole-changing winding with pole ratio  $2p_1/2p_2=4/6$ , as well as the experimental research of a two-speed induction motor with this winding, involved the use of modernized methods such as Discretely Specified Spatial Function (DSSF). These methods have been used to develop pole-changing winding designs for two-speed induction motors with improved electromagnetic properties, closely resembling conventional windings. The new pole-changing winding could be a viable alternative to conventional two-layer windings, as it offers similar electromagnetic properties. Furthermore, the new pole-changing winding was analyzed using ANSYS/Maxwell and tested on an induction motor built on the base of a 1,5 kW/1500 rpm induction motor in frame 4A80U3, developing 1,1 kW/0,7 kW rated power for  $2p_1/2p_2=4/6$  poles, respectively. Overall, this research demonstrates the potential for developing advanced pole-changing windings with improved electromagnetic properties and their application in practical induction motors.

**Keywords:** Induction motor, pole-changing winding, discretely specified spatial function, winding factor.

### 1. INTRODUCTION

More than 35% of the world's electricity is consumed by pumps, fans, and compressors. The International Energy Agency predicts that this consumption will double by 2040 [1]. The poles of induction motors can be changed using two primary techniques that are widely used. If one is to create a pair of independent windings on the stator (the first method involves this process), each winding can be perfectly matched to its speed.

However, with one winding running at a time, the dimensions of such induction motors are much larger than corresponding single-speed induction motors [2]. The second method is based on changing the connection of the winding parts. Although the entire winding operates at both speeds simultaneously, they have some disadvantages: additional wires are required, and the magnetic field in the gap is always significantly distorted as the speed changes [3].

The problem of designing pole-changing windings has been studied by many scientists from all over the world, and as a result of these studies, a large number of winding circuits with different pole and phase ratios have been developed [4, 5].

Two-speed induction motors with a  $p_1/p_2=1/2$  pole pair ratio often utilize a pole-changing winding based on the Dahlander circuit and the Pole Amplitude Modulation (PAM) method to achieve the desired speed variation [6,7]. Two-speed induction motors with a pole ratio of  $p_1/p_2=2/3$  and  $p_1/p_2=3/4$  have a winding with pole changing using the Phase Modulated (PM) winding [8, 9, 10]. Some disadvantages of pole-changing windings include: inconsistent energy characteristics at different rotation speeds, leading to inefficient energy conversion; degraded electromagnetic properties, resulting in reduced performance and efficiency; complex production technology required to create windings with different numbers of turns and pitches, leading to increased manufacturing costs and production time [11].

Pole-changing windings, designed using these principles, result in one field having a magnetomotive force (MMF) that closely resembles a sinusoidal curve. However, for another field, there are higher harmonics present in the MMF curve. This is due to the departure of the pole-changing winding structure from conventional 2m-zone and m-zone windings [12].

The article discusses a pole-changing winding with pole ratio  $2p_1/2p_2=4/6$ , which is obtained using the modernized method of discretely specified spatial functions. This winding has a minimum number output terminals (6) and does not require additional contacts for switching of poles. The winding manufacturing technology is identical to the technology of conventional two-layer loop windings with the same pitch and number of turns in the coils. An analysis of the electromagnetic properties of the winding was carried out, and based on the calculated data, a prototype of a two-speed motor with a new pole-changing winding was created. The characteristics of a pole-changing motor were measured in static and dynamic modes.

## 2. THE DISCRETELY SPECIFIED SPATIAL FUNCTION METHOD

The modernized DSSF (discretely specified spatial function) method has opened up the possibility of creating pole-changing windings with a structure resembling conventional windings, but with improved electromagnetic properties [13, 14]. This method has led to the development of a new principle for distributing current or phase in two simple transverse windings of conventional design, which are commonly used in practice and exhibit high electromagnetic properties. These windings have differing numbers of pole pairs ( $p_1$  and  $p_2$ ) and phases ( $m_1$  and  $m_2$ ), and they are utilized simultaneously in the winding development process. As a result, the winding circuit is not pre-determined, but rather formed during the design process, taking into account the distribution patterns of phase currents in the motor's slots for each pole [15].

The DSSF method was introduced to simplify the process of designing a winding circuit by representing current distribution as a discretely specified spatial function. This method allows for a

more efficient and structured approach to designing winding circuits.

The discrete element DSSF, or discretely specified spatial function, is a representation of the state of a conductor within a conventional winding. In side coil of a winding contains an ordinary conductor through which a unit current passes in one direction or the other in a slot belonging to one of the phases of the winding. These conductors are marked with letters such as a, b, and c. For example, states a, b, and c represent conductors with unit currents (or electromotive force (EMF)) of a positive direction in their respective slots (i.e., "from us"), while states -a, -b, and -c correspond to conductors with unit currents (or EMF) of a negative direction in their slots (i.e., "towards us").

The DSSF method, is a technique used in the design of pole changing windings for electric machines. The procedure involves the following steps [16]:

1. Compilation and joint consideration of current distributions (DSSF) corresponding to two poles: This step involves analyzing the current distribution for each pole and considering them together to understand their combined effect.
2. Formation of the final pair of aligned DSSF: The next step is to align and combine the DSSF for both poles to create a final pair that represents the winding design.
3. Selecting the appropriate changing scheme: This involves choosing the suitable scheme for changing the polarity or number of poles in the winding.
4. Obtaining a table of distribution of coils among branches: This step involves creating a table that outlines how coils are distributed among different branches in the winding.
5. Analysis and comparison of options: Different design options and configurations are analyzed and compared to determine the best approach for the specific application.
6. Graphic construction of the switched winding: Finally, a graphical representation of the switched winding design is constructed based on the chosen scheme and distribution of coils.

Based on the fact that the combined windings should occupy the same number of slots, we can write the conditions:

$$q_1 = \frac{2 \cdot m_2 \cdot p_2}{m_1 \cdot p_1} q_2 \tag{5}$$

For m-zone windings,

$$Z_1 = p_1 \cdot m_1 \cdot q_1 = Z_2 = p_2 \cdot m_2 \cdot q_2 \tag{1}$$

where Z1- number of stator slots, p1 and p2- numbers of poles, q1 and q2-numbers of slots per pole and phase. This equation shows that the number of stator slots is determined by the product of the number of poles and the number of slots per pole and phase.

For 2m-zone windings,

$$Z_1 = 2 \cdot p_1 \cdot m_1 \cdot q_1 = Z_2 = 2 \cdot p_2 \cdot m_2 \cdot q_2 \tag{2}$$

For m-zone windings with 2m-zone windings, respectively, with indices "1" and "2"

$$Z_1 = p_1 \cdot m_1 \cdot q_1 = Z_2 = 2 \cdot p_2 \cdot m_2 \cdot q_2 \tag{3}$$

Hence for m- or 2m-zone windings,

$$q_1 = \frac{m_2 \cdot p_2}{m_1 \cdot p_1} q_2 \tag{4}$$

For m-zone and 2m-zone windings

Usually, given pole pairs (p1 and p2) and phases (m1 and m2), the number of slots per pole and phase (q1 and q2) are free, and they must take integer values. This is because the number of slots must be a whole number in order to accommodate the coils and ensure proper functioning of the motor.

### 3. METHODOLOGY DEVELOPMENT OF A POLE - CHANGE WINDING FOR POLE RATIO p1/p2 = 2:3

One of the most common pole ratios is p1/p2=2/3, since two-speed induction motor with this ratio can be used in turbo drives and other applications. As an example, consider the construction of a winding with a variable number of poles in Z=36 stator slots using the DSSF method. As the initial winding, you can take two double-layer stator windings of the m-zone type, placed in Z=36 slots with the number of pole pairs p1=2 and p2=3. The number of slots per pole per phase for these windings will be q1=6 and q2=4. According to the detailed diagram, the DSSF value was obtained for each winding separately (Tables 1, 2).

**Table 1: DSSF winding p1=2 sides**

Stator slots																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-e	-f	-f	-f	-f	-f	-f	-d	-d	-d	-d	-d	-d	-e	-e	-e	-e	-e
d	d	d	d	d	d	e	e	e	e	e	e	f	f	f	f	f	f
Stator slots																	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
-e	-f	-f	-f	-f	-f	-f	-d	-d	-d	-d	-d	-d	-e	-e	-e	-e	-e
d	d	d	d	d	d	e	e	e	e	e	e	f	f	f	f	f	f

**Table 2: DSSF winding p2=3 sides**

Stator slots																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-b	-b	-b	-c	-c	-c	-c	-a	-a	-a	-a	-b	-b	-b	-b	-c	-c	-c
a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c	a	a	a	a	b	b
Stator slots																	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
-c	-a	-a	-a	-a	-b	-b	-b	-b	-c	-c	-c	-c	-a	-a	-a	-a	-b
b	b	c	c	c	c	a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c

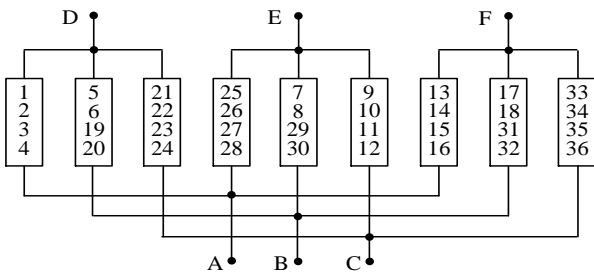
The "YYY/YYY" circuit refers to the arrangement of coils in a three-phase winding, where each coil is connected in a Y configuration. By arranging the bottom row of each winding one below the other

and indicating the phase in the groove of each winding, you can determine which branch or phase a particular coil number belongs to (Table 3).

**Table 3:** Distribution of windings in the stator slots

Stator slots																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	pole
d	d	d	d	d	d	e	e	e	e	e	e	f	f	f	f	f	f	p <sub>1</sub> =2
a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c	a	a	a	a	b	b	p <sub>2</sub> =3
Stator slots																		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	pole
d	d	d	d	d	d	e	e	e	e	e	e	f	f	f	f	f	f	p <sub>1</sub> =2
b	b	c	c	c	c	a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c	p <sub>2</sub> =3

For example, slot №1÷4 with p<sub>1</sub>=2 pole winding corresponds to phase D, and with p<sub>2</sub>=3 - phase A, therefore, belongs to branch A-D. Based on this method, we group the coils (Table 4) into branches of the basic "YYY/YYY" circuit (Fig. 1).



**Figure 1:** Branches of the basic scheme "YYY/YYY"

This type of winding is designed to ensure balanced voltage and current distribution in the machine, which is important for efficient and reliable operation. The symmetrical arrangement helps minimize the presence of harmonics and ensures that the machine operates smoothly with minimal vibration and noise. The phase shift of  $2\pi/3$  radians (or 120 degrees electrical) between the branches of the same phase is a characteristic feature of a balanced three-phase system. This phase shift facilitates the generation of a rotating magnetic field which is essential for the operation of three-phase induction motors.

**Table 4:** Distribution of coils in the branches of the basic circuit "YYY/YYY"

Number of coils	A-D	A-E	A-F	B-D	B-E	B-F	C-D	C-E	C-F
	1,	2,	25, 26,	13, 14,	5,	7,	17, 18,	21, 22,	9, 10,
3,	27, 28,	15, 16,	19, 20,	6,	8,	31, 32,	23, 24,	11, 12,	35, 36,
4				19, 20,	29, 30,				

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

When evaluating the electromagnetic characteristics of pole-changing windings, it is important to analyze the harmonic content of the magnetomotive force (MMF) patterns. This analysis should take into account factors such as winding factors and differential leakage factors from both poles. By considering these factors simultaneously, a more comprehensive understanding of the electromagnetic properties of the windings can be attained.

The winding factors are often expressed for each space harmonic [17].

$$E_{iv} = Ee^{j\gamma v} - Ee^{j\gamma(i+v)} \tag{6}$$

where E - unit EMF amplitude; i - coil number;  $\gamma=360p/Z$  - angle per slot; Z - number of slots; y - coil pitch; v - harmonic number.

The resulting amplitude of the EMF of series-connected n coils:

$$E_{resv} = \sum_{i=1}^n E_{nv_i} \tag{7}$$

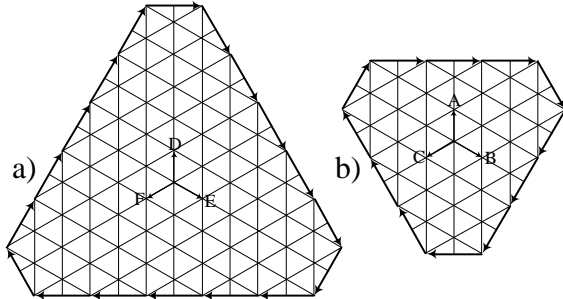
where n - number of coils in a phase or branch.

The winding factor is determined by the expression

$$\xi_v = \frac{E_{resv}}{2n} \tag{8}$$

Winding factors data are given in Table 5.

The differential leakage factor of the new pole-changing winding for the ratio of poles  $2p_1/2p_2=4/6$  in  $Z_1=36$  stator slots from the side  $p_1=2$  poles with a step  $y=7$  (1-8) is equal to  $\sigma_0=5,1\%$ , and from the side  $p_2=3$  poles -  $\sigma_0=4,9\%$  (Fig. 2).

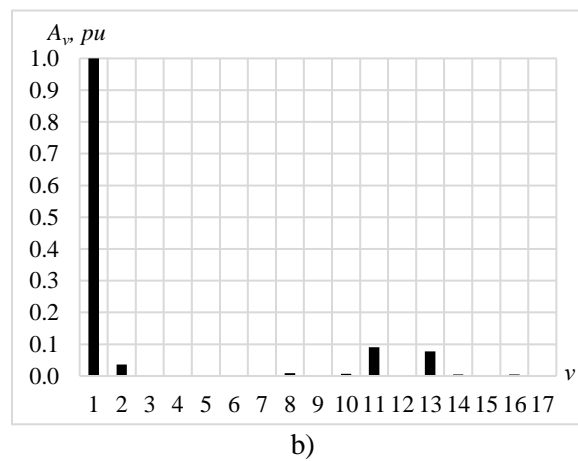
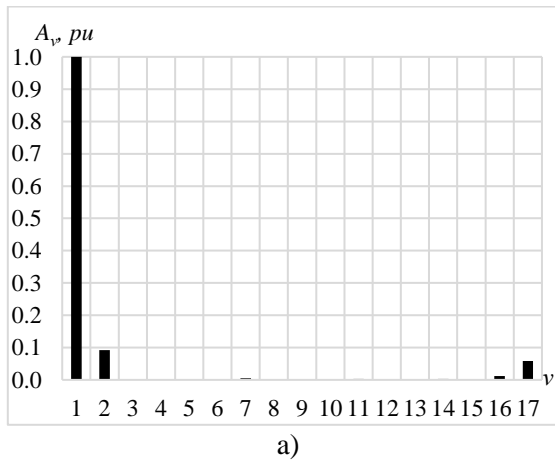


**Figure 2:** Görges polygon pole-changing winding: a) from the side  $p_1=2$ , b) from the side  $p_2=3$ .

In the image of the DSSF of a pole winding with  $2p_1=4$  poles with a winding pitch  $y=7$  (1-8), in addition to the first harmonic, there are the second, fifth, seventh, eighth, eleventh, fourteenth, sixteenth and seventeenth harmonics, their amplitude in relative units is  $A_2=9\%$ ,  $A_5=0,1\%$ ,  $A_7=0,5\%$ ,  $A_8=0,1\%$ ,  $A_{11}=0,3\%$ ,  $A_{14}=0,3\%$ ,  $A_{16}=1,2\%$ ,  $A_{17}=5,9\%$  respectively. A pole winding with  $2p_2=6$  poles with a winding pitch  $y=7$  (1-8), in addition to the first harmonic, contains the second, fifth, seventh, eighth, tenth, eleventh, thirteenth, fourteenth and sixteenth harmonics, their amplitude in relative units is  $A_2=3,6\%$ ,  $A_5=0,1\%$ ,  $A_7=0,1\%$ ,  $A_8=0,9\%$ ,  $A_{10}=0,7\%$ ,  $A_{11}=9,1\%$ ,  $A_{13}=7,7\%$ ,  $A_{14}=0,5\%$ ,  $A_{16}=0,4\%$  respectively.

**Table 5:** Harmonic content of MMF.

Z	2p		Number of harmonic, v																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
36	4	$\xi$	0,87	0,46	0,21	0,13	0,01	0,21	0,21	0,05	0	0,05	0,2	0,21	0,01	0,13	0,21	0,46	0,87
		$A_v$	4,47	0,77	0	0	0,03	0	0,09	0,03	0	0,02	0,06	0	0,01	0,09	0	0,09	0,26
		$A_v, \%$	100	9	0	0	0,1	0	0,5	0,1	0	0	0,3	0	0	0,3	0	1,2	5,9
	6	$\xi$	0,808	0,21	0	0,21	0,05	0	0,05	0,21	0	0,21	0,808	0	0,808	0,21	0	0,21	0,05
		A	3,08	0,41	0	0	0,04	0	0,03	0,10	0	0,08	0,28	0	0,23	0,05	0	0,05	0,01
		$A_v, \%$	100	3,6	0	0	0,1	0	0,1	0,9	0	0,7	9,1	0	7,7	0,5	0	0,4	0



**Figure 3:** Harmonic component of MMF: a) for  $2p_1=4$ , b) for  $2p_2=6$

In the image of the DSSF of a pole winding with  $2p_1=4$  poles with a winding pitch  $y=7$  (1-8), in addition to the first harmonic, there are the second, fifth, seventh, eighth, eleventh, fourteenth, sixteenth and seventeenth harmonics, their amplitude in relative units is  $A_2=9\%$ ,  $A_5=0,1\%$ ,  $A_7=0,5\%$ ,  $A_8=0,1\%$ ,  $A_{11}=0,3\%$ ,  $A_{14}=0,3\%$ ,  $A_{16}=1,2\%$ ,  $A_{17}=5,9\%$  respectively. A pole winding

with  $2p_2=6$  poles with a winding pitch  $y=7$  (1-8), in addition to the first harmonic, contains the second, fifth, seventh, eighth, tenth, eleventh, thirteenth, fourteenth and sixteenth harmonics, their amplitude in relative units is  $A_2=3,6\%$ ,  $A_5=0,1\%$ ,  $A_7=0,1\%$ ,  $A_8=0,9\%$ ,  $A_{10}=0,7\%$ ,  $A_{11}=9,1\%$ ,  $A_{13}=7,7\%$ ,  $A_{14}=0,5\%$ ,  $A_{16}=0,4\%$  respectively.

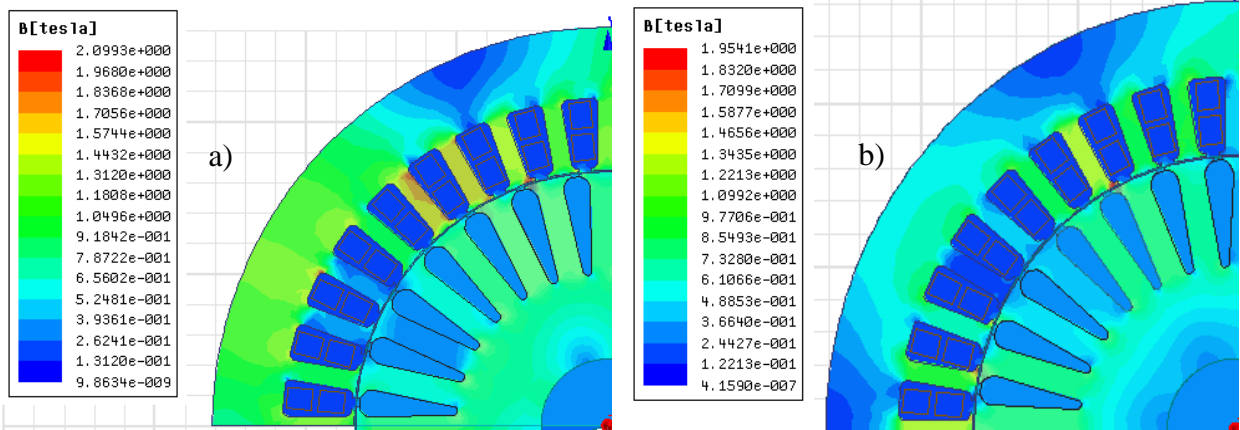


Figure 4: Flux density distribution: a) for  $2p_1=4$ , b) for  $2p_2=6$ .

Based on the calculated data, a prototype of a two-speed induction motor with a winding of a variable number of poles was manufactured based on the magnetic circuit of a serial machine of type 4A80B4U3 with the number of stator slots  $Z_1=36$  and the rotor stator  $Z_2=28$ . The induction motor is made on a magnetic circuit with an outer stator diameter 131 mm, an inner stator diameter 84 mm, a stator package length 98 mm, an air gap 0.25 mm. A two-speed induction motor was modeled and studied using the Ansys/Maxwell software module. The flux density distribution for excitation  $p_1=2$  and  $p_2=3$  is shown in Figures 5 and 6, respectively. The graphs show that in the case of  $p_1=2$ , the maximum flux density occurs in the stator teeth.

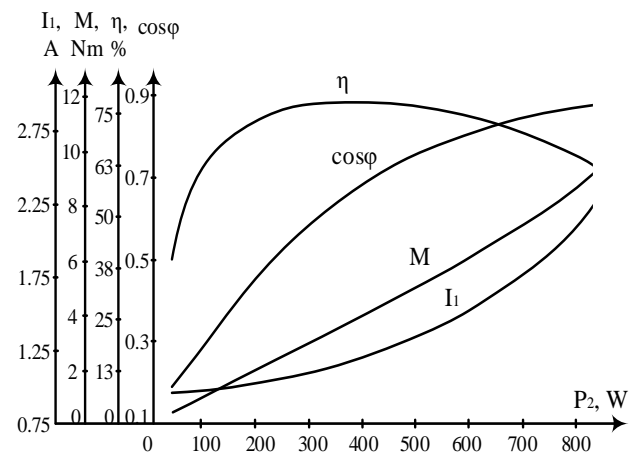


Figure 6: Characteristic curves of an induction motor from  $p_2=3$  side.

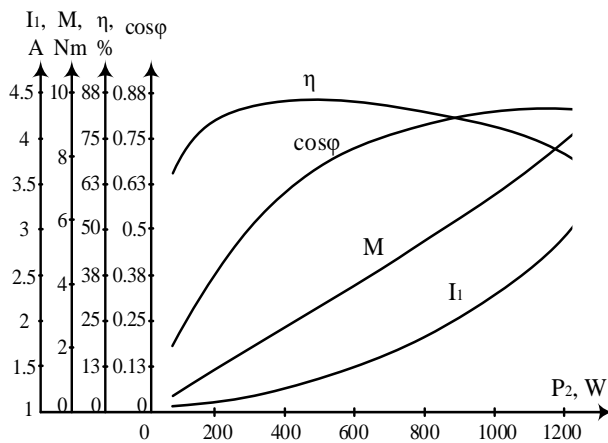


Figure 5: Characteristic curves of an induction motor from  $p_1=2$  side.

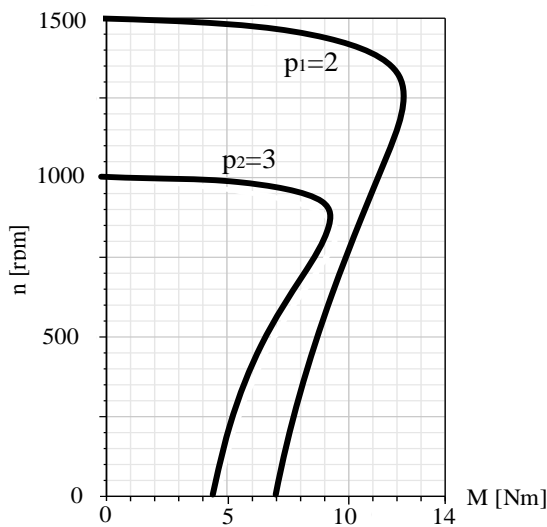
The induction motor can reach a useful active power of 1,1 kW with an efficiency of 75%, a power factor of 0,83, and a stator current of 2,7 A when operated with  $p_1=2$  pairs of poles. When operated with  $p_2=3$  pairs of poles, it can develop an active power of 0,7 kW at an efficiency of 71%, a power factor of 0.87, and a stator current of 1,7 A (Table 6).

Fig. 7. illustrates the torque-speed properties of a two-speed induction motor featuring a pole-changing winding 4A80B4/6U3. The graph depicts smooth mechanical characteristics, with a starting torque of 7.1 Nm from the 4 pole side ( $p_1=2$ ) and 4.6 Nm from the 6 pole side ( $p_2=3$ ). Furthermore, the maximum starting torque is recorded at 12.5 Nm for the  $2p_1=4$  pole side and 9.5 Nm for the  $2p_2=6$  pole side.



**Table 6:** Experimental data of the new two-speed induction motor

№	$P_2$	$I_1$	$\cos\varphi$	$\eta$	$M$	$P_2$	$I_1$	$\cos\varphi$	$\eta$	$M$
	W	A		%	Nm	W	A		%	Nm
	for $p_1=2$					for $p_2=3$				
1	200	1,1	0,34	79	1,3	100	0,9	0,26	59	0,9
2	400	1,2	0,57	84	2,5	200	1	0,42	72	1,9
3	600	1,5	0,71	84	2,9	300	1,1	0,55	77	2,9
4	700	1,7	0,75	83	4,6	400	1,2	0,66	78	3,9
5	800	1,9	0,78	82	5,3	500	1,3	0,74	76	5
6	900	2,1	0,81	80	6	600	1,4	0,8	74	6,1
7	1000	2,3	0,82	78	6,7	700	1,7	0,84	71	7,2
8	1100	2,7	0,83	75	7,7	800	2,1	0,87	65	8,5
9	1200	3,1	0,83	71	8,3	900	2,9	0,88	52	10,3



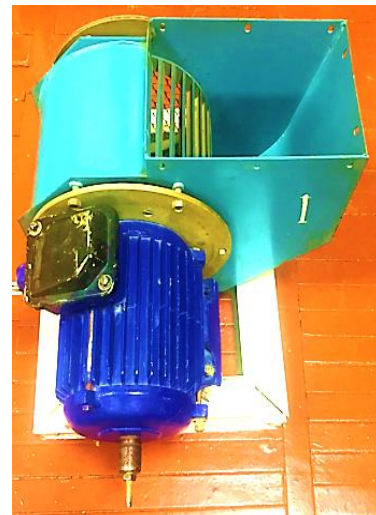
**Figure 7:** Torque-speed characteristics of a two-speed induction motor

The study involved the detailed analysis of the operation of a new electric drive system featuring a two-speed induction motor with a pole ratio of  $p_1/p_2=2/3$ . The research focused on dynamic modes and was conducted on a fan drive of the VSUN 160x74-0.55-4 type. (Fig. 8). The investigation of the new pole-changing induction motor included an analysis of its dynamic modes of operation, such as

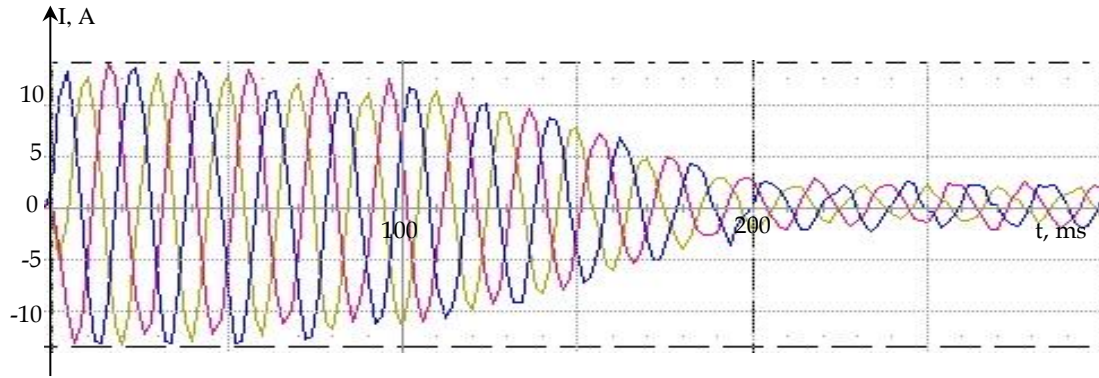
startup, steady-state operation and transient response [18].

In Fig. 9, the curve indicates that the induction motor takes 200 ms to reach a steady state of operation when starting from the  $p_1=2$  pole side, with a starting current reaching 13,53 A.

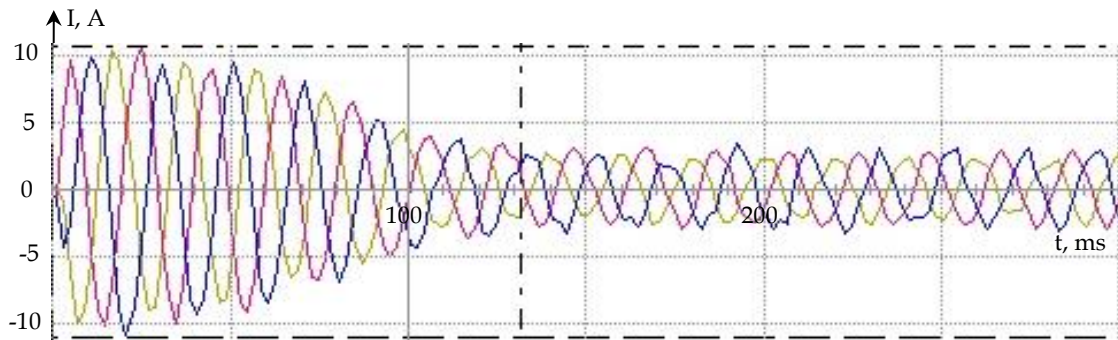
In Fig. 10, when starting from the  $p_2=3$  pole side, the induction motor reaches steady-state operation after 120 ms, with a starting current of 10,87 A.



**Figure 8:** New two-speed induction motor driving the fan.



**Figure 9:** Curves of stator currents changes from the side  $p_1=2$ .



**Figure 10:** Curves of stator currents changes from the side  $p_2=3$ .

The figures (Fig. 9 and Fig. 10) illustrate the curves of stator current versus time for both scenarios, providing visual representations of the induction motor's performance during startup.

It appears that the tests conducted on operating installations in industrial conditions have shown that electric drives of fans based on a two-speed induction motor with a pole-changeable winding meet all the fundamental requirements for fan electric drives. This suggests that the induction motor's performance and characteristics align with the necessary criteria for effectively driving fans in industrial settings [19, 20].

## 5. CONCLUSIONS

The analysis of the new pole-changing winding using ANSYS/Maxwell software has revealed that its electromagnetic properties closely resemble those of conventional two-layer windings. The winding was tested on a 1,5 kW/1500 rpm induction motor in frame 4A80B4U3, where the height of the axis is 80 mm, producing 1,1 kW/0,7 kW rated power for  $2p_1/2p_2=4/6$  poles, respectively.

The results indicate that the new pole-changing winding demonstrates balanced air gap flux density

at both speeds, leading to almost constant torque. As a result, it can be used in various general applications where speed regulation is required to optimize energy and resource usage due to changes in load on the shaft based on seasonal and time-of-day variations.

Furthermore, the new two-speed induction motor is suitable for use in drives for turbo mechanisms and other installations that demand speed regulation to achieve energy and resource savings. Overall, the findings suggest that the new pole-changing winding offers promising potential for enhancing induction motor performance and efficiency in diverse operational scenarios.

**Author Contributions:** Makhsud Bobojanov, Coordinating the work of the scientific group and the group of authors during research work, the results of which are presented in this article; Dauletбек Rismukhamedov, developing a pole change winding scheme for a pole pair ratio of 2/3 with a number of stator slots of 36; Furkat Tuychiev, analysis of the properties of the new winding by Fourier series expansion, using of Goerges diagrams, and also the Ansys Maxwell program; Doctor Khusniddin Shamsutdinov -

Preparation of the text of the article and translation into English.

**Acknowledgement:** The group of authors of the article expresses its gratitude to the staff of the Department of Electric Power Supply and the rector of the Tashkent State Technical University for the support provided during scientific research, as well as to the Organizing Committee of the Congress for their help and support.

**Conflicts of Interest:** The authors state that they have no conflicts of interest.

## 6. REFERENCES

- [1] M. van Werkhoven, C. U. Brunner, "Policy Guidelines for Motor Driven Units," 4E Electric Motor Systems Annex (EMSA), Part 2, 2018, [https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2020/12/PGMdu\\_Final\\_250418](https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2020/12/PGMdu_Final_250418).
- [2] N. I. Bogatyrev, A. S. Kreymer, V. N. Vanurin, K. A. Dganibekov, "Modulated stator windings of the motor for fan drives," Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University, vol. 118, no. 4, pp. 1441-1458, 2016.
- [3] M. Bobojanov, D. Rismuxamedov, F. Tuychiev, Kh. Shamsutdinov, Kh. Magdiev, "Pole-changing motor for lift installation," E3S Web of Conference, Kazan, Russia, 2020, vol. 216, pp.1-5.
- [4] H. Auinger, "Polumschaltbare dreiphasenwicklung mit 6 klemmen ubersicht zum stand der technik," *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins*, vol. 69, no. 17, pp. 926-932, 1978.
- [5] J. H. H. Alwash, K. S. Ismail, J. F. Eastham, "A novel 16/6 phase modulated winding," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, no. 2, pp. 188-190, Jun. 2000.
- [6] C. Kovacs, "Pole-changing windings for close ratio and 1:N ratio using the 3//Y/3//Y method," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 241-253, 2018.
- [7] J. Portos, M. P. Reddy, D. Eaton, "Application and advantages of PAM multi speed motors in petroleum and chemical industries," 2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), San Antonio, TX, USA, Sep. 2010, pp. 1-10.
- [8] L. M. Melcescu, M. V. Cistelean, O. Craiu, H. B. Cosan, "A new 4/6 pole-changing double layer winding for three phase electrical machines," The XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), Rome, Italy, Sep. 2010, pp. 1-6.
- [9] A. R. W. Broadway, K. S. Ismail, "Phase modulated 3-phase pole changing windings," *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 133, no. 2, pp. 61-70, Mar. 1986.
- [10] H. Liu, J. Wang, Z. Zhang, "Performance analysis of variable speed multiphase induction motor with pole phase modulation," *Archives of electrical engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 425-436, 2016.
- [11] D. A. Popov, S. D. Popov, "Three-Phase Pole-Changing Winding with a Pole Pair Ratio  $p_1:p_2 = 1:2$ ," RF patent №2012981, 15 May 1994.
- [12] Kh. G. Karimov, A. Tupoguz, "Method for designing electrically aligned windings in ac machines," *Electricity*, vol. 9, pp. 29-38, 1987.
- [13] M. Bobojanov, "Electrical Machines with Pole-changing Windings Using with Aim of Energy and Resource Saving," Tashkent, Uzbekistan, Fan va texnologiyalar markazi, 2012.
- [14] D. Rismuhamedov, F. Tuychiev, S. Rismuhamedov, "Pole-changing windings for turbomechanism engines," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tashkent, 2020, pp. 1-8.
- [15] M. Bobojanov, "Induction machine with pole-changing winding for turbomechanisms," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 72, no. 2, pp. 415-428, Jun. 2023.
- [16] F. N. Tuychiev, "Three-phase pole-changing winding for asynchronous machines on the fan drive," *AIP Conf. Proc.*, Jan. 2023, vol. 2552, no. 1, p. 030013.
- [17] M. Caruso, A. O. Di Tommaso, F. Marignetti, R. Miceli, G. R. Galluzzo, "A general procedure for the construction of gorges polygons for multiphase windings of electrical machines," Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, Apr. 2018, pp. 1-7.
- [18] J. W. Kelly, E. G. Strangas, J. M. Miller, "Control of a continuously operated pole-changing

induction machine," IEMDC'03, Madison, WI, USA, Jun. 2003, pp. 211-217.

- [19] D. Rismukhamedov, Kh. Shamsutdinov, S. Ganiev, Kh. Magdiev, Sh. Khusanov, "New pole-changing winding for electric drive of ball mills," E3S Web of Conf., Apr. 2023, vol. 384, pp. 1-6.
- [20] M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, H. F. Shamsutdinov, "Development of new pole-changing winding for lifting and transport mechanisms," E3S Web of Conf., Jan. 2023, vol. 365, pp. 1-10.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# 6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Zemin Davranışları: Vaka Analizi

## *Determination of Soil Behaviour of 6th February Kahramanmaraş Earthquakes: Case Study*

Aybüke Nur Tuncel Gökdoğan<sup>1\*</sup>, Nihat Sinan Işık<sup>2</sup>, Seyhan Fırat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye..

Geliş / Received: 03.05.2024

Kabul / Accepted: 09.05.2024

\*Sorumlu Yazar: Aybüke Nur Tuncel Gökdoğan [aybuknt@gmail.com](mailto:aybuknt@gmail.com)

**ÖZ:** 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen 7.7 ve 7.6 Mw büyüklüğündeki Kahramanmaraş Depremleri 11 ilde çok sayıda can kaybına ve yapısal hasara sebep olmuştur. Bu depremler sonrasında yapılan çalışmalarda yanıl yayılma, kum fıçırması ve zemin sıvılaşmasının geniş bir alanda ciddi hasarlar oluşturduğu ortaya çıkarılmıştır. Sıvılaşma sebebi ile bölgedeki yapı temellerinde diferansiyel oturma ve devrilme gibi davranışlar tespit edilmiştir. Bu çalışma, Adıyaman ilinin Gölbaşı ilçesi Gazi Caddesi üzerinde bulunan Müftülük Binasında meydana gelen hasarın sıvılaşma ile olan bağlantısının araştırılmasını amaçlamaktadır. Binanın temel altında kazıkların bulunması, depreme karşı dayanıklı olması beklentisini meydana getirmesine karşın görülen hasar, kazıkların bölge zemininin deprem durumundaki deformasyona karşı koyabilecek bir şekilde çalışmadığını kanıtlamış bulunmaktadır. Deprem sonrası bölgede yapılmış olan arazi deneylerinin ışığında zemin profili ve deney sonuçları incelenmiş, yapı temelinin kum birime oturduğu tespit edilmiştir. Gölbaşı ilçesinde yapılan araştırmaların sonuçları incelenmiş, bölgedeki kumlu zeminin sıvılaşmasına dair pek çok bulguya rastlanmıştır. Çalışma kapsamında bölgeye uygun deprem ivme kaydı seçimi yapılarak sıvılaşma analizleri yapılmış, DEEPSOIL ve LPile programları ile sıvılaşma nedeniyle kazıklarda oluşması beklenen yatay deformasyonlar belirlenmiştir. Kazık zemin etkileşiminin incelenebilmesi için LPile programı kullanılmış ve zeminin dinamik yükler altındaki davranışını incelemek için DEEPSOIL programından faydalanılmıştır. Kazıklı temellerde dinamik yükler altında meydana gelebilecek hasarları konu alan bu çalışmanın ilgili konuda yapılacak olan tasarımlar için fayda sağlayacağı ön görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kahramanmaraş depremleri, sıvılaşma, temel altı kazığı, kazık-zemin etkileşimi, DEEPSOIL

**ABSTRACT:** The Kahramanmaraş Earthquakes magnitude of 7.7 and 7.6 Mw, which occurred on February 6, 2023, caused many loss of lives and structural damage in 11 provinces. Studies conducted after these earthquakes revealed that lateral spreading, sand ejecta and soil liquefaction caused serious damage in a wide area. Due to liquefaction, differential settlement and toppling of building foundations have been detected in the region. This study aims to investigate the connection between liquefaction and the damage that occurred in the Müftülük Building on Gazi Street in Gölbaşı district of Adıyaman province. Although the presence of piles under the foundation of the building was expected to be resistant to earthquakes, the damage seen proved that the piles did not work in accordance with the deformations due to liquefaction in the region under an earthquake. The soil profile and test results were examined in the light of the field tests carried out in the region after the earthquake, and it was determined that the building foundation settled on the sand layer. The results of the researchs conducted in Gölbaşı district were examined and many findings were found regarding the liquefaction of the sandy soil in the region. Within the scope of this study, earthquake acceleration records suitable for the region were selected and liquefaction analyzes were carried out with the help of LPile program. The LPile program was used to examine the pile-soil interaction, and the DEEPSOIL program was used to examine the behavior of the soil under dynamic loads. It is anticipated that this study, which deals with the damages that may occur under dynamic loads in pile foundations, will be beneficial for the designs to be made on the relevant subject.

**Keywords:** Kahramanmaraş earthquakes, liquefaction, foundation piles, soil-pile interaction, DEEPSOIL.

## 1. GİRİŞ

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağında bulunan aktif sismik hareketliliklere sahip bir deprem ülkesidir. Günümüze kadar pek çok yıkıcı deprem yaşanan ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Pazarcık ve Amanos segmentleri ve Çardak fayı boyunca kuzeydoğu ve güneybatı yönlerinde gerçekleşen kırılmalar sonucu merkez üssü Kahramanmaraş ilinin Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir.

6 Şubat 04.17'de meydana gelen 7.7 Mw büyüklüğündeki ilk depremin odak derinliği AFAD'ın sisteminde 8.6 km, 13.24'de meydana gelen 7.6 Mw büyüklüğündeki ikinci depremin ise odak derinliği 7.0 km olarak tespit edilmiştir [1]. Depremlerin ardından bölgede büyüklüğü 6.4 Mw'e kadar olan 10.000'in üstünde artçı sarsıntı kaydedilmiştir. Bu depremler Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elazığ'da hissedilmiş ve bahsi geçen 11 ilde 50.000'in üstünde can kaybına, binlerce kişinin yaralanmasına, konutların yanısıra tarihi yapılar, hastaneler, karayolları, köprüler, altyapılar ve idari binaların da ciddi derecede hasar almasına yol açmıştır. Şekil 1'de 7.7 Mw ve 7.6 Mw depremlerin ve gerçekleşen artçı sarsıntıların bölgesel dağılımı gösterilmektedir. Gerçekleşen depremlerin yoğunluklu olduğu çizgiler faylanmayı da temsil etmektedir.

İlk depremde en büyük yer ivmesi, en fazla yıkımın olduğu Hatay ilinde 1.057 g olarak ölçülmüştür. İkinci depremde ise en büyük yer ivmesi Kahramanmaraş ilinde 0.65 g olarak ölçülmüştür [2]. Şekil 2'de 7.7 Mw Kahramanmaraş depremi için PGA konturları gösterilmektedir.

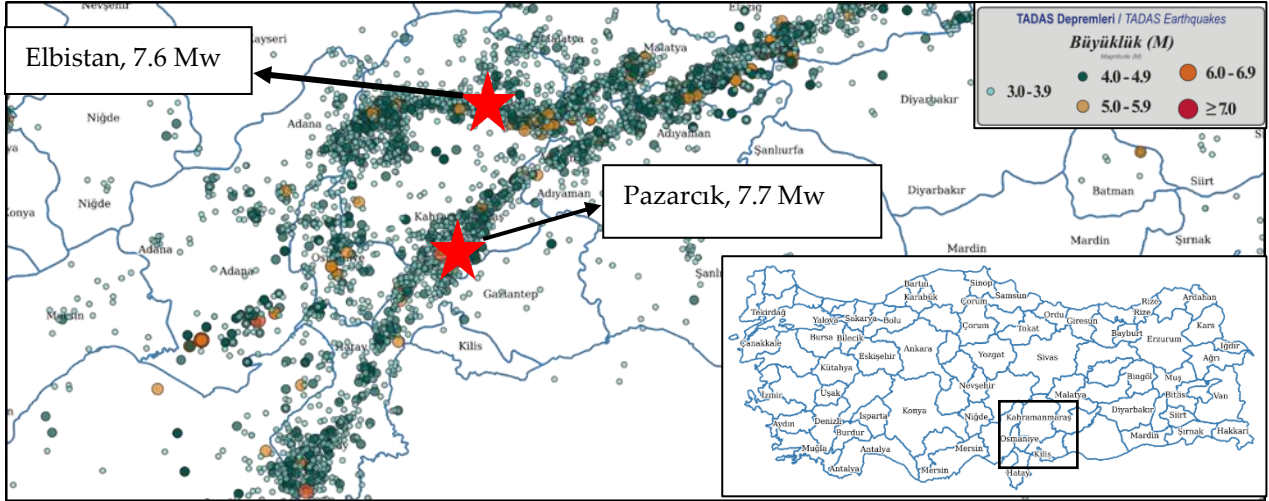
Depremlerden etkilenen bölgede yapılan araştırmalar sonucunda oluşan hasarın belirli bir kısmının sıvılaşma kaynaklı olduğu görülmüştür. Zemin sıvılaşmasının meydana geldiği bölgelerde yapısal hasara uğramayan ancak temelinde farklı oturmalar gözlemlenen ve bir bütün halinde devrilen ve oturan binalar olduğu tespit edilmiştir.

Sıvılaşma, dinamik etkiler altında boşluk suyu basıncındaki artışa bağlı olarak efektif gerilmedeki

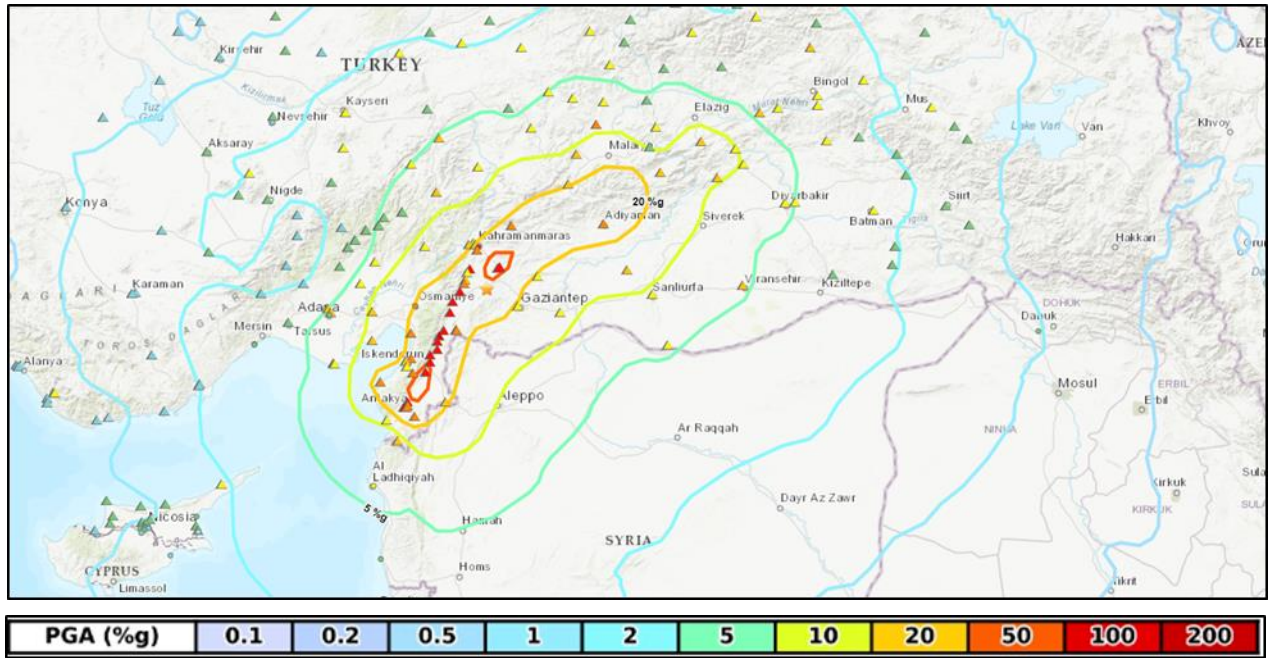
azalma sonucu zeminin katıdan sıvı duruma geçmesi olarak özetlenmektedir. Ülkemizde 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremi bu konunun önemini göstermiş olup 1999 Kocaeli depremi sonrası çalışmalar artış göstermiştir.

Zeminlerin sıvılaşabilirliğini belirleyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlar arasında tane boyutu, tane dağılımı ve zemin tabakasının jeolojik öyküsü gibi özelliklerin yanı sıra başlangıç sıklık derecesi ve hacim değişim potansiyeli gibi faktörler de bulunmaktadır. Ayrıca, su geçirgenliği de sıvılaşma potansiyelini etkileyen önemli bir faktördür. Bunların ötesinde, depremin büyüklüğü, süresi ve uzaklığı gibi sismik faktörler de zeminlerin sıvılaşabilirliğini etkilemektedir. Bu faktörlerin bir araya gelmesi, bir zeminin sıvılaşma riskini belirlemede kritik öneme sahiptir [3]. Geçmişte sıvılaşmanın sadece kohezyonsuz zeminlerde gerçekleşeceğinin düşünülmesine karşın, son yıllarda yapılan çalışmalar plastisite indisi düşük olan kohezyonlu zeminlerde de sıvılaşma benzeri davranışların gözlemlenebileceğini ortaya çıkarmıştır.

Kahramanmaraş depremleri sırasında meydana gelen zemin sıvılaşması konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Depremin etkilediği şehirlerde sıvılaşmanın gözlemlendiği bölgelerin incelenmiş olduğu çalışmada sıvılaşma tipi davranış gözlemlenen zeminlerin çoğunluğunun değişken ince tane içeriğine sahip kumlardan oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek ince tane içeriğine sahip ve sıvılaşabilen zeminler üzerinde yapılan laboratuvar çalışmaları, düşük plastisiteye sahip killi zeminlerin (CL) sıkça bulunduğunu göstermiştir. CL tipi zemin örneklerinin çoğunun Adıyaman ili Gölbaşı ilçesinden alındığı belirtilmiştir [4]. Başka bir çalışma sahada gözlemlenen kum konilerinin yüzeye fışkırması, yanal yayılma, çökme ve oturmaların sıvılaşma eğiliminde olan zeminlerde meydana geldiğini göstermiştir. [5]. Kahramanmaraş depremleri öncesinde ve sonrasında yürütülen çalışmalar sıvılaşma potansiyeli belirlendiği durumlarda sahaya özel çalışmaların ve analiz sonuçlarına uygun olarak gerçekleştirilecek zemin iyileştirme çalışmalarının gerekliliğini göstermektedir.



Şekil 1: Ana deprem ve artçı sarsıntılarının bölgesel dağılımı (tadas.afad.gov.tr [1])



Şekil 2: Mw=7.7 Kahramanmaraş deprem PGA konturları (earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage [6]).

Bu araştırmanın amacı, Adıyaman ili Gölbaşı ilçesi Gazi Caddesi üzerinde bulunan Gölbaşı Müftülüğü'ne ait binada meydana gelen hasarın kaynağının incelenmesidir.

Çalışma kapsamında incelenecek olan bölgenin zemini Kuvaterner yaşlı alüvyonal çökellerden oluşmakta ve yer altı su seviyesi sığdır. Çalışma alanı sınırlarından geçtiği belirtilen Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), sol yönlü doğrultu atımlı bir fay özelliği taşımaktadır [7]. İnceleme alanı olan Adıyaman ili Gölbaşı ilçesindeki PGA değerinin Şekil 2 incelendiğinde 0.2 g ile 0.3 g arasında olduğu görülmektedir [6].

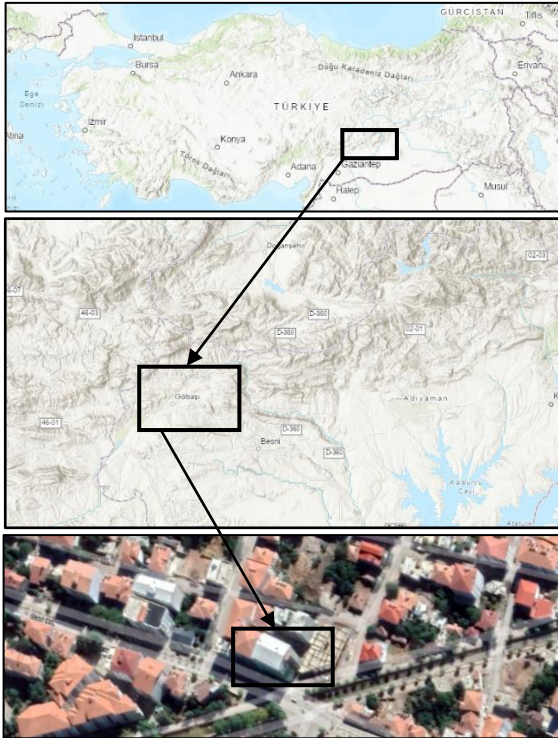
Gölbaşı ilçesinde ölçülmüş olan bir deprem kaydı mevcut değildir.

Depremin zemindeki etkisinin belirlenebilmesi için bölgede meydana gelen hasar tespiti amacıyla Gölbaşı ilçesinde derinlikleri 30.0 metreye varan sondajlar yapılmış, SPT, CPT çalışmaları ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Gölbaşı Müftülüğü'ne ait binanın çevresinde deprem sonrası yapılmış olan arazi ve laboratuvar deneyleri, bina temelinin kum birime oturduğunu göstermektedir. Bölgede deprem sonrası yapılan sondaj ve CPT sonuçları NCEER tarafından önerilen yöntem kullanılarak sıvılaşma potansiyeli

değerlendirmesi yapılmıştır. DEEPSOIL yazılımı ile ise kohezyonsuz tabakalardaki boşluk suyu basıncı artışları ve yatay deformasyonlar modellenmiştir. Temel altı kazıkların sıvılaşma öncesi ve sonrası yapısal davranışları L-Pile programı yardımı ile irdelenmiş ve depremde meydana gelen hasarın sebebinin tespiti amaçlanmıştır. Bu çalışmalar takip eden bölümlerde detaylandırılmaktadır.

## 2. VAKA ANALİZİ

Adıyaman ili Gölbaşı ilçesi Yeni Mahalle Gazi Caddesi üzerinde bulunan, koordinatları 37°47'15.19"K, 37°38'32.12"D olan Gölbaşı Müftülüğü'ne ait bina zemin ve 6 normal kattan oluşmaktadır. Boyutları yaklaşık 17.0 m x 20.0 m olan betonarme radye temelli binanın temel derinliği 1.30 m'dir. Bina temelinin altında 80 cm çapında, 10.0 m boyunda 35 adet donatılı fore kazık bulunmaktadır. Fore kazıklarda bulunan donatı adeti 5 olarak tespit edilmiş olup kazık imalatı sırasında bazı kazıklarda donatı filizi bırakılmadığı (temel ile bağlantısı olmadığı) gözlemlenmiştir. Gölbaşı Müftülüğü'ne ait yer bulduru haritası Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3: Yer bulduru haritası  
(AFAD ve Google Earth ([tadas.afad.gov.tr/](https://tadas.afad.gov.tr/) & [earth.google.com/web/](https://earth.google.com/web/))).

Kahramanmaraş depremlerinde binanın temelinde ciddi miktarda diferansiyel oturma meydana gelmiştir. Şekil 4'de Binanın deprem sonrasında çekilen fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 4: Müftülük binasının deprem sonrası çekilen fotoğrafları.

## 3. SAHA ÇALIŞMALARI

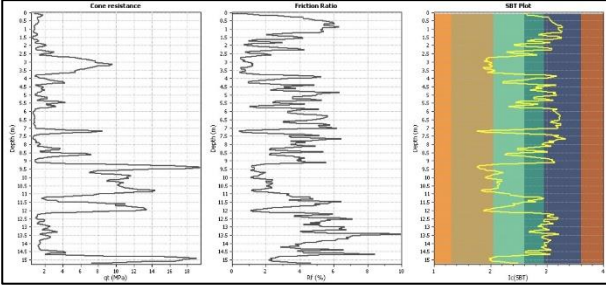
Adıyaman ili Gölbaşı ilçesinde bulunan Müftülük binası çevresinde yapılmış olan zemin etütleri çalışmada kullanılabilirliği açısından incelenmiştir. İlgili binaya en yakın saha çalışmalarının SK-22 sondajı ve CPT-72 olduğu tespit edilmiştir. Deneylerin özellikleri ve yöntemleri aşağıdaki başlıklarda özetlenmektedir.

### 3.1 CPT (Konik Penetrasyon Deneyi)

Konik penetrasyon deneyi (CPT), aynı zamanda "statik penetrasyon deneyi" olarak da tanımlanmakta olup konik geometriye sahip bir ucun metal çubuklara monte edilerek kuyu açmaya gerek kalmaksızın hidrolik baskı ile zemine sabit bir hızla itilmesi için gerekli kuvvetin sürekli olarak ölçümünü kapsamaktadır [8].

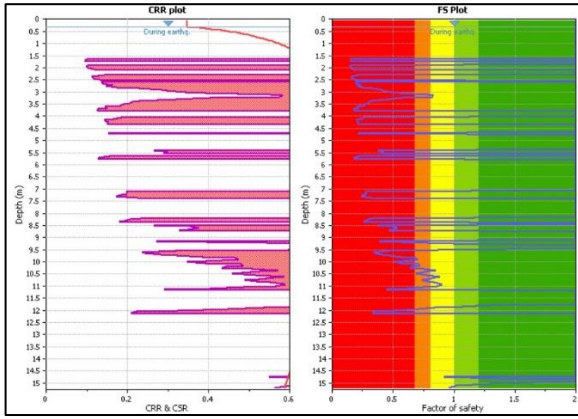
Konik penetrasyon deneyi, zemin profilinin incelenmesi, mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yer altı su seviyesinin izlenmesi ve boşluk suyu basıncının ölçülmesi gibi alanlarda kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 5'de, CPT deneyinden elde edilen uç direnci, sürtünme oranı ve zemin türünün derinliğe bağlı değişim grafikleri gösterilmektedir.





Şekil 5: CPT-72 uç direnci, sürtünme oranı ve zemin türü grafikleri.

Şekil 6'da hesaplanan devirsel gerilme oranının derinliğe bağlı değişim grafiği ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı grafiği gösterilmektedir. 0.0-8.0 m aralığında elde edilen sonuçlar zeminin bu aralıktaki sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 6: Sıvılaşma analizi sonucu özet grafiği.

### 3.2 SPT (Standart Penetrasyon Deneyi)

SPT en genel anlamda sondaj kuyusunun içerisinde yapılan, en uçta 'boyuna yarık tüp' olarak bilinen standart örnek alıcısının bağlı olduğu tijlerin üzerine, 63.5 kg ağırlığındaki bir şahmerdanın 76.2 cm yükseklikten tekrarlı bir şekilde bırakılarak kuyu tabanından toplamda 45 cm'lik penetrasyon sağlanana kadar çakılması ve bunun için gerekli olan darbe sayısı (SPT-N) değerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Deneyde elde edilen örnek, zeminin sağlıklı bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır. Literatürde SPT sonuçları ile kohezyonsuz zeminlerin göreceli sıklığı, kohezyonlu zeminlerin kıvam durumu, zeminlerin kayma dayanımı ve sıkışabilirlik parametreleri, sıvılaşma potansiyeli arasında çok sayıda korelasyon mevcuttur [8].

Tablo 1'de SK-22 sondajına ait SPT vuruş sayısı ve zemin birimi tanımlaması verileri sunulmaktadır.

Tablo 1: SK-22 Sondajına ait SPT sonuçları.

Sondaj No.	Numune No.	Derinlik (m)	Zemin Tanımlaması	SPT-N
SK-22	SPT-1	1.50-1.95	Alüvyon (Kum)	6.00
	SPT-2	3.00-3.45	Alüvyon (Kum)	6.00
	SPT-3	4.50-4.95	Alüvyon (Kum)	5.00
	SPT-4	6.00-6.45	Alüvyon (Kum)	6.00
	SPT-5	7.50-7.95	Alüvyon (Kum)	5.00
	SPT-6	9.00-9.45	Alüvyon (Siltli Kil)	2.00
	SPT-7	10.50-10.95	Alüvyon (Siltli Kil)	2.00
	SPT-8	12.00-12.45	Killi Kum	10.00
	SPT-9	13.50-13.95	Killi Kum	17.00
	SPT-10	15.00-15.45	Alüvyon (Kumlu Silt)	7.00
	SPT-11	16.50-16.95	Alüvyon (Kumlu Silt)	7.00
	SPT-12	18.00-18.45	Alüvyon (Kumlu Silt)	5.00
	SPT-13	19.50-19.95	Alüvyon (Siltli Kum)	22.00
	SPT-14	21.00-21.45	Alüvyon (Siltli Kum)	37.00
	SPT-15	22.50-22.95	Alüvyon (Siltli Kum)	26.00
	SPT-16	24.00-24.45	Alüvyon (Siltli Kum)	14.00
	SPT-17	25.50-25.95	Alüvyon (Siltli Kum)	37.00
	SPT-18	27.00-27.45	Alüvyon (Siltli Kum)	41.00
	SPT-19	28.50-28.95	Alüvyon (Siltli Kum)	56.00
	SPT-20	30.00-30.45	Alüvyon (Siltli Kum)	30.00

## 4. DEEPSOIL ANALİZİ

Zeminlerin dinamik kuvvetler altındaki davranışını incelemek için DEEPSOIL programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Seçilen bölgenin DEEPSOIL programı yardımıyla hem frekans alanında eşdeğer lineer hem de doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizi yapılmış ve bu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların Kahramanmaraş depremlerinde incelenen bölgenin zemininde meydana gelen davranışın ortaya çıkarılmasına yardımcı olması beklenmektedir. Programda kullanılmış olan idealize zemin profili ve zemin parametreleri Tablo 2'de özetlenmektedir. Bu parametreler ve zemin profili SK 22, CPT 72 ve laboratuvar deney sonuçları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Şekil 7'de ise DEEPSOIL programında oluşturulan zemin tabakaları gösterilmektedir. DEEPSOIL programında tanımlanan zemin katmanları daha küçük katmanlara bölünerek analizin hassasiyeti artırılmaktadır.

Tablo 2: DEEPSOIL'de kullanılan parametreler.

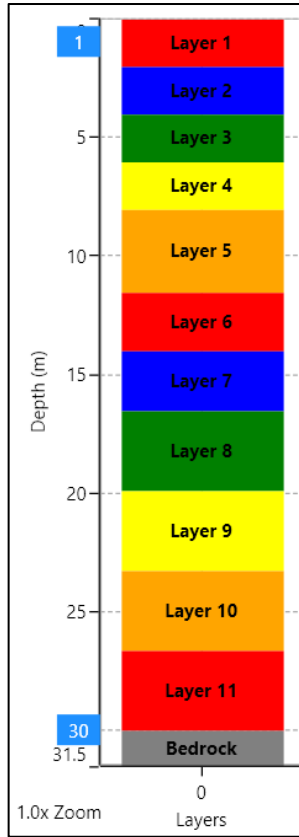
Derinlik (m)	Zemin Birimi	V <sub>s</sub> (m/s)	C <sub>u</sub> (kPa)	PI (%)	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
(0.0)-(8.00)	Siltli Kum	160.0	-	16.0	17.0
(8.00)-(11.50)	Yumuşak Kil	150.0	40.0	20.0	17.0
(11.50)-(16.50)	Kumlu Silt	170.0	-	16.0	17.0
(16.50)-(30.00)	Katı Kil	260.0	150.0	-	18.0

Siltli kum ve kumlu silt tabakalarının sıvılaşabilir tabakalar olduğu ve yer altı su seviyesinin zemin

yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir. Kayma dalgası hızları incelendiğinde bölgenin yerel zemin sınıfı ZD olarak kabul edilmiştir. DEEPSOIL ile iki farklı durum değerlendirilmiştir.

İlk durumda boşluk suyu basıncı artışı yani sıvılaşma dikkate alınmamıştır. Zemin modeli tüm tabakalar için Darendeli (2001) seçilerek modelde tabakaların kayma dayanımı ve plastisite indisleri dikkate alınmıştır [9].

İkinci durumda siltli kum ve kumlu silt tabakalarında boşluk suyu basıncı artışı dikkate alınmıştır. Bu amaçla DEEPSOIL bünyesinde bulunan Dobry/Matasovic modeli seçilmiştir ve model parametreleri Tablo 3'de gösterilmektedir [10].



Şekil 7: DEEPSOIL'de tanımlanan zemin tabakaları.

Tablo 3: Dobry/Matasovic model parametreleri [10].

VARIABLE	DESCRIPTION
$u_N$	Normalized excess pore pressure ( $u_N$ ).
$N_{eq}$	Equivalent number of cycles.
$\gamma_c$	The current reversal shear strain.
$\gamma_{tp}$	Threshold shear strain value.
$p$	Curve fitting parameter.
$s$	Curve fitting parameter.
$F$	Curve fitting parameter.
$f$	Dimensionality factor.
$v$	Degradation parameter

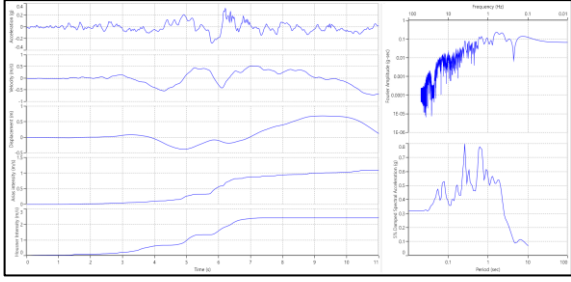
Kohezyonsuz tabakaların Dobry/Matasovic model parametreleri, çalışma sahasında bulunan kum birimlerin benzer olduğu Heber Road Site kum parametreleri olarak seçilmiştir [11].

Tablo 4'de Heber Road Site Kum boşluk suyu basıncı model parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 4: Heber Road Site Kum boşluk suyu basıncı model parametreleri [11].

Material	Reference	k (ft/sec)	Pore Water Pressure Model Parameters					
			v	f	p	F	s	$\gamma_{tr}$ (%)
Heber Road Site Sand PB; void ratio 0.7; 15% fines; $V_s \approx 500$ to 600 ft/s	Vucetic and Dobry (1989)	$1.4 \times 10^{-4}$	1	2	1.05	1.706	1.09	0.024

Analizde Kahramanmaraş'daki 4615 numaralı istasyonda ölçülen 7.7 Mw büyüklüğündeki depremin ivme kaydı kullanılmıştır [12]. İvme kaydında çok düşük ivme değerlerinin olduğu kısımlar dikkate alınmamış ve 10 saniyelik süre modele tanımlanmıştır. Şekil 8'de analizlerde kullanılan deprem kaydı gösterilmektedir.

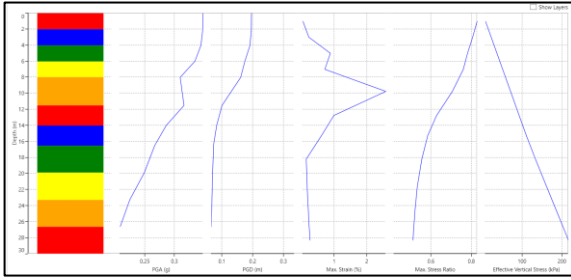


Şekil 8: DEEPSOIL’de kullanılan deprem kaydı.

Boşluk suyu basıncı artışının dikkate alınmadığı durumda analizler hem frekans alanında eşdeğer lineer hem de doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılmıştır.

#### 4.1 Frekans Alanında Yapılan Doğrusal Analiz

Frekans alanında yapılan eşdeğer doğrusal analiz çıktısı Şekil 9’da sunulmaktadır.

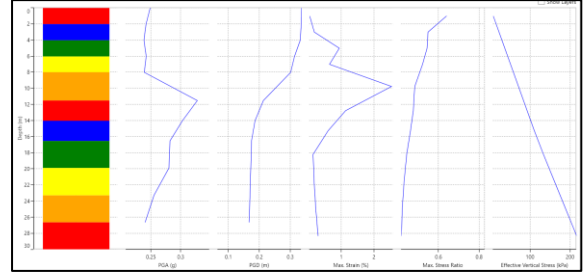


Şekil 9: Frekans alanında yapılan eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.

Bu durumda elde edilen maksimum kayma birim deformasyonu %2 mertebesinin üzerinde çıktığından zeminlerin önemli ölçüde plastik deformasyon davranışı gösterecekleri anlaşılmaktadır. Bu nedenle zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler değerlendirilmiştir.

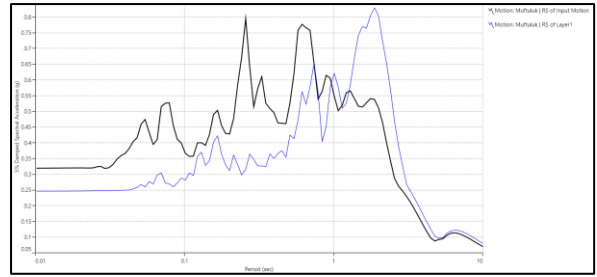
#### 4.2 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analiz çıktısı Şekil 10’da verilmiştir. Bu durumda yatayda elde edilen maksimum zemin deformasyonu 334 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 10: Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçları.

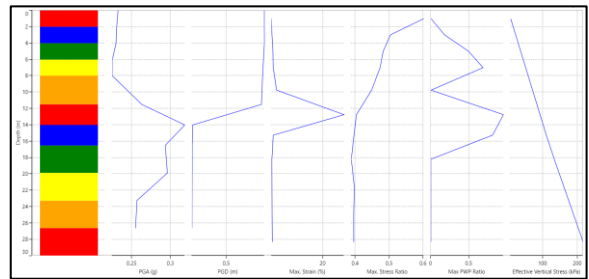
Şekil 11’de deprem kaydı ve analizde zeminde oluşan tepki spektrumları gösterilmektedir.



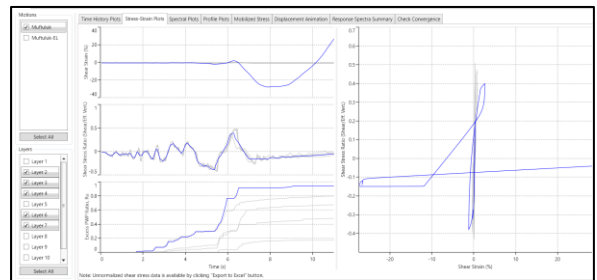
Şekil 11: %5 sönüm oranında tepki spektrumu

Boşluk suyu basıncı artışının dikkate alındığı analizlerde ise maksimum yatay zemin deformasyonu 865 mm olarak elde edilmiştir.

Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçları Şekil 12’de sunulmaktadır.



Şekil 12: Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçları.



Şekil 13: Gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

Aşırı boşluk suyu basıncı oranı ( $R_u$ ) 1.0 değerine yaklaştığında zemin sıvılaşma potansiyeli yüksek olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 13'de gösterilen analiz sonuçları incelendiğinde özellikle 6 ve 7 numaralı tabakalarda aşırı boşluk suyu basıncı katsayısının ( $r_u$ ) 0.8–0.9 mertebesine kadar yükseldiği görülmektedir. Bu tabakalarda sıvılaşmanın gerçekleştiği ön görülmektedir.

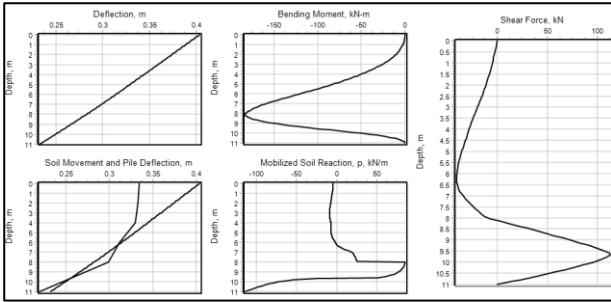
## 5. LPILE ANALİZİ

LPILE programı, zeminin dinamik yükler altında zemin-kazık etkileşimini incelemek için kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Müftülük Binası temel altı kazıkları incelenmesi amacı ile bir kazığın modeli kurulmuş olup sıvılaşmalı ve sıvılaşmasız durumlarda kazıkta oluşan moment, kesme kuvveti ve deplasman zemin hareketi göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

Kazıkların temel ile bağlantısı tespit edilmediği için analizde kazık üst ucu serbest bırakılmıştır.

### 5.1 Sıvılaşmasız Durum

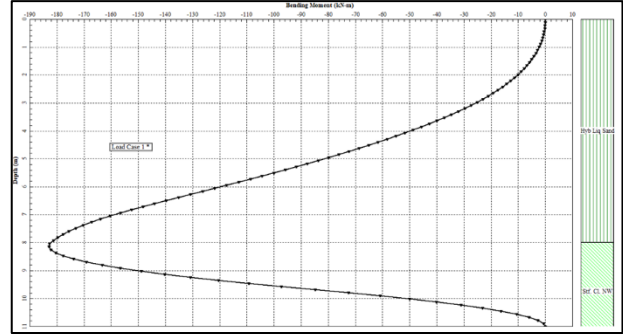
LPILE programı yardımı ile gerçekleştirilmiş olan sıvılaşma durumu dikkate alınmayan analizin sonuçları grafikler halinde Şekil 14'de gösterilmektedir.



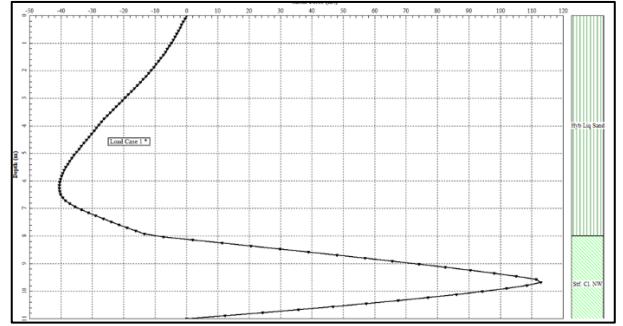
Şekil 14: Sıvılaşmasız durum analiz sonuçları.

Kazıkta meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmenin zemin yüzeyine doğru doğrusal bir artış gösterdiği, okunan en büyük değer yaklaşık 40 cm olduğu ve kazık alt kotunda bu değer sıfıra düştüğü görülmektedir. Kazıkta okunan maksimum moment değeri 183 kN.m ve maksimum kesme kuvveti değeri 112.7 kN'dur. Moment-derinlik ve kesme kuvveti-derinlik eğrileri

detaylı olarak Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmektedir.



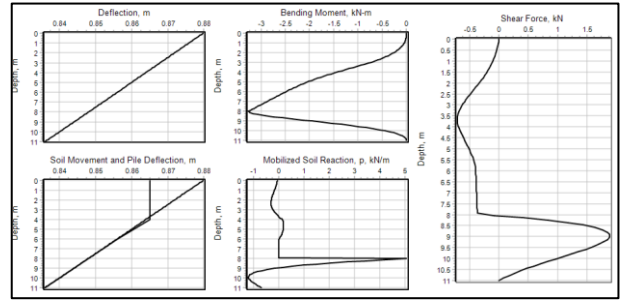
Şekil 15: Sıvılaşmasız durumda moment.



Şekil 16: Sıvılaşmasız durumda kesme kuvveti.

### 5.2 Sıvılaşma Durumu

LPILE programı yardımı ile gerçekleştirilmiş olan sıvılaşma durumu dikkate alınan analizin sonuçları grafikler halinde Şekil 17'de gösterilmektedir.

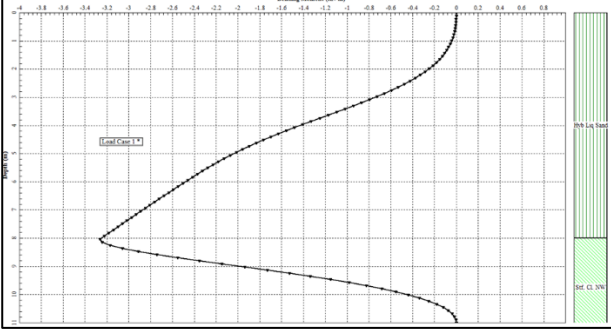


Şekil 17: Sıvılaşmalı durum analiz sonuçları.

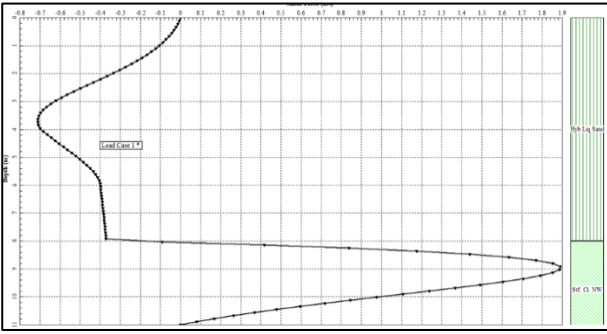
Kazıkta ortaya çıkan maksimum deplasmanın zemin yüzeyine doğru doğrusal bir artış gösterdiği ve okunan en büyük değer yaklaşık 88 cm olduğu ve kazık alt kotunda bu değer 83 cm'ye düştüğü görülmektedir. Kazıklar neredeyse tamamen sıvılaşan zemin içinde kaldığından soket boyu ve kazık rijitliği yetersiz kalmaktadır. Kazıkta okunan maksimum moment değeri 3.27 kN.m ve maksimum kesme kuvveti değeri 1.9 kN'dur. Maksimum moment, sıvılaşma görülen ve

sıvılaşma görülmeyen zemin tabakaları arasındaki bölgede ortaya çıkmaktadır.

Moment-derinlik ve kesme kuvveti-derinlik eğrileri detaylı olarak Şekil 18 ve Şekil 19'da gösterilmektedir



Şekil 18: Sıvılaşmalı durumda moment.



Şekil 19: Sıvılaşmalı durumda kesme kuvveti.

Zemin hareketi ve kazık sapmasının derinliğe bağlı grafiğinde görülen davranış, kazıkların tamamen sıvılaşan zemin içinde kaldığını bu nedenle yüksek yatay deformasyonlara maruz kaldığını göstermektedir.

Sıvılaşmalı durumda kazıkta oluşan moment ve kesme kuvvetinin sıvılaşmasız durumda meydana gelen kuvvetlerin yaklaşık %1'i kadar olduğu görülmektedir. Deplasman değeri ise sıvılaşmasız durumda hesaplanan değer iki katından fazlasına çıkmaktadır. Sıvılaşma durumunda beklenen bu davranışın sebebinin zeminde meydana gelen sıvılaşma sonucu yer değiştirmenin kazıkların hareketini tetiklemesi ile birlikte kazıkların üzerindeki bina yükünü taşımayıp dinamik yükler altındaki zemin deformasyonuna karşı direnç gösterememesi şeklinde yorumlanmıştır.

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, dinamik yükler altında genellikle kumlu zeminlerde karşılaşılan sıvılaşma davranışı Kahramanmaraş depremlerinde Adıyaman ilinin

Gölbaşı ilçesinde bulunan Müftülük binasında meydana gelen hasar özelinde incelenmiştir.

Depremlerden hemen sonra sahada yapılan teknik araştırmalar ve deneylerin yardımıyla zemin profili ve parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Oluşturulan zemin profili sıvılaşmadan kaynaklı olduğu düşünülen yapı hasarının incelenmesi için zemin davranışını irdelemek amacı ile DEEPSOIL programı, kazık-zemin etkileşiminin irdelenmesi amacı ile LPile programı yardımı ile analiz edilmiştir.

DEEPSOIL programı ile frekans alanında eşdeğer lineer ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizi yapılmış ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde aşırı boşluk suyu basıncı katsayısındaki artışın 1.0'e yaklaşması, ilgili kotlarda sıvılaşmanın gerçekleştiğine işaret etmektedir. CPT sonuçları kullanılarak NCEER tarafından önerilen yöntem ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları ise sıvılaşan tabakaların derinliğinin yaklaşık 12.5 metre derinliğe kadar devam ettiğini göstermektedir.

LPile programında elde edilen sonuçlarda kazıkta oluşan moment ve kesme kuvveti değerlerinde sıvılaşmasız duruma kıyasla ciddi bir azalma meydana geldiği görülmüş ve aynı durumda kazıkta meydana gelen yatay yer değiştirme değerinin yaklaşık iki katında çıktığı tespit edilmiştir. Kazıkların sıvılaşan zemin içerisinde kaldıklarından dolayı zeminin sıvılaşmasıyla birlikte zemine paralel bir hareket göstermiş olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum inceleme alanında meydana gelen sıvılaşmayı kanıtlar niteliktedir. Sıvılaşabilir tabaka olarak tanımlanan kumlu zemin katmanlarında sıvılaşma davranışının gerçekleştiği görülmekle birlikte sıvılaşabilir olarak tanımlanmayan katmanların da dinamik kuvvetlere maruziyeti ve üst ya da alt kotundaki zeminde gerçekleşen sıvılaşma davranışında kazığın zemin ile etkileşimdeki hareketine karşı direnç sağlamadığı görülmektedir.

Güvenli bir tasarım için yapı temelinin oturacağı zeminin yeterli sayıda saha ve laboratuvar deneyiyle incelenmesi, statik ve dinamik yükler altında bölgede meydana gelebilecek zemin deformasyonlarının belirlenip gerekliyse uygun yöntemlerle zemin iyileştirmesi yapılması, temel

altı kazıklarının tasarımı durumunda gerçekleştirilecek analizler sonucu yapı temeli ile bağlantılı olacak şekilde yeterli donatı kullanılarak imal edilmesi önerilmektedir.

**Yazar Katkısı:** Bu makale, Prof. Dr. Seyhan FIRAT ve Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'ın "6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Zemin Davranışları: Vaka Analizi" başlıklı Yüksek Lisans tezinin gelişmesi amaçlanarak dinamik kuvvetler etkisi altında zemin davranışının ve kazık-zemin etkileşiminin irdelenmesi için hazırlanmıştır.

**Teşekkür:** Yazarlar Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile GeoDestek Zemin Araştırma Proje Müş. Yaz. Lab. Bilg. Sis. Enr. İnş. Tur. İth. İhr. Tic. ve San. Ltd. Şti.'ne yapılan saha çalışmaları için teşekkür ederler.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023, "06 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) Depremleri Saha Çalışmaları Ön Değerlendirme Raporu," Ankara. [Online]. Erişim: [deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Arazi\\_Onrapor\\_28022023\\_surum1\\_revize.pdf](https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Arazi_Onrapor_28022023_surum1_revize.pdf).
- [2] AFAD, 2023, "06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 - Mw: 7.6 Depremleri Raporu," [Online]. Erişim: [https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu\\_02.06.2023.pdf](https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf).
- [3] K. Özaydın, "Zeminlerde sıvılaşma," Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Oct. 2007, pp. 231-255.
- [4] K. Ö. Çetin, B. Söylemez, H. Güzel, E. Çakır, "Soil liquefaction sites following the february 6, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence," Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 22, no. 6, pp. 1-24, Mar., 2024.
- [5] Gazi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, 2023, "6 Şubat 2023 Kahramanmaraş - Pazarcık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) Depremi Ön Değerlendirme Raporu," Ankara. [Online]. Erişim: [gazi.edu.tr/view/news/291874/gazi-demar-deprem-on-degerlendirme-raporu-nu-hazirladi](https://gazi.edu.tr/view/news/291874/gazi-demar-deprem-on-degerlendirme-raporu-nu-hazirladi).
- [6] Earthquake Hazards Program, 2024, [Online]. Erişim: [earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/](https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/).
- [7] E. Arpat, ve F. Şaroğlu, "Doğu anadolu fayı ile ilgili bazı gözlemler ve düşünceler," MTADergi, vol. 78, 44-50, pp. 34-39, 1972.
- [8] A. O. Erol, Z. Çekinmez, "Standart Penetrasyon Deneyi, Konik Penetrasyon Deneyi," Yüksel Proje Yayınları, Ankara, 2014.
- [9] M. B. Darendeli, "Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves," Ph.D. Dissertation, University of Texas Austin, 2001.
- [10] DEEPSOIL User Manual V 7.0, 2024, [Online]. Erişim: [DEEPSOIL.cee.illinois.edu/Files/DEEPSOIL\\_User\\_Manual\\_v7.pdf](https://cees.illinois.edu/Files/DEEPSOIL_User_Manual_v7.pdf).
- [11] R. Dobry, "Some basic aspects of soil liquefaction during earthquakes," Earthquake Hazards and the Design of Constructed Facilities in the Eastern United States, vol. 558, pp. 172-182, Jun., 1989.
- [12] Türkiye İvme ve Veri Tabanı Analiz Sistemi, 2024, [Online]. Erişim: [tadas.afad.gov.tr/list-event](https://tadas.afad.gov.tr/list-event).

DERLEME

# Sodyum-iyon Bataryaların Yapısı ve Elektrokimyasal Mekanizmaları

## *The Structure and Electrochemical Mechanisms of Sodium-ion Batteries*

Esra Balcı<sup>1,\*</sup> Sebahat Altundağ<sup>1</sup> Serdar Altın<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

Geliş / Received: 12.10.2023

Kabul / Accepted: 21.01.2024

\*Sorumlu Yazar: Esra Balcı, [eesra0122@gmail.com](mailto:eesra0122@gmail.com)

**ÖZ:** Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri içerisinde son zamanlarda üzerinde oldukça fazla çalışılan diğer bir alan ise elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir (pil ve kapasitör gibi). Talep edilen enerjiyi sağlayabilmek ve güvenilirliği en üst düzeye çıkarmak için farklı enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanım amaçlarına göre farklı enerji depolama sistemleri mevcuttur. Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin başında Sodyum (Na) - iyon ve lityum (Li) - iyon bataryalar gelmektedir ve iki grubunda çalışma mekanizmaları birbirine oldukça benzemektedir. Li-iyon bataryalar günümüzde birçok uygulama sisteminde kullanımı yaygın olduğu halde Na-iyon bataryalarında (SIB) benzer açıdan ticarileştirilmesi ve geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada SIB'lere ilişkin genel bir anlayış sağlamak amacıyla SIB'lerin katot, anot, elektrolitlerine ilişkin genel olarak yapıları ve elektrokimyasal mekanizmaları incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Na-iyon batarya, SIB, katot, anot, elektrokimyasal.

**ABSTRACT:** Another area that has been studied a lot lately in sustainable and renewable energy storage systems is electrochemical energy storage systems (such as batteries and capacitors). Different energy storage systems are needed to provide the requested energy and maximize reliability. Different energy storage systems are available depending on their intended use. Sodium (Na) - ion and lithium (Li) - ion batteries are the leading electrochemical energy storage systems, and the working mechanisms of both groups are quite similar to each other. Although Li-ion batteries are widely used in many application systems today, it is aimed to commercialize and develop Na-ion batteries (SIB) in a similar way. Therefore, in this review study, in order to provide a general understanding of SIBs, the general structures and electrochemical mechanisms of the cathode, anode, and electrolytes of SIBs are emphasized.

**Keywords:** Na-ion battery, SIB, cathode, anode, electrochemical.

## 1. GİRİŞ

Fosil yakıtların hızlı bir şekilde tükenmesi ve sebep olduğu çevre kirliliği konusundaki endişeleri de beraberinde getirmektedir. Dalga, rüzgar ve güneş enerjisi dahil olmak üzere yenilenebilir ve daha temiz olan enerji kaynaklarına ihtiyaç büyük önem arz etmektedir. Bu kaynaklardan düşük maliyetli yenilenebilir enerji üretmek, artan enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ne yazık ki, bazı yenilenebilir enerji sistemlerinin

kullanılması ticari uygulama alanlarını sınırlar ve bu da güç kaynağında istikrarsızlığa yol açar. Bu açıdan bakıldığında, enerji depolama sistemleri (EDS'ler) yenilenebilir enerji üretim sürecinde en önemli unsurdur çünkü yenilenebilir enerji, sürdürülebilir verimliliği açısından endişe duymadan kademeli olarak depolanabilir sistemler olarak tanımlanır. Enerji üretimi; elektrik, mekanik, elektrokimyasal, kimyasal gibi farklı yöntemlerle üretilip depolanabilmektedir. Bu dört farklı EDS teknolojisi arasında, farklı koşullara karşı yüksek esnekliği, ilgili yüksek enerji dönüşüm verimliliği

nedeniyle elektriğin büyük ölçekli depolanması için elektrokimyasal ikincil pilden faydalanılması daha fazla dikkat çekmektedir.

Ticarileştirilmiş elektrokimyasal bazlı EDS, ilk olarak 1991 yılında Sony tarafından lityum - iyon (LIB) bataryalardır. LIB'ler, keşfedildiği günden itibaren taşınabilir elektronik cihaz uygulamalarına hızla hakim olmuştur. Ayrıca yüksek spesifik depolama kapasitesi, uzun çevrim ömrü ve yüksek çalışma potansiyeli nedeniyle LIB'lerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak son yıllarda lityum talebinin artmasıyla birlikte, küresel lityum rezervlerinin sınırlı olması, lityum bileşiğinin fiyatının önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Ayrıca Li-iyon bataryaların çevreye verdiği zararlardan dolayı yeni elektrokimyasal EDS'lerin araştırılması ile ilgili olarak dünya çapında yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

LIB'lerle karşılaştırıldığında, sodyum iyon piller (SIB'ler) ve potasyum iyon piller (KIB'ler), dünyadaki rezerv bolluğundan dolayı üzerinde yoğun çalışılan bir konudur. Li ve K elementleri ile karşılaştırıldığında Na, yeryüzünde en bol bulunan elementlerden biri olduğu görülmektedir. Ayrıca ticari olarak elektrot hazırlama olanağı sağlayan çok sayıda Na içeren kaynak mevcuttur. Mesela sadece Amerika'da 23 milyar ton soda külü mevcuttur. Sonuç olarak, SIB elektrotlarının maliyeti, LIB'lerle karşılaştırıldığında büyük ölçüde daha düşüktür; bu da SIB'leri yeni nesil EDS olarak daha umut verici hale getirmektedir. Ancak potasyum elementi; sodyum ve lityum elementlerine kıyasla daha büyük iyon yarıçapına sahiptir (Na<sup>+</sup>dan ~0,4 Å daha büyük, Li<sup>+</sup>dan ise ~0,7 Å daha büyük), bu da mevcut anotların sınırlı seçimine ve KIB'lerdeki elektrotların zayıf döngü stabilitesine yol açar. Aslında SIB'lere ilişkin ilk çalışmalar, LIB'lerle ilgili ilk araştırmalara oldukça yakın olan 1970'li yıllardan itibaren başlamıştır.

Na iyon pilleri (NIB'ler), temel elektrokimyasal reaksiyonun lityum iyon pillere benzer olması sodyum iyon pillerin geliştirilmesi proseslerini hızlandırmıştır [1-4]. SIB ve LIB sistemleri anot, katot, elektrolit ve ayırıcı olarak benzer bileşenlere sahiptir. Ayrıca, LIB'lerden SIB'lere doğrudan elektrot malzemelerinin kullanılmasını sağlayan iyon taşıyıcıları dışında temel mekanizmaları aynıdır [5-7]. Bununla birlikte LIB'ler ve SIB'ler arasında bazı temel farklılıklar mevcuttur. Örneğin,

Na<sup>+</sup> iyonları Li<sup>+</sup> iyonlarından 0,26 Å daha büyüktür, bu da katı elektrolit arayüzleri (SEI'ler) oluşumunda, taşınma kabiliyetinde ve faz stabilitesinde ilgili farklılıklara yol açar. Tablo 1'de Lityum ve Sodyum elementinin bazı özelliklerinin karşılaştırması verilmiştir. Ek olarak, Na<sup>+</sup> iyonları Li<sup>+</sup>dan daha yüksek bir atom kütesine ve standart elektrot potansiyeline sahiptir (Standart Hidrojen Elektrot (SHE) ile karşılaştırıldığında Li<sup>+</sup> için -3,02 V, Na<sup>+</sup> için -2,71 V) ve bu da SIB'ler için daha düşük enerji yoğunluğuna yol açar.

**Tablo 1:** Li ve Na elementlerinin özellikleri.

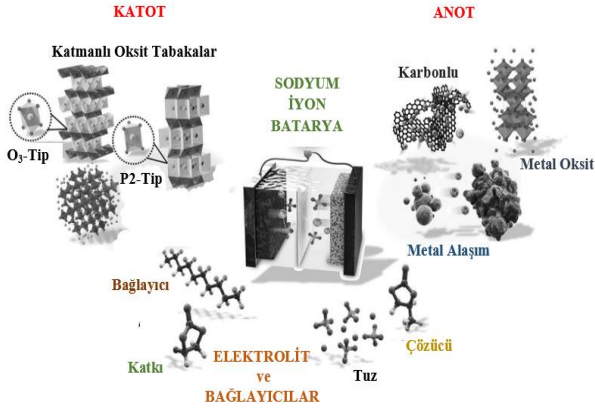
	Na	Li
Atom yarıçapı (pm)	190	167
İyonik yarıçap (pm)	102	76
Atom ağırlığı (g mol <sup>-1</sup> )	22.989	6.94
E0 ve SHE (V)	-2.7	-3.04
Erime noktası (°C)	97.79	180.54
Kaynama noktası (°C)	882.94	1347
Kristal yapısı	Kübik	Kübik
293 K'de yoğunluk (g cm <sup>-3</sup> )	0.971	0.53
Sınıflandırma	Alkali Metal	Alkali Metal
Clarke'ın numarası	2.644	<0.05
Stok Durumu	Her yerde	Güney Amerika'da %70
Fiyat/kg, karbonat (\$)	0.3	6.1

## 2. SODYUM-İYON BATARYALAR-DA KULLANILAN ANOT VE KATOT MALZEMELER

Sodyum iyon pillerdeki (SIB'ler) katot malzemeleri Li-iyon piller ile benzerliğinden dolayı daha kolay üretilebilirken anot malzemelerinde ise durum biraz daha karmaşıktır çünkü Na-iyonlarının bağlanabileceği elektrot malzemesi üretmek daha problemlidir. Örneğin, lityum - iyon piller için daha önce bildirilen katot malzemelerinin çoğu, yalnızca lityumun sodyum elementi ile değiştirilmesiyle üretilebilmektedir. Ancak SIB'lerdeki anot malzemelerine gelince, LIB'lerde geleneksel ticari anot malzemesi olan grafit gibi mevcut kullanılan anotların çoğu, Na iyonların grafit ara tabakalarına yerleşip NaC<sub>6</sub> yapısını oluşturamamaları ve katı elektrolit ara fazının kararsız oluşumu nedeniyle



doğrudan SIB'lerde anot olarak kullanılamaz. Mevcut senaryoda SIB teknolojisi, Li-iyon bataryalarda olduğu gibi katot malzemelerinin performansına göre belirlenmektedir. Na pilinin enerji yoğunluğu, Li-iyon bataryalar ile kıyaslandığında şu anki bilgi birikimine göre Na-iyonlarının ağır olmasından dolayı düşük olacaktır. Lakin burada belirtmek gerekir ki hem üretim maliyetlerinin düşük olması hem de çevre dostu özelliklere sahip olması yakın gelecekte Sodyum iyon bataryaların daha çok yaygınlaşacağını göstermektedir. Yüksek özgül kapasite, üstün çevrim stabilitesi ve yüksek hız kapasitesi gibi birçok özelliği sergileyen yeni elektrot malzemelerini geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır buradaki en büyük engellerden biri,  $\text{Na}^+$  yarıçapının (sodyumun yarı çapı: 0,98 Å)  $\text{Li}^+$  yarıçapından (lityumun yarı çapı: 0,69 Å) daha büyük olması ve buna bağlı olarak kristal yapıdan  $\text{Na}^+$  ekleme/çıkarma işleminin düşük kinetiğe yol açması ile spesifik kapasite değerlerinde bir bozulmaya neden olması olarak görülebilir [8, 9]. Na pilleri için katotlar da genel olarak hacimsel genişleme problemi ihmal edilebilir seviyededir. Şekil 1'de sodyum iyon batarya sistemlerinin şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 1: Na-iyon batarya sistemlerinin şematik gösterimi [10].

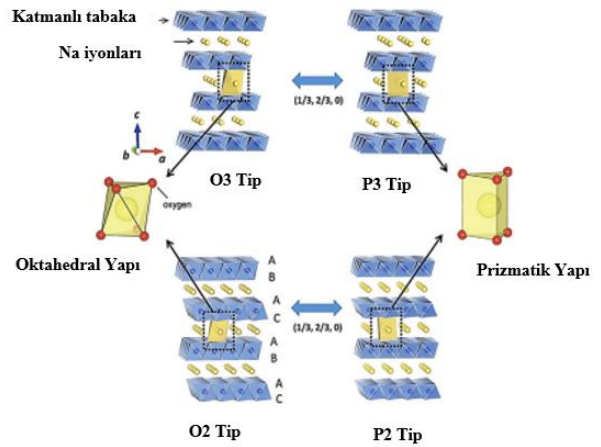
## 2.1 Na-iyon Bataryalarda Kullanılan Katot Malzemeleri

Sodyum iyon bataryaların genel elektrokimyasal davranışları katot malzemelerinin performansına göre belirlenmektedir. Sodyum iyon bataryalar için katot malzemelerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda Li-iyon bataryalarda elde edilen enerji yoğunluğu değerlerine kadar ulaşılabilir. Sodyum iyon bataryalarda kullanılan farklı katot malzemeleri; (1)

katmanlı oksitler, (2) polianyonik bileşikler ve (3) prusya mavisi analogları olmak üzere genel bir sınıflandırma ile üç temel gruba ayrılabilir.

### 2.1.1. Katmanlı Oksitler

Na-iyon bataryalar için kolay teknikler ile meydana getirilerek hazırlanabilen katmanlı oksit katot malzemelerinin mükemmel spesifik kapasiteler ve kararlılık sağladığı bilinmektedir [11, 12]. Katmanlı oksitler;  $\text{Na}_x\text{TmO}_2$  genel formülüne sahiptir. Burada Na; alkali metaldir ve Tm (Ni, Mn ve Co) geçiş metalleridir. Delmas ve ark. [13] bu tür katmanlı oksitleri O3, P3, P2 ve O2 olmak üzere farklı tiplere sınıflandırmıştır (Şekil 2).



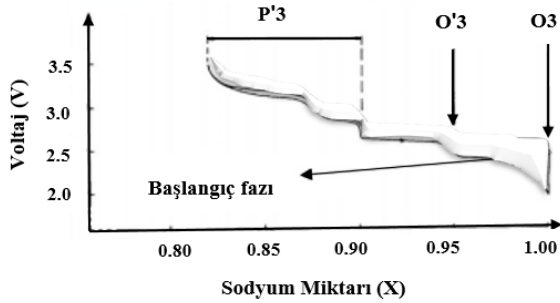
Şekil 2: Katmanlı oksitlerin sınıflandırılması [13].

O3 ve O2 tipi katmanlı oksitlerde, Na iyonları oktahedral yapıdadır. P2 ve P3 tipi katmanlı oksitler de ise, sodyum iyonları trigonal prizmatik kristal yapılarına yerleşir. Son zamanlarda farklı katmanlı sodyum oksitler üzerinde oldukça yoğun olarak çalışılmış ve geliştirilen bu malzemeler, günümüzde SIB'ler için olası katot malzemeleri arasında yer almıştır. Bu yapılarda; iyonların yayılması için iki boyutlu (2D) kanalların varlığı söz konusudur. Katmanlı olan bu yapılar; sodyum iyonlarının interkalasyonu ve deinterkalasyonu sırasında kararlı olduğu bilinmektedir [6]. Bazen geçici oksijen katmanları, sodyum iyonlarının bu kanalların içine ve dışına yayılmasına engel olabilir ve bu durum bazı boşlukların oluşmasına neden olur [14]. Sadece bu sebepten değil aynı zamanda Na-Tm ve Na-Na arasında meydana gelen elektrostatik etkileşimler de bu hareketli iyonların çıkarılması ve yerleştirilmesi sırasında boşlukların oluşmasına neden olabilir. Sonuç olarak bu boşluklar, sodyum iyonlarının difüzyon katsayısını

azaltarak galvanostatik döngü sırasında kapasite azalması gibi sorunlara sebep olabilir [15]. Bu durum katmanlı oksit sistemlerinde ele alınması gereken başlıca sorunlar arasındadır.

### $Na_xCo_2$ Yapısı

Delmas ve ark.  $Na_xCoO_2$ 'nin ( $x \leq 1$ ) katı hal yöntemi ile gerçekleştirilmiş çalışmasında katmanlı yapılara sahip dört farklı faz (P3, P'3, O3 ve O'3) bulmuştur [16].  $NaCoO_2$ 'nin O3 konfigürasyonlu depolama performansı Şekil 3'de gösterilmektedir [16]. Şekil 3 incelendiği zaman, düşük voltaj değerlerine ait iki eğimli bölge tespit edilmiştir bu da iki fazın bir arada bulunduğunu gösterir. Sodyumun daha küçük x değerlerinde, geniş bir potansiyel aralığında yalnızca tek bir faz vardır (P'3). Yapısal faz geçişleri  $O3 \rightleftharpoons O'3 \rightleftharpoons P'3$  şeklinde tanımlanabilir.



Şekil 3: O3 konfigürasyonunun temsili voltaj profili [16].

### $NaCrO_2$ Yapısı

Komaba ve ark.  $NaCrO_2$  bileşiği ile oluşturulmuş yapının performansını  $LiCrO_2$  ile karşılaştırmıştır [17]. Her iki bileşik de O3 tipi yapılardır ve kristal örgü parametreleri R-3m uzay grubuyla tanımlanmıştır. Katmanlar arası mesafenin çok olması ve Na-O bağlarının daha yoğun olması nedeniyle  $Na^+$  difüzyonu  $Li^+$  difüzyonundan çok daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.  $NaCrO_2$ 'nin daha iyi performansının bir diğer sebebi de içerdiği O-O bağ yapısı ve tetrahedral kristal yapıya sahip olmasıdır [18].

### $Na_xMnO_2$ Yapısı

Katmanlı  $Na_xMnO_2$  ilk olarak Parant ve ark. tarafından literatüre kazandırılmış katmanlı oksit katot malzeme sınıfıdır [19]. Bu malzeme sınıfına ait olan  $Na_{0.2}MnO_2$ ,  $Na_{0.4}MnO_2$ ,  $Na_{0.44}MnO_2$ ,  $Na_{0.7}MnO_2$  ve  $NaMnO_2$  gibi farklı konfigürasyonlar

rapor edilmiştir. Bu yapılardan ise  $NaMnO_2$ 'nin teorik kapasitesi ortalama 240–250 mAh/g'dir.  $NaMnO_2$ ,  $LiMnO_2$ 'ye çok benzer bir yapıya sahiptir.

### O3-Tipi Katmanlı Oksitler

O3 tipi katmanlı oksit malzemeler arasında ilk bakır (Cu) bazlı sistem olan  $Na_{0.9}Cu_{0.22}Fe_{0.30}Mn_{0.48}O_2$ 'yi Mu ve ark. literatüre kazandırmıştır [20]. Bakır elementinin sisteme dahil edilmesiyle tersinirlikte ve kinetikte iyileştirici özellik olduğu bulunmuştur. Çeşitli elektrokimyasal ve malzeme karakterizasyon deneylerine dayanarak,  $Ti^{4+}$  ve  $Ni^{2+}$  ikamesi ile yapı ve depolama performansında önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Bunlardan biri de yapıdaki monoklinik yapının ortadan kaldırılması ve Ni ikamesi ile  $Cu^{2+}$  nedeniyle Jahn-Teller distorsiyonunun bastırılmasını içerir [21].

### P3-Tipi Katmanlı Oksitler

Bo ve ark. P3 tipi  $Na_{0.4}CrO_2$ 'nin, Krom (Cr) elementinin elektronik yapısından dolayı tersinir olmayan fazların oluşması nedeniyle zayıf bir tersinir kapasite sergileyen bir katot malzemesi olduğunu bildirmiştir [22]. Geçiş metalleri olarak mangan (Mn), nikel (Ni) ve 0,5-0,67 mol Na içeren P3 tipi malzemelerin başka formları da vardır (P3 -  $Na_{0.67}Ni_{0.2}Mn_{0.8}O_2$ , P3 -  $Na_{0.50}Ni_{0.25}Mn_{0.75}O_2$  gibi) [23-25].

### P2-Tipi Katmanlı Oksitler

P2 tipi katmanlı oksit yapılarına ilişkin bazı literatür çalışmaları şu şekilde verilebilir; Ma ve ark. düşük maliyetli bir sentez yöntemi ile  $P2-Na_{0.78}Ni_{0.23}Mn_{0.69}O_2$ 'yi literatüre kazandırmıştır [26]. Bu yapı ile oluşturulan batarya sistemi yaklaşık 138 mAh/g'lik kapasite ile sonuçlanmıştır. Sonra ise Bai ve diğerleri. katı hal sentezi ile P2 tipi katmanlı oksit  $Na_{0.667}Zn_{0.222}Mn_{0.778}O_2$ 'yi karakterize etmişlerdir. Bu yapı ile oluşturulmuş batarya sistemi yarım hücre konfigürasyonunda 200 mAh/g'lik bir performans sergilemiştir [27].

### Çok Fazlı Katmanlı Oksitler

Chen ve ark. katı hal sentez yöntemini kullanarak P2/P3 tipi çift fazlı kompozit katmanlı oksit olan  $Na_{0.75}Li_{0.2}Mg_{0.05}Al_{0.05}Mn_{0.7}O_2$  bileşiğini literatüre kazandırmışlardır [28]. Bu konfigürasyon farklı

voltaj aralıklarında test edilmiş ve 0,2 C'de 2-4,5 V voltaj aralığında 180 mAh/g tersinir deşarj kapasitesiyle sonuçlanmıştır. Sun ve ark. çökeltme ve kalsinasyon tekniği ile sentezlenen P2/O3 tipi  $\text{Na}_{0.92}\text{Li}_{0.40}\text{Ni}_{0.73}\text{Mn}_{0.24}\text{Co}_{0.12}\text{O}_2$  olmak üzere iki fazın bir arada bulunduğu katmanlı bir oksit yapı elde etmişlerdir [29]. P2 tipi malzemeleri yüksek voltaj bölgesinde O2 fazına geri dönüşü olmayan bir faz geçişine maruz kaldığından dolayı, sentez sırasında biyokütle karbonu kullanılmıştır. Bu çalışmalara dayanarak katmanlı oksit katot malzemelerinin geliştirilmesi yapılar üzerinde daha olumlu sonuçlara sebebiyet vereceği düşünülebilir. Kısacası katmanlı oksitler, düşük moleküler ağırlıkları ve barındırılabilen yüksek Na elementi içeriği nedeniyle yüksek kapasite sağlama özelliğine sahiptir. P-tipi katmanlı oksitler ise, Na iyonlarının hareketi söz konusu olduğunda O tiplerine göre bir üstünlüğe sahiptir. Bu üstünlük, daha iyi kapasite performansı ile sonuçlanır.

### 2.1.2. Polianyonik Bileşikler

Oksit bazlı sistemlerin, yüksek voltaj gerektiren uygulamalarında elektrolit ile istenmeyen reaksiyonlar oksijenin ortaya çıkmasına neden olabilir, bu durum ise termal kaçak sorunlarına yol açabilir [30]. Bu sorun polianyonik bazlı bileşikler kullanılarak aşılabılır. Kararlı bir P-O bağı içinde barındıran bu bileşikler, yüksek voltaj uygulamalarında termal kararlılığını koruyabilme özelliğine sahiptir fakat elektriksel iletkenliklerinin düşük olduğu bilinir. Na-iyon hücrelerinin iletkenliğini ve performansını arttırmak için bu tür polianyonik bazlı bileşiklerin yüzeyi iletken karbon kaplamalar yaparak geliştirilebilir.  $\text{NaFePO}_4$  (NFP), bu kategoride ele alınan ilk birkaç yapıdan birisidir ve bu yapıda, Na içeriğindeki değişiklikler, geçiş metallerinin katkılanması, pirofosfatlar ve fosfat iyonlarını birleştirmeyi kapsayan farklı yöntemler ile gerçekleştirilmiştir [31]. Bu tür bileşiklerin imalatı söz konusu olduğunda, nemin emilmesi ve NaOH oluşumu, ele alınması gereken zorluklar arasındadır. NFP, amorf, olivin ve marisit içeren farklı kristal yapılaraya sahip olabilir. Flor elementi ile oluşturulan yapılar göz önüne alındığında, flor elementinin periyodik tablodaki en elektronegatif element olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, katot malzemesine florun takviye edilmesi elektrot potansiyeli üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olacaktır [21]. Florinin oksijenden daha güçlü

iyonik bağı ve elektronegatifliği, florür bazlı katotları SIB'ler için kullanılabilir potansiyel bir aday haline getirmiştir ve özellikle yüksek çalışma voltajına sahip olduğu için tercih edilebilirler. NASICON tipi malzemeler, üstün iyonik iletkenlikleri ve yapısal kararlılıkları nedeniyle araştırmalarda büyük ilgi görmüştür [32].

### 2.1.3. Prusya Mavisi Analogları

Prusya mavisi analogları,  $0 \leq x \leq 1$  ve  $0 \leq y \leq 2$  olmak üzere  $\text{A}_y\text{M}^a[\text{M}^b(\text{CN})_6]_x \cdot \text{VV}_{1-x} \cdot \text{n}(\text{H}_2\text{O})$  (burada A; alkali iyonu,  $\text{M}^a$  ve  $\text{M}^b$ ; geçiş metallerini, VV; muhtemelen sentez aşamasında meydana gelebilecek  $[\text{M}_2(\text{CN})_6]$  boşluklarını temsil eder) genel formülüne sahip çok çekirdekli kompleksler kategorisine aittir.

## 2.2 Na-iyon Bataryalarda Kullanılan Anot Malzemeleri

SIB'lerdeki katot malzemeleri ile ilgili yapılan araştırmalarla karşılaştırıldığında, uygun anot malzemelerinin geliştirilmesi daha zordur. LIB'lerde geleneksel bir ticari anot malzemesi olan grafit gibi [33-40] ucuz ve kararlı bir anot malzemesinin geliştirilmesi ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Lityum metalinden farklı olarak sodyum metali, oda sıcaklığında bulunan elektrolitteki güvenlik tehlikesi göz önüne alındığında doğrudan anot malzemesi olarak kullanılamaz. Bu nedenle, uygun voltaj aralıklarına, yüksek tersinir kapasiteye ve kararlı yapıya sahip uygun anot malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda NIB'ler için anot malzemeleri üzerinde olumlu sonuç alınan çalışmalar mevcuttur [6, 41, 42]. NIB'ler için anot malzemeleri üzerine yapılan malzeme gruplarını genel olarak beş gruba ayırabiliriz; (1) karbon bazlı malzemeler, (2) alaşım bazlı malzemeler, (3) metal oksitler ve sülfidler, (4) titanyum bazlı kompozitler ve (5) organik bazlı kompozitler.

### 2.2.1. Karbon Bazlı Malzemeler

Karbon ve titanyum bazlı malzemeler, anot malzemeleri arasında en popüler olanlardır çünkü Na iyonları, bu malzemeler ile anodik özellikler gösterebilmektedir. Aynı zamanda bu malzemeler, doğal bollukları ve yenilenebilir özellikleri nedeniyle NIB'ler için en çok çalışılan anot

malzemeleridir. Bu malzemelerin bazı özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir. LIB'ler için en popüler anot olan grafit malzemesi, ara katman mesafesinin daha büyük  $\text{Na}^+$  ile uyumsuzluğu nedeniyle NIB'lerde elektrokimyasal olarak daha az aktif rol oynamaktadır [34]. Hard karbonun yapısı karbon katmanlarından (grafen benzeri) ve mikro gözeneklerden oluşur. Mükemmel elektronik iletkenliğe ve kimyasal stabiliteye sahip katmanlı 2D karbon malzemesi olan grafen de NIB'lerde kullanılmıştır. Grafit olmayan karbon olarak adlandırılan hard karbon, oldukça düzensiz yapısı ve büyük katmanlar arası mesafesi nedeniyle NIB'ler için anot malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [43, 44]. Karbon malzemelerin döngüsel kararlılığını ve hız kapasitesini iyileştirmek için esas olarak nano yapılar geliştirilmiştir (nano tabakalar, içi boş nano küreler ve nano fiberler gibi [6, 45, 46]).

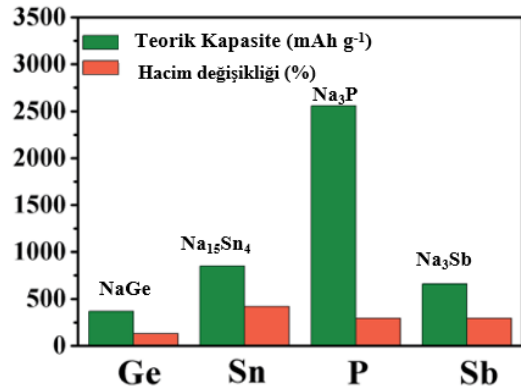
**Tablo 2:** Karbon bazlı malzemelerin özellikleri.

Karbon Malzemeleri	Elektronik İletkenlik ( $\text{S cm}^{-1}$ )	Katmanlar Arası Mesafe (nm)	Voltaj (V- $\text{Na}/\text{Na}^+$ )	$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )
Grafit [47]	100	0.43	0-0.3, 0.3-2	30-34
Grafen [48]	$10^3 - 10^6$	0.365-0.371	0.01-2	330.9
Hard Karbon [44]	10-100	0.39	0.1, 0.2-1.2	1272
Nanotabaka [49]	10-100	0.388	0.2, 0.2-1.2	196.6
Karbon nanoküre [46]	-	0.401	0-1.5	410
N-katlı Nanofiber [45]	-	0.369	0.01-1.5	81.7

### 2.2.2. Alaşım Bazlı Malzemeler

Alaşım bazlı malzemelerin yüksek teorik kapasite değerlerine ulaşmalarından dolayı umut verici malzemeler olduğu kanıtlanmıştır (Şekil 4 [50]). Zengin alaşım fazları oluşturmak için sodyum ile alaşım yapabilirler ve karbon bazlı malzemelerden çok daha yüksek bir kapasite elde edilebilir. LIB'ler için Si,  $4200 \text{ mAhg}^{-1}$ lik ultra yüksek teorik spesifik kapasitesi nedeniyle en çok çalışılan alaşım malzemesidir, ancak Na için bu değer aynı değildir. Antimon (Sb) aynı zamanda  $660 \text{ mAhg}^{-1}$  gibi yüksek teorik kapasiteye sahip, NIB'ler için umut verici başka bir alaşım bazlı anot malzemesi olmuştur [51]. Ceder'in grubu, kristal kalay

içerisine Na eklenmesinin dört aşamada gerçekleştiğini bildirmiştir:  $\text{NaSn}_5$ ,  $\text{NaSn}$ ,  $\text{Na}_3\text{Sn}$  ve  $\text{Na}_{15}\text{Sn}_4$  [52]. Bu çalışma sonucunda %420'lik devasa hacim genişlemesiyle Sn'den  $\text{Na}_{15}\text{Sn}_4$ 'e kadar  $847 \text{ mAhg}^{-1}$ lik yüksek bir teorik kapasiteye ulaşılmıştır. Germanyum (Ge) elementi ise, Ceder ve ark. tarafından  $\text{NaGe}$  bileşiğini oluşturup; bu sistemin teorik olarak  $369 \text{ mAhg}^{-1}$  değerinde kapasiteye ulaştığını literatüre rapor etmiştir [52]. İlk kez ise bu element (Ge) Baggetto tarafından NIB'ler için anot malzemesi olarak kullanılmıştır [53]. Fosforun (P) elementinin ise üç allotropu vardır: beyaz, siyah ve kırmızı fosfor. Bu allotropolar arasında kırmızı fosfor nispeten daha karardır, ticari olarak temin edilebilir ve NIB'ler için anot malzemeleri arasında en çok tercih edilen türüdür [50]. SnSb ilk olarak Liu'nun grubu tarafından NIB'ler için anot malzemeleri arasında kullanılan malzeme olmuştur [54]. Bu çalışma verilerine göre  $\text{Sn}_4\text{P}_3$ , 100 döngü boyunca ihmal edilebilir kapasite azalmasıyla  $718 \text{ mAhg}^{-1}$ lik yüksek bir tersinir kapasite sergilemiştir.

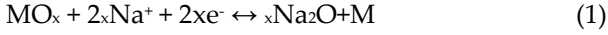


**Şekil 4:** Ge, Sn, P ve Sb elementlerinin teorik kapasitesi ve hacim değişimi [50].

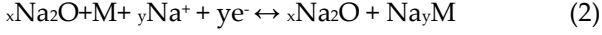
### 2.2.3 Metal Oksitler ve Sülfürler

Son zamanlarda, NIB'ler için geliştirilmesi amaçlanan anot malzemelerinin farklı bir türü metal oksitler ( $\text{MO}_x$  olarak gösterilir) araştırılmaktadır. Dönüşüm reaksiyonları ile Na depolayan metal oksitlerin araştırılması önem arz etmektedir. Bu malzemelerin reaksiyon mekanizması, bir oksit içindeki elektrokimyasal olarak aktif olmayan veya aktif olan metale göre iki tipte özetlenebilir. Metal Fe, Co, Ni, Cu, Mn ve Mo gibi aktif olmayan bir elementse, metal oksitler  $\text{Na}^+$

ile tek adımlı bir dönüşüm reaksiyonu meydana getirir (denklem 1) [50];



Metal oksitlerin başka bir dönüşüm reaksiyonu ise (denklem2 )  $\text{Na}^+$  ile reaksiyona girmesi şeklindedir [50].



Bu anotlar çoklu elektron reaksiyonlarından dolayı yüksek kapasite ve enerji yoğunluğu gösterirler. Ancak düşük başlangıç verimliliği, büyük histerezis ve zayıf çevrimsel özellik gibi dezavantajları da vardır. 2002 yılında,  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ 'ün ilk kez NIB'ler için anot malzemesi olarak kullanıldığı rapor edilmiş ve tam bir sodyum hücrelerinde yaklaşık  $300 \text{ mAhg}^{-1}$  lik tersinir bir deşarj kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir [55].  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , yüksek teorik kapasiteleri ve düşük maliyetleri nedeniyle ilgi çekici olan bir diğer anot malzemeleridir. Chen vd. yapmış olduğu çalışmada aerosol sprey piroliz yöntemiyle elde edilmiş g- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ @C nano kompozitleri hazırlamışlardır. Elde edilen ürün, yüksek teorik kapasitesi ( $200 \text{ mAg}^{-1}$  de  $740 \text{ mAhg}^{-1}$ ), olağanüstü çevrimsel kararlılık ( $2000 \text{ mAhg}^{-1}$  de 1400 uzun döngüden sonra  $358 \text{ mAhg}^{-1}$ ) ve yüksek hız kapasitesi ( $317 \text{ mAhg}^{-1}$ ) sergilemiştir [56]. Başka bir gelişme ise, NIB'ler için anot malzemesi olarak kullanılan CuO olmuştur. Chen ve ark. yapmış olduğu çalışmaya göre,  $303 \text{ mAhg}^{-1}$  kapasiteye sahip nanopartiküllerden (50 nm) oluşan gözenekli CuO nanoteller rapor edilmiştir [57]. Kalay (Sn) bazlı metal oksitlerin ( $\text{SnO}$  ve  $\text{SnO}_2$ ), NIB'ler için umut verici bir anot olduğu kanıtlanmıştır [58, 59].  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  [60],  $\text{SbO}_x$  [61] ve  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  gibi çeşitli Sb bazlı metal oksitler NIB'ler için anot olarak incelenmiştir [62]. Hu ve ark. 0,01 ile 2 V arasında 200 döngüden sonra  $414 \text{ mAhg}^{-1}$  kapasiteyle olağanüstü döngü stabilitesi sergileyen NIB'ler için  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  anotunu kullanmıştır [60]. Metal sülfürlerde ( $\text{MS}_a$ ) geniş çapta incelenen anot malzemeleridir. Genel olarak metal sülfürler; katmanlı metal sülfürler ve katmanlı olmayan metal sülfürlerden oluşur.

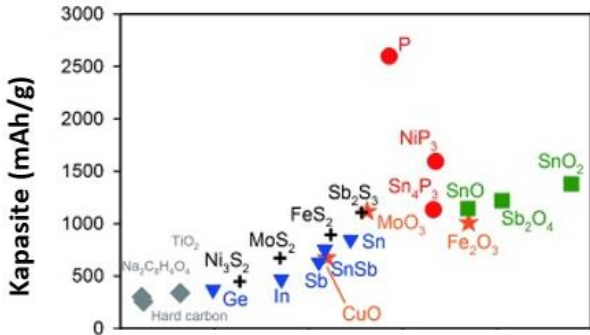
#### 2.2.4. Titanyum (Ti) Bazlı Kompozitler

Son zamanlarda çeşitli titanyum bazlı bileşikler, düşük maliyetleri, toksik olmamaları, düşük çalışma voltajı, düşük gerilim ve mükemmel dönüştürülebilirlikleri nedeniyle umut verici anot

malzemeleri arasındadır [50]. Ancak bunların performansları büyük ölçüde elektrolite [63], bağlayıcıya ve morfolojiye bağlı olarak değişiklik gösterir [64]. Genel olarak Ti bazlı kompozitler, sınırlı Na depolaması nedeniyle düşük spesifik kapasite sağlar.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  ve  $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$  titanyum bazlı kompozitleri başlıca anot malzemesi olarak tercih edilen türleridir. Titanyum dioksitin ( $\text{TiO}_2$ ) anataz, rutil, brookit ve  $\text{TiO}_2$  (B) gibi çeşitli ana polimorfları vardır. Bunlar arasında anataz  $\text{TiO}_2$ , üç boyutlu açık yapısı nedeniyle NIB'ler için en yaygın şekilde araştırılmaktadır [50].

#### 2.2.5. Organik Bazlı Kompozitler

Organik elektrot malzemelerin bazı üstün avantajları vardır. Bu avantajlar; biyokütleden elde edilen kaynaklara dayanması ve bu kaynakların bol olması, muazzam kimyasal bileşikler, yapısal esneklik ve olası çoklu elektron reaksiyonları olarak sıralanabilir. Bu özelliklerinden dolayı bu grup malzemeler giderek daha fazla ilgi odağı haline gelmektedir [65]. Literatürde daha önce bildirilen organik kompozitler arasında başlıca; ( $\text{Na}_2\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ) [66], ( $\text{Na}_2\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_4$ ) [67], ( $\text{Na}_2\text{C}_{14}\text{H}_4\text{O}_4\text{N}_2$ ) [68], ( $\text{Na}_2\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{O}_4$ ) [69], ( $\text{Na}_2\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_4$ ) [70] ve ( $\text{Na}_4\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ) [71] bulunmaktadır. Na depolama mekanizmasını keşfetme ve ardından özel elektrot malzemeleri tasarlama çabaları, Na-iyon pillerini gelecekte düşük maliyetli, çevre dostu ve büyük ölçekli enerji depolama sistemleri için LIB'lere umut verici bir alternatif haline getirecektir. Na iyonları ile Sn, Bi, Si, Ge, As, Sb ve P gibi çeşitli elementler ve bunların bileşikler anot olarak kullanılabilir. Şekil 5'de Na-iyon bataryalarda en çok kullanılan anot malzemeleri verilmiştir [72]. Yukarıda belirtilen inorganik elektrot malzemeleriyle karşılaştırıldığında, organik malzemeler de anot olarak kullanılabilir.



Şekil 5: En yaygın anot malzemeleri [72].

### 2.3 Na-iyon Bataryalarda Kullanılan Elektrolit ve Katkı Malzemeleri

Elektrolit ve katkı malzemelerine gelindiğinde katot ve anotlarla karşılaştırıldığında çok daha sınırlı çalışmalar yapılmış veya yayınlanmıştır. Bunun temel nedeni, elektrolit ve ilaveler üzerine yapılan araştırma çalışmasının, organik materyaller, inorganik materyaller ve elektrokimyasal materyallerden oluşan araştırma işbirliğini birleştiren disiplinler arası bir çalışma olmasıdır.

Ticari Na-iyon pillerin pratik uygulaması genellikle sıvı elektrolitlerin yüksek çalışma voltajı altında bozunması nedeniyle bir limit ortaya çıkarmaktadır ve bu da tam pillerin daha düşük enerji yoğunluğuna sebep olur. Batarya hücrelerinde kararlı SEI oluşması en önemli problemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Oluşan SEI'nin kararsız olması elektrolit içerisindeki Na-iyonlarının tükenmesine ve dolayısı ile batarya performansının azalmasına neden olmaktadır. Bu amaçla birçok farklı elektrolit katkı maddesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Popüler olan katkı maddeleri FEC ve VEC batarya performansını artıran bir özelliğe sahiptir.

Katkı maddelerinin sıvı elektrolit için polaritesi yüksek dielektrik sabiti altında bile iyi muhafaza edilmesi gerekir. Ayrıca iyonların transferini arttırmak için elektrolitin düşük viskoziteye sahip olması beklenir.

Bilindiği üzere bazı anot malzemesinin büyük hacim değişiklikleri nedeniyle, uygun bir bağlayıcı geliştirilmesi gerekmektedir. Bağlayıcı ile elektrot arasındaki güçlü kimyasal bağ yoluyla bu sorunu etkili bir şekilde çözebilir ve bu da yapısal kararlılığın artmasına yol açabilir. Ayrıca,

bağlayıcıların eklenmesiyle elektrot malzemeleri ile akım toplayıcı arasında sıkı bir temas elde edilebilir, bu da aktif malzemelerin akım toplayıcıdan sıyrılmasını önemli ölçüde önleyebilir.

### 3. NA-İYON BATARYALARDA KULLANILAN TEMEL BİLEŞENLER VE TERİMLER

Bir pilin elektrokimyasal mekanizmasını tasarlamak ve anlamak için, şarj depolama mekanizmaları ile ilgili temel ifadelerin bilinmesi önemlidir. Pil tasarımı, belirli gereksinimleri karşılamak için seri/paralel modda bağlanan iki veya daha fazla hücrenin birleşiminden oluşur. Hücre, depolanan kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üretmek için aşağıda belirtilen tüm bileşenleri içeren temel elektrokimyasal hücredir. Bir hücredeki farklı bileşenler ve önemli terminolojiler aşağıdaki gibi tanımlanabilir. NIB'ler üç ana bileşenden oluşur: elektrotlar (katot ve anot), elektrolit ve ayırıcı. Bu bileşenlerin her biri, elektrokimyasal hücrenin düzgün çalışması için çok önemlidir.

**Elektrolit:** İyonların elektrotlar (anot ve katot) arasında hareket etmesine izin veren bir ortam olarak tanımlanır. Genel olarak elektrolit, asit veya alkali tuzunun su, organik veya diğer çözücüler içinde çözüldüğü sıvı formdadır. Katkı maddeleri ayrıca belirli bir amaç için elektrolite eklenebilir. Sıvı elektrolitlerin yanı sıra araştırmacıların güvenli SIB'ler geliştirmek için farklı katı hal elektrolitleri üzerinde çalıştıklarını da belirtmek gerekir. Hem sıvı hem de katı hal elektrolitleri için, elektroliti hazırlamada kullanılan malzemeler, elektrotlar arasında düzgün sodyum iyonu hareketleri sağlamak için iyi iyonik iletkenlik özelliği sağlamalıdır. Buna ait veriler Tablo 3'de verilmiştir.

**Ayırıcı:** Katot ve anotun kısa devre yapmasını önleyen, böylece hücrenin güvenliğini sağlayan, aynı zamanda gözenekleri boyunca iyonların serbest hareketini sağlayan gözenekli bir zardır. Bir bakıma elektriksel yalıtkandır, ancak iyon iletkenidir. Anot, katot ve elektrolit malzemelerinin uygun kombinasyonları, hafiflik, yüksek voltaj, üstün kapasite ve daha iyi güç performansı gibi istenen tüm özelliklere sahip bir hücre ile sonuçlanabilir. Bununla birlikte, hücre imalatları için anot, katot ve elektrolit malzemelerinin

seçiminde arzu edilen bazı özelliklere sahip olmak yararlı olacaktır.

**Hücre, PİL ve Paketler:** Bir hücre, anot, katot, elektrolit, ayırıcı vb. gibi temel elektrokimyasal bileşenlerden oluşan en küçük ve temel elektrokimyasal birimdir. Buton tipi, prizmatik, silindirik, kese vb. gibi farklı hücre formları vardır. Batarya, istenilen özellikleri elde etmek için seri veya paralel olarak bağlanan iki veya daha fazla elektrokimyasal hücrenin birleşimidir.

Batarya paketi, sensörler, regülatörler, dengeleyiciler, kontrolörler (örn. batarya yönetim sistemleri [BMS] ve termal yönetim sistemleri

[TMS] ile birlikte), seri ve/veya paralel şekilde monte edilmiş bir dizi pil veya elektrokimyasal hücreden oluşan muhafazalı ünitelerdir. Bu üniteler gerekli enerjiyi, gücü ve voltajı sağlamak için kullanılır. Büyük ölçekli uygulamalar için, örneğin elektrikli araçlarda, ihtiyaca göre belirli sayıda hücre bir modül halinde birleştirilir. Genel olarak böyle bir modülün tasarımı esas olarak ürünlerin boyutuna/şekline, ara bağlantı devrelerine ve farklı güvenlik sıcaklık kontrol cihazlarına bağlıdır. Tesla Motors'un araç modülleri de dahil olmak üzere çoğu uygulamadaki silindirik hücre formatları, sırasıyla 18 ve 65 mm çap ve uzunluğa sahip 18650 standart boyut modelini takip etmektedir.

**Tablo 3:** Pil bileşenlerinde istenilen özellikler [73].

Katot	Anot	Elektrolit
Elektrolitle reaksiyona girmeyen	Elektrolitle reaksiyona girmeyen	Elektrot ile reaksiyona girmeyen
Oksitleyici özellik	İndirgeyici Özellik	Elektriği iletmeyen
Uygun çalışma voltajı	Yüksek Coulomb verimliliği	Üstün iyonik iletkenlik
Yapısal stabilite	Yapısal stabilite	Kullanımı güvenli
Uygun maliyetli	Uygun maliyetli	Uygun maliyetli
Sentez kolaylığı	Sentez kolaylığı	Sentez kolaylığı
İyi iletkenlik	İyi iletkenlik	Sıcaktan etkilenmeme

**Performansa göre pil sınıflandırmaları:** Pilin ana iki gereksinimi güç ve enerjidir. Bu nedenle piller genellikle ihtiyaca göre yüksek güç veya yüksek enerji sağlayacak şekilde hazırlanır.

**C-rate and E-rate:** Genel olarak, bir hücrenin şarj/deşarj akımları genel bir açıklama olarak C-hızı kavramı ile açıklanabilir ve bir hücrenin tam kapasitesine göre boşaltılma hızının zamana bağlı bir ölçüsüdür. 1 C'nin anlamı, 1 amper saat (Ah) değerindeki tam şarjlı bir hücrenin 1 saat boyunca sürekli olarak 1A akım sağlaması olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde 0.5 C'de (C/2)deşarj oluyorsa 2 saat boyunca 500 mA akım vermelidir, 2 C'de ise 30 dakika boyunca 2A akım vermelidir.

Öte yandan bir E-oranıdeşarj gücünü gösterir. Örneğin, 1 E-oranı, tüm hücreyi 1 saatte boşaltmak için gerekendeşarj gücüdür. Normalde bir hücre için şarj, gerilimdeki değişime rağmen sabit bir akım sağlanarak veya çekilen akıma rağmen sabit bir gerilim sağlanarak yapılabilir.

**Şarj Durumu (SOC) (%):** SOC genellikle yüzde olarak ifade edilir ve bir pilin mevcut kapasitesini maksimum kapasitenin yüzdesi olarak gösterir.

Yani bir bataryanın kapasite doluluğunu ortaya koymaya yönelik bir ölçüdür. Örneğin bir pilin SOC'si %100 ise bu pilin tamamen şarj olduğu anlamına gelir. Bazen SOC, bir pilin enerji rezervini ifade etmek için de kullanılabilir.

**Deşarj Derinliği (DOD) (%):** SOC gibi DOD' da yüzde olarak ifade edilir; burada boşalmış bir pilin kapasitesini gösterir ve maksimum kapasitenin yüzdesi olarak ifade edilir. Yani bataryanın ne kadardeşarj olduğunu ifade eden bir ölçüdür. Genel olarak SOC, kullandığı bir pilin mevcut durumunu tanımlarken kullanılırken, DOD sıklıkla birden fazla kullanımdan sonra pil ömrünü anlatırken kullanılır. SOC ve DOD' u bağlayan formül " $SOC = \%100 - DOD$ " olarak tanımlanır.

**Terminal Gerilimi (V):** Bir bataryanın yüke bağlandığı durumda iki terminali arasındaki gerilim farkıdır.

**Açık Devre Gerilimi (VOC veya OCV):** Elektriksel gerilim farkıdır. Pilin iki terminali (anot ve katot) arasındaki potansiyel değeri herhangi bir harici akım akışı olmadan ölçülen değerine denir. Bu

voltaj değeri, hücrenin yapımında kullanılan elektrolite ve malzemeye göre farklılık gösterir.

**Kapasite veya Nominal Kapasite:** Tam şarjlı bir bataryada belirli deşarj koşulları altında çekilebilecek maksimum depolanan şarjdır. Başka bir deyişle, belirli bir deşarj akımı veya oranı altında pilin %100 SOC'den kesme voltajına kadar deşarj olduğu maksimum erişilebilir amper-saattir. Genellikle deşarj akımının (A) deşarj süresi (h) ile çarpılmasıyla elde edilir ve C hızının (çekilen akım) artmasıyla azaldığı gösterilmiştir. Spesifik kapasite hem gravimetrik spesifik kapasite ( $Ah\ kg^{-1}$ ) hem de hacimsel spesifik kapasite ( $AhL^{-1}$ ) ile temsil edilebilir.

**Çevrim Ömrü:** Bir pilin, belirli bir voltaj aralığında şarj ve deşarj edilebildiği çevrim sayısıdır.

**Spesifik Enerji ( $Wh.kg^{-1}$ ):** Spesifik enerji/gravimetrik enerji yoğunluğu, birim kütle başına nominal pil enerjisidir.

**Enerji veya Nominal Enerji (Wh):** Bir bataryanın belirli bir deşarj akımı (C-oranı) altında %100 SOC'den kesme voltajına kadar deşarj olduğu toplam watt-saattir. Enerji, deşarj gücünün (W) toplam deşarj süresiyle (h) çarpılmasıyla hesaplanır.

**Enerji Yoğunluğu ( $Wh.L^{-1}$ ):** Enerji yoğunluğu litre cinsinden birim hacim başına nominal pil enerjisidir.

**Güç Yoğunluğu:** Bir pilin güç yoğunluğu litre başına Watt ( $W.L^{-1}$ ) ve gravimetrik/özgül güç yoğunluğu kilogram başına Watt ( $Wkg^{-1}$ ) cinsinden tanımlanabilir.

**Özgül Güç ( $W.kg^{-1}$ ):** Birim kütle başına erişilebilen maksimum güçtür.

**Tersinir Olmayan Kapasite:** İlk şarj-deşarj çevrimi ile n'inci şarj-deşarj çevrimi arasındaki kapasite farkıdır.

**Kendiliğinden Deşarj:** Hücre devreye bağlı olmadığı durumdayken bile anot ve katot terminalleri arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ortaya çıkan kapasite kaybıdır.

**Coulomb Verimliliği:** Faradaik/akım verimliliği olarak da bilinen Coulombic verimlilik, deşarj

sırasında bataryadaki şarj ve deşarj değerinin oranlanması ile elde edilen değere denir.

#### 4. SONUÇ

SIB'ler hakkındaki araştırmalar son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. LIB'ler ile benzer özellik gösteren katot malzemeler üzerine yapılan çalışmalar anot geliştirme çalışmalarına göre daha hızlı ilerlemiştir. Bilim insanları LIB'lerde var olan bilgi birikimlerini hızlı bir şekilde Na-iyon batarya sistemlerine uygulayarak bu tür bataryaların ticarileşmesi için yoğun çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışma kapsamında Na-iyon bataryaların temel özellikleri özetlenerek bir bakış açısı geliştirilmeye çalışılmıştır. Na iyon bataryaların üstün avantajları sayesinde, lityum temelli batarya gruplarının önüne geçeceği öngörülebilmektedir. Bu derleme çalışmasında ayrıca piller için kullanılan temel terminolojilerin açıklanması, pil bileşim mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlamış, sodyum iyon bataryaların genel yapısı ve elektrokimyasal mekanizmalarını tanımlamıştır.

**Yazar Katkısı:** Esra Balcı, Sodyum iyon bataryaların yapısı incelenmesi, Serdar Altın ve Sebahat Altundağ, Sodyum iyon bataryaların elektrokimyasal mekanizmaları araştırılması kısımlarına katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] R. Shakoar, et al., "A combined first principles and experimental study on  $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$  for rechargeable Na batteries," J. Mater. Chem., vol. 22, no. 38, pp. 20535-20541, Aug. 2012.
- [2] S. W. Kim, D. H. Seo, X. Ma, G. Ceder, K. Kang, "Electrode materials for rechargeable sodium-ion batteries: potential alternatives to current lithium-ion batteries," Advanced Energy Materials, vol. 2, no.7, pp. 710-721, May 2012.
- [3] N. Yabuuchi, et al., "P2-type  $Na_x[Fe_{1/2}Mn_{1/2}]O_2$  made from earth-abundant elements for rechargeable Na batteries," Nature materials, vol. 11, no.6, pp. 512-517, Apr. 2012.
- [4] K. T. Lee, et al., "Topochemical synthesis of sodium metal phosphate olivines for sodium-ion batteries," Chemistry of Materials, vol. 23, no.16, pp. 3593-3600, Jul. 2011.



- [5] S. Wenzel, T. Hara, J. Janek, P. Adelhelm, "Room-temperature sodium-ion batteries: Improving the rate capability of carbon anode materials by templating strategies," *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 9, pp. 3342-3345, Jun. 2011.
- [6] M. D. Slater, et al., "Sodium-ion batteries," *Advanced Functional Materials*, vol. 23, no.8, pp. 947-958, Jan. 2013.
- [7] B. L. Ellis and L. F. Nazar, "Sodium and sodium-ion energy storage batteries," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 16, no.4, pp. 168-177, Aug. 2012.
- [8] C. Liu, Z. G. Neale, G. Cao, "Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries," *Materials Today*, vol. 19, no.2, pp. 109-123, Mar. 2016.
- [9] K. Holmberg, A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions.," *Friction*, vol. 5, pp. 263-284, Sep. 2017.
- [10] X.Arqué, T. Patiño, S. Sánchez, "Correction: Enzyme-powered micro- and nano-motors: key parameters for an application-oriented design," *Chemical Science*, vol. 13, no. 33, pp. 9784-9786, Jul. 2022.
- [11] R. Usiskin, et al., "Fundamentals, status and promise of sodium-based batteries," *Nature Reviews Materials*, vol. 6, no.11, pp. 1020-1035, Jun. 2021.
- [12] A. Tripathi, A. Rudola, S. R. Gajjela, S. Xi, P. Balaya, "Developing an O<sub>3</sub> type layered oxide cathode and its application in 18650 commercial type Na-ion batteries," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 7, no.45, pp. 25-944-25960, Oct. 2019.
- [13] C. Delmas, C. Fouassier, P. Hagenmuller, "Structural classification and properties of the layered oxides," *Physica B+ c*, vol. 99, no. 4, pp. 81-85, Jan. 1980.
- [14] M. Sathiya, Q. Jacquet, M.L. Doublet, O.M. Karakulina, J. Hadermann, and J.m. Tarascon, "A chemical approach to raise cell voltage and suppress phase transition in O<sub>3</sub> sodium layered oxide electrodes," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, no.11, pp. 1702599, Jan. 2018.
- [15] P. F. Wang, et al., "Na<sup>+</sup>/vacancy disordering promises high-rate Na-ion batteries," *Science advances*, Vol. 4, no.3, pp. 6018, Mar. 2018.
- [16] C. Delmas, J. J. Braconnier, C. Fouassier and P. Hagenmuller, "Electrochemical intercalation of sodium in Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> bronzes," *Solid State Ionics*, vol. 3, no. 4, pp. 165-169, Aug. 1981.
- [17] S. Komaba, C. Takei, T. Nakayama, A. Ogata and N. Yabuuchi, "Electrochemical intercalation activity of layered NaCrO<sub>2</sub> vs. LiCrO<sub>2</sub>," *Electrochemistry Communications*, vol. 12, no.3, pp. 355-358, Mar. 2010.
- [18] S. Komaba, et al., "Electrochemically reversible sodium intercalation of layered NaNi<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> and NaCrO<sub>2</sub>," *Ecs Transactions*, vol. 16, no.42, pp.43, Jun. 2009.
- [19] J. P. Parant, R. Olazcuaga, M. Devalette, C. Fouassier and P.Hagenmuller, "Sur quelques nouvelles phases de formule Na<sub>x</sub>MnO<sub>2</sub> (x ≤ 1)," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 3, no.1, pp. 1-11. Feb. 1971.
- [20] L. Mu, et al., "Prototype sodium-ion batteries using an air-stable and Co/Ni-free O<sub>3</sub>-layered metal oxide cathode," *Advanced Materials*, vol. 27, no.43, pp. 6928-6933, Oct. 2015.
- [21] A. Ramesh, A. Tripathi and P. Balaya, "A mini review on cathode materials for sodium-ion batteries," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 913-923, Sep. 2022.
- [22] S. H. Bo, X. Li, A. J. Toumar and G. Ceder, "Layered-to-rock-salt transformation in desodiated Na<sub>x</sub>CrO<sub>2</sub> (x 0.4)," *Chemistry of Materials*, vol. 28, no. 5, pp. 1419-1429, Feb. 2016.
- [23] M. Kalapsazova, et al., "P<sub>3</sub>-Type layered sodium-deficient nickel–manganese oxides: a flexible structural matrix for reversible sodium and lithium intercalation," *ChemPlusChem*, vol. 80, no. 11, pp. 1642-1656, Jul. 2015.
- [24] E. J. Kim, et al., "Oxygen redox activity through a reductive coupling mechanism in the P<sub>3</sub>-type nickel-doped sodium manganese oxide," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no.1, pp. 184-191, Dec. 2019.
- [25] J. Liu, et al., "Elucidation of the high-voltage phase in the layered sodium ion battery cathode material P<sub>3</sub>-Na<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.25</sub>Mn<sub>0.75</sub>O<sub>2</sub>," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 8, no. 40, pp. 21151-21162, Sep. 2020.
- [26] Y. H. Jung, A. S. Christiansen, R. E. Johnsen, P. Norby and D.K. Kim, "In situ X-ray diffraction studies on structural changes of a p<sub>2</sub> layered material during electrochemical desodiation/sodiation," *Advanced Functional*

- Materials, vol. 25 no. 21, pp. 3227-3237, Apr. 2015.
- [27] X. Bai, et al., "Anionic redox activity in a newly Zn-doped sodium layered oxide  $P2-Na_2/3Mn_{1-y}Zn_yO_2$  ( $0 < y < 0.23$ )," *Advanced Energy Materials C*, vol. 8, no. 32, pp. 1802379, Oct. 2018.
- [28] X. Chen, J. Song, J. Li, H. Zhang and H. Tang, "A P2/P3 composite-layered cathode material with low-voltage decay for sodium-ion batteries," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 51, pp. 619-627, Jan. 2021.
- [29] C. Sun, et al., "Construction of the  $Na_{0.92}Li_{0.40}Ni_{0.73}Mn_{0.24}Co_{0.12}O_2$  sodium-ion cathode with balanced high-power/energy-densities," *Energy Storage Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 252-260, May 2020.
- [30] H. Wang, A. Tang and K. Huang, "Oxygen evolution in overcharged  $Li_xNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$  electrode and its thermal analysis kinetics," *Chinese Journal of Chemistry*, vol. 29, no. 8, pp. 1583-1588, Aug. 2011.
- [31] J. Y. Hwang, S. T. Myung and Y. K. Sun, "Sodium-ion batteries: present and future," *Chemical Society Reviews*, vol. 46, no. 12, pp. 3529-3614, Mar. 2017.
- [32] Z. Jian, Y. S. Hu, X. Ji and W. Chen, "Nasicon-structured materials for energy storage," *Advanced Materials*, vol. 29, no. 20, pp. 1601925, Feb. 2017.
- [33] W. Luo, et al., "Low-surface-area hard carbon anode for Na-ion batteries via graphene oxide as a dehydration agent," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 7, no. 4, pp. 2626--2631, Jan. 2015.
- [34] M. M. Doeff, Y. Ma, S. J. Visco and L. C. De Jonghe, "Electrochemical insertion of sodium into carbon," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, no. 12, pp. L169, Oct. 1993.
- [35] R. Alcántara, J. J. Mateos and J. Tirado, "Negative electrodes for lithium-and sodium-ion batteries obtained by heat-treatment of petroleum cokes below 1000 C," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 149, no. 2, pp. A20, Jan. 2002.
- [36] R. Alcántara, G. F. Ortiz, P. Lavela, J. L. Tirado, R. Stoyanova, and E. Zhecheva, "EPR, NMR, and electrochemical studies of surface-modified carbon microbeads," *Chemistry of Materials*, vol. 18, no. 9, pp. 2293-2301, Mar. 2006.
- [37] D. Callegari, "New materials for electrochemical energy storage: advanced lithium ion batteries and beyond," Phd thesis, University of Pavia, Mar. 2021.
- [38] L. Zeng, W. Li, J. Cheng, J. Wang, X. Liu and Y. Yu, "N-doped porous hollow carbon nanofibers fabricated using electrospun polymer templates and their sodium storage properties," *RSC advances*, vol. 4, no.33, pp. 16920-16927, Feb. 2014.
- [39] M. Dubois, and D. Billaud, "Electrochemical impedance spectroscopic study of the intercalation of lithium and sodium ions into polyparaphenylene in carbonate-based electrolytes," *Electrochimica Acta*, vol. 47, no. 28, pp. 4459-4466, Oct. 2002.
- [40] L. Zhu, A. Lei, Y. Cao, X. Ai and H. Yang, "An all-organic rechargeable battery using bipolar polyparaphenylene as a redox-active cathode and anode," *Chemical Communications*, vol. 49, no. 6, pp. 567-569, Nov. 2013.
- [41] N. Yabuuchi, K. Kubota, M. Dahbi and S. Komaba, "Research development on sodium-ion batteries," *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 23, pp. 11636-11682, Nov. 2014.
- [42] D. Kundu, E. Talaie, V. Duffort and L.F. Nazar, "The emerging chemistry of sodium ion batteries for electrochemical energy storage," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 54, no.11, 3431-3448, Feb. 2015.
- [43] R. S. Babu, and M. Pyo, "Hard carbon and carbon nanotube composites for the improvement of low-voltage performance in Na ion batteries," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 161, no. 6, pp. A1045, May 2014.
- [44] X. Zhou and Y. G. Guo, "Highly disordered carbon as a superior anode material for room-temperature sodium-ion batteries," *ChemElectroChem*, vol. 1, no.1, pp. 83-86, Aug. 2014.
- [45] Z. Wang, L. Qie, L. Yuan, W. Zhang, X. Hu and Y. Huang, "Functionalized N-doped interconnected carbon nanofibers as an anode material for sodium-ion storage with excellent performance," *Elsevier*, vol. 55, pp. 328-334, Apr. 2013.
- [46] K. Tang, et al., "Hollow carbon nanospheres with superior rate capability for sodium-based

- batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 2, no. 7, pp. 873-877, May 2012.
- [47] Y. Wen, et al., "Expanded graphite as superior anode for sodium-ion batteries," *Nature communications*, vol. 5, no.1, pp. 4033, Jun. 2014.
- [48] Y. X. Wang, S. L. Chou, H. K. Liu and S. X. Dou, "Reduced graphene oxide with superior cycling stability and rate capability for sodium storage," *Elsevier*, vol. 57, pp. 202-208, Jun. 2013.
- [49] H. Wang, D. Mitlin, J. Ding, Z. Li, and K. Cui, "Excellent energy–power characteristics from a hybrid sodium ion capacitor based on identical carbon nanosheets in both electrodes," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, no.14, pp. 5149-5158, Mar. 2016.
- [50] H. Kang, et al., "Update on anode materials for Na-ion batteries," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, no.35, pp. 17899-17913, Jul. 2015.
- [51] A. Darwiche, C. Marino, M.T. Sougrati, B. Fraisse, L. Stievano, and L. Monconduit, "Better cycling performances of bulk Sb in Na-ion batteries compared to Li-ion systems: an unexpected electrochemical mechanism," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, no.54, pp. 20805-20811, Nov. 2012.
- [52] V. L. Chevrier and G. Ceder, "Challenges for Na-ion negative electrodes," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 158, no.9, pp. A1011, Jul. 2011.
- [53] L. Baggetto, J. K. Keum, J. F. Browning and G. M. Veith, "Germanium as negative electrode material for sodium-ion batteries," *Electrochemistry Communications*, vol. 34, pp. 41-44, Sep. 2013.
- [54] L. Xiao, et al., "High capacity, reversible alloying reactions in SnSb/C nanocomposites for Na-ion battery applications," *Chemical Communications*, vol. 48, no.27, pp. 3321-3323, Feb. 2012.
- [55] R. Alcántara, M. Jaraba, P. Lavela and J. Tirado, "NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel: first report on a transition metal oxide for the negative electrode of sodium-ion batteries," *Chemistry of Materials*, vol. 14, no.7, pp. 2847-2848, Jun. 2012.
- [56] N. Zhang, X. Han, Y. Liu, X. Hu, Q. Zhao and J. Chen, "3D porous  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@ C nanocomposite as high-performance anode material of Na-ion batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 5, no.5, pp. 1401123, Nov. 2015.
- [57] Y. Lu, N. Zhang, Q. Zhao, J. Liang, and J. Chen, "Micro-nanostructured CuO/C spheres as high-performance anode materials for Na-ion batteries," *Nanoscale*, vol. 7, no.6, pp. 2770-2776, Dec. 2015.
- [58] S. H. Choi and Y. C. Kang "Aerosol-assisted rapid synthesis of SnS-C composite microspheres as anode material for Na-ion batteries," *Nano Research*, vol. 8, pp. 1595-1603, Apr. 2015.
- [59] X. Xie, D. Su, J. Zhang, S. Chen, A.K. Mondal, and G. Wang, "A comparative investigation on the effects of nitrogen-doping into graphene on enhancing the electrochemical performance of SnO<sub>2</sub>/graphene for sodium-ion batteries," *Nanoscale*, vol. 7, no.7, 3164-3172, Jan. 2015.
- [60] N. Li, S. Liao, Y. Sun, H. Song and C. Wang, "Uniformly dispersed self-assembled growth of Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Sb@ graphene nanocomposites on a 3D carbon sheet network for high Na-storage capacity and excellent stability," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, no.11, pp. 5820-5828, Feb. 2015.
- [61] X. Zhou, X. Liu, Y. Xu, Y. Liu, Z. Dai, and J. Bao, "An SbO<sub>x</sub>/reduced graphene oxide composite as a high-rate anode material for sodium-ion batteries," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 118, no.41, pp. 23527-23534, Sep. 2014.
- [62] G. Y. Chen, et al., "Conversion and displacement reaction types of transition metal compounds for sodium ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 284, pp. 115-121, Jun. 2015.
- [63] H. Pan, et al., "Sodium storage and transport properties in layered Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub> for room-temperature sodium-ion batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 3, no.9, pp. 1186-1194, May 2013.
- [64] L. Wu, D. Buchholz, D. Bresser, L. G. Chagas and S. Passerini, "Anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles for high power sodium-ion anodes," *Journal of Power Sources*, vol. 251, pp. 379-385, Apr. 2014.
- [65] J. Geng, J. P. Bonnet, S. Renault, F. Dolhem and P. Poizot, "Evaluation of polyketones with N-cyclic structure as electrode material for electrochemical energy storage: case of

- tetraketopiperazine unit," *Energy & Environmental Science*, vol. 3, no.12, pp. 1929-1933, Nov. 2010.
- [66] Y. Park, et al., "Sodium terephthalate as an organic anode material for sodium ion batteries," *Advanced Materials*, vol. 24, no.26, pp. 3562-3567, Jun. 2012.
- [67] Z. Zhu, H. Li, J. Liang, Z. Tao and J. Chen, "The disodium salt of 2, 5-dihydroxy-1, 4-benzoquinone as anode material for rechargeable sodium ion batteries," *Chemical Communications*, vol. 51, no.8, pp. 1446-1448, Dec. 2015.
- [68] D. J. Kim, et al., "An aqueous sodium ion hybrid battery incorporating an organic compound and a prussian blue derivative," *Advanced Energy Materials*, vol. 4, no. 12, pp. 1400133, Apr. 2014.
- [69] C. Wang, et al., "Extended  $\pi$ -conjugated system for fast-charge and-discharge sodium-ion batteries," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 137, no. 8, pp. 3124-3130, Feb. 2015.
- [70] A. Choi, et al., "Biphenyldicarboxylate sodium coordination compounds as anodes for Na-ion batteries," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 2, no.36, pp. 14986-14993, Jul. 2014.
- [71] S. Wang, et al., "All organic sodium-ion batteries with  $\text{Na}_4\text{C}_8\text{H}_2\text{O}_6$ ," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 53, no. 23, pp. 5892-5896, Feb. 2014.
- [72] Y. Kim, K. H. Ha, S. M. Oh and K. T. Lee, "High-capacity anode materials for sodium-ion batteries," *Chemistry–A European Journal*, vol. 20, no.38, pp. 11980-11992, Aug. 2014.
- [73] H. Zhang, M. Hu, Q. Lv, Z. H. Huang, F. Kang, and R. Lv, "Advanced materials for sodium-ion capacitors with superior energy–power properties: Progress and perspectives," *Small*, vol.16, no.15, pp.1902843, Sep. 2020.

