

9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi Bildiriler Kitabı

Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bildirileri (Health Sciences and Engineering Proceedings)

Editör

Dr. Muhammed TAŞAR



İSTANBUL
BİLİMLER
AKADEMİSİ



TÜRKİYE
SCHOLARSHIPS
BURSLARI

Çizgi Kitabevi Yayınları: 2111
Sosyal Bilimler

©Çizgi Kitabevi
Temmuz 2026

ISBN: 978-625-396-934-9
Yayıncı Sertifika No: 52493

KÜTÜPHANE BİLGİ KARTI
- Cataloging in Publication Data (CIP) -
Editör

Dr. Muhammed TAŞAR
9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi
Bildiriler Kitabı
Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bildirileri
(Health Sciences and Engineering Proceedings)

Baskıya Hazırlık: Çizgi Kitabevi Yayınları
Tel: 0332 353 62 65- 66

Baskı: Sebat Ofset
Sertifika No: 74481

ÇİZGİ KİTABEVİ

Sahibiata Mah.
M. Muzaffer Cad. No:41/1
Meram/**Konya**
(0332) 353 62 65

Konevi Mah.
Larende Cad. No:20/A
Meram/**Konya**
(0332) 353 62 66

Siyavuşpaşa Mah.
Gül Sk. No:15 B
Bahçelievler/**İstanbul**
(0212) 514 82 93

www.cizgikitabevi.com
📞📧 / cizgikitabevi

9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi Bildiriler Kitabı

Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bildirileri (Health Sciences and Engineering Proceedings)

Editör

Dr. Muhammed TAŞAR



İSTANBUL
BİLİMLER
AKADEMİSİ



TÜRKİYE
SCHOLARSHIPS
BURSLARI

Düzenleyen Kurumlar

Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB)

İstanbul Bilimler Akademisi (İBA)

Onur Kurulu

Abdulahdi Turus, Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB)

Prof. Dr. Gülfettin Çelik, İstanbul Bilimler Akademisi (İBA)

Düzenleme Kurulu

Prof. Dr. M. Fatih Andı, Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi | **Prof. Dr. Beyhan Bayhan**, Bursa Teknik Üniversitesi | **Prof. Dr. Hayati Develi**, İstanbul Üniversitesi | **Prof. Dr. Hamdi Genç**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Salih İnci**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Faruk Bal**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Nuriye Akbay**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Mehmet Lütfi Arslan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Nalan Hakime Noğay**, Bursa Uludağ Üniversitesi | **Prof. Dr. Pınar Obakan Yerlikaya**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Sadrettin Pençe**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Saliha Şahin**, Bursa Uludağ Üniversitesi | **Prof. Dr. Muhammed Tarakçı**, Bursa Uludağ Üniversitesi | **Prof. Dr. Barış Tamer Tonguç**, Bursa Teknik Üniversitesi | **Prof. Dr. Sinan Uyanık**, Bursa Teknik Üniversitesi | **Doç. Dr. Halil Kurt**, Marmara Üniversitesi | **Doç. Dr. Şekip Esat Hayber**, Bursa Uludağ Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Arı**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir Muhammed Deniz**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Birnur Deniz**, İstanbul Üniversitesi | **Dr. Meryem Özgür**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Muhammed Taşar**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Arş. Gör. Tarık Likoğlu**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Bilim Kurulu

Prof. Dr. Ahmet Koçak, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Faruk Bal**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Hamdi Genç**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Hüseyin Kaya**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. İsmail Ermağan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Mustafa Özer**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Nihal Petek Boyacı**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Recep Karacakaya**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Prof. Dr. Salih İnci**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Doç. Dr. Fatma Sarıaslan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Doç. Dr. Halil Kurt**, Marmara Üniversitesi | **Doç. Dr. Necmettin Acar**, Mardin Artuklu Üniversitesi | **Doç. Dr. Nevzat Sağlam**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Doç. Dr. Rüstem Mürseloğlu**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Doç. Dr. Sevgi Coşkun Yılmaz**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Belkıs Doğan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Burak Leblebicioğlu**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Cemal Kalkan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir Muhammed Deniz**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Fadi Zatarı**, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Hakan Özkan**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Latif Karagöz**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Mutlu Karakoç**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Öğr. Üyesi Yunus Çolak**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Ahmet Cemal Dağ**, Yıldız Teknik Üniversitesi | **Dr. Birnur Deniz**, İstanbul Üniversitesi | **Dr. Muhammet Can**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Şeyma Nur Temel**, Sabancı Üniversitesi | **Öğr. Gör. Owais Khan**, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi | **Dr. Ali İhsan Kahraman**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Meryem Özgür**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Dr. Uğur Altuntaş**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi | **Arş. Gör. Tarık Likoğlu**, İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Sorumluluk Beyanı

Bu kitapta yer alan metinler, 9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi kapsamında hakem değerlendirme sürecinden geçerek kabul edilen ve sunulan çalışmaların tam metinlerinden oluşmaktadır. Kitaptaki tüm bölümler titiz bir editoryal değerlendirmeden geçmiştir.

Bildirilerin bilimsel, etik, hukuki ve dilsel tüm sorumluluğu yazarlarına aittir. Yazarlar, sundukları çalışmaların orijinal olduğunu, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uygun hazırlandığını, gerekli durumlarda etik kurul izinlerinin alındığını ve çalışmaların herhangi bir telif hakkı ihlali içermediğini kabul ve beyan ederler.

Bildirilerde ifade edilen görüşler; Düzenleme Kurulu, Bilim Kurulu ve editörlerin resmi görüşlerini yansıtmaz. Editörler metinlerin içeriğine müdahale etmemiş, yalnızca biçimsel düzenlemeler yapmıştır. Editörler, hakem kurulu ve yayınevi; bu kitapta yer alan bilgilerin kullanımından veya içeriğinden doğabilecek herhangi bir yasal ve etik sonuçtan sorumlu tutulamaz.

Statement of Author Accountability

This book contains full papers presented at the 9th International Student Science Congress, which were accepted following a peer-review process.

The author(s) assume full scientific, ethical, legal, and linguistic responsibility for their papers. By submitting their work, author(s) declare that their studies are original, prepared in accordance with research and publication ethics principles, that necessary ethics committee approvals have been obtained, and that the works are free of copyright violations.

The views expressed in the papers do not necessarily reflect the official opinions of the Organizing Committee, the Scientific Committee, or the editor(s). The editor(s) have not altered the scientific content of the texts and have limited their intervention to formatting adjustments. The editor(s), the review board, and the publisher assume no legal or ethical liability for the content or for any consequences arising from the use of the information contained herein

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Takdim..... 9

Takdim..... 11

Brain Metastasis from Lung Adenocarcinoma Presenting as Subdural Hygroma and Hydrocephalus After Surgery: A Case Report in Turkish Republic of Northern Cyprus

Maryam Aliyu IBRAHİM, Hatice KEMAL, Doğa GÜRKANLAR,
Hüsnü KOŞUCU13

Persistent Non-communicable Diseases among Nigerian Population and Possible Solutions

Umar Muazu YUNUSA, Yau MUKHTAR.....27

IoT-Integrated Battery Management System with Real-Time Monitoring and Cell Balancing of Lithium-Ion Battery Packs for Light Electric Vehicles

Ahmed Wael Hanafy Mahmoud Hassan AFIFI.....51

Şebekeye Bağlı Üç Fazlı Fotovoltaik Sistemlerin Arıza Koşullarındaki Performansının Değerlendirilmesi

Kamilia KHANNOUSİ73

Ayçiçeği Çekirdeği Kabuklarından Elde Edilen Aktif Karbonların Sentezi ve Karakterizasyonu: Dokusal Özellikler, Elektrokimyasal Performans ve Tarımsal-Endüstriyel Atıkların Değerlendirilmesi

Gilbert Jose LİRA RAMOS105

To study and control leakage of Massey Ferguson cylinder head gray cast iron casting at pressure test by identifying actual root cause of the issue

Muhammad AHMED, Abdullah SANİ, Muhammad Umair ARSHAD ...119

Kent Yıkımının Anatomisi: Gazze'nin Kentsel Dokusunda Yapısal Hasar ve İşlevsel Kayıpların Dinamik Değerlendirmesi

Abdalrahman T. Y. ALASHİ, Muhammed ADAN.....141

Takdim

Türkiye'nin seçkin üniversitelerinde öğrenim gören uluslararası öğrencilerimiz; akademik birikimleri, çok yönlü bakış açıları ve kültürler arası tecrübeleriyle ülkemizin bilimsel üretimine nitelikli katkılar sunmaktadır. **Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi**, bu katkının görünür hâle geldiği, ortak düşünme ve birlikte üretme iradesinin somutlaştığı önemli bir akademik zemindir. Çok dilli ve disiplinler arası bir perspektifle ortaya konulan çalışmalar, bilginin evrensel niteliğini ve insanlığın ortak meselelerine birlikte çözüm arama imkânını güçlü bir şekilde yansıtmaktadır.

Bugüne kadar ülkemizin farklı şehirlerinde düzenlediğimiz kongrelerle, her bir ev sahibi şehrin tarihî, ilmî ve kültürel birikiminden istifade etmeyi amaçladık. Bu buluşmalar, Türkiye'nin dört bir yanındaki üniversitelerimizin sahip olduğu uluslararası eğitim vizyonunun somut bir yansıması olmuş; ülkemizde üretilen ilmî birikimin farklı coğrafyalardan gelen öğrencilerin katkılarıyla zenginleşerek sınırları aşan bir dolaşım ve ortak üretim zeminine dönüştüğünü göstermiştir. Her şehir, kendi tecrübesi ve birikimiyle bu ortak düşünce alanına özgün bir katkı sunmuş; böylece ilmin evrensel ufku ile şehirlerimizin ilmî ve kültürel zemini arasında güçlü ve kalıcı bir bağ kurulmuştur.

Kongre kapsamında sağlık bilimlerinden mühendisliğe, sosyal bilimlerden disiplinler arası çalışmalara kadar geniş bir yelpazede tebliğler sunulmuştur. Bunun yanı sıra çağımı-

zın temel meselelerine odaklanan özel oturumlar, akademik tartışmalara ayrı bir derinlik kazandırmıştır. Küresel sistemdeki güç dengelerinden aile ve nüfus politikalarına, Gazze’de gerçekleştirilen soykırımın hukuk, din ve felsefe bağlamında ele alınmasından yapay zekânın farklı alanlardaki uygulamalarına kadar uzanan çalışmalar; bilimin yalnızca teknik bir üretim alanı olmadığını, aynı zamanda insanlığın ortak vicdânına temas eden bir sorumluluk taşıdığını ortaya koymuştur.

Elinizdeki bu eser, kongrede sunulan bildirilerin titiz bir değerlendirme sürecinin ardından tam metin hâlinde bir araya getirilmesiyle hazırlanmıştır. Böylece yalnızca bir kongrenin çıktıları kayıt altına alınmamış; aynı zamanda gelecekte yapılacak akademik çalışmalara kaynaklık edecek kalıcı bir referans ortaya konulmuştur.

Uluslararası öğrencilerimizi, Türkiye’nin bilim ekosisteminin aktif paydaşları olarak görüyoruz. Bu kongreler, onların yalnızca eğitim hayatlarının bir durağı değil; aynı zamanda düşünce üretimine katıldıkları, küresel meselelere dair söz söyledikleri ve ortak geleceğe katkı sundukları bir imkân alanıdır.

Bu vesileyle ilim yolunda gayret gösteren tüm öğrencilerimize, kongrenin gerçekleşmesine katkı sunan paydaş kurumlara, kıymetli akademisyenlere ve emeği geçen çalışma arkadaşlarımıza teşekkür ediyorum. Ortaya konulan bu çalışmaların, insanlığın daha adil ve daha müreffeh bir geleceğine katkı sunmasını temenni ediyorum.

Abdulhadi TURUS

YTB Başkanı

Takdim

Türkiye'nin tarihi derinliği, kültürel zenginliği ve medeniyetler arası etkileşime açık yapısı, uluslararası öğrenciler için sadece bir eğitim merkezi değil, aynı zamanda köklü bir düşünce ve anlam iklimi sunmaktadır. Bu kadim birikimden ilham alan İstanbul Bilimler Akademisi (İBA), hem yerli hem de dünyanın dört bir yanından ülkemize gelen uluslararası öğrencilere yönelik akademik ve entelektüel faaliyetlerini kararlılıkla sürdürmektedir.

Bu gayretlerin en önemli meyvelerinden biri olan ve Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) işbirliğiyle hayata geçirilen Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi'nin dokuzuncusu, tarihi dokusu ve kültürel mirasıyla öne çıkan kadim şehrimiz Bursa'da gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de lisans ve lisansüstü düzeyde öğrenim gören uluslararası öğrencileri ortak bir platformda buluşturan 9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi, öğrencilerin akademik üretimlerini ve entelektüel birikimlerini paylaşmalarına olanak tanımıştır.

Sosyal Bilimler, Fen Bilimleri ve Sağlık Bilimleri başta olmak üzere pek çok farklı disiplinde sunulan bildirilerin yanı sıra, bu seneye özgü olarak Kongre Özel Konu çağrısıyla güncel ve hayati meselelere özel bir alan açılmıştır. Bu kapsamda; "Dünya Küresel Sisteminde ABD-Çin Çatışması", "Filistin-Gazze Meselesi", "Nüfus ve Aile Politikaları: Sorunlar ve Çözüm Önerileri" ile ev sahibi şehrimize bir vefa niteliği

taşıyan “Tarihi, Kültürel ve Ekonomik Yönleriyle Kadim Şehir Bursa” temaları altında kıymetli bildiriler toplanmıştır. Bu başlıklar, öğrencilerin yalnızca akademik bilgi üretimine katkı sağlamakla kalmamış; küresel gelişmelere, toplumsal meselelere ve insani krizlere karşı vicdani duyarlılıklarına da ayna tutmuştur. Orta Asya’dan Afrika’ya, Balkanlar’dan Ortadoğu’ya kadar geniş bir coğrafyadan gelen genç zihinlerin Bursa’da buluşması, Türkiye’nin kültürel diplomasi vizyonuna ve uluslararası toplumun çoğulcu bir küresel gelecek inşasına kıymetli bir katkı sunmuştur. Elinizdeki bu eser, 9. Uluslararası Öğrenci Bilimler Kongresi’nde sunulan ve titizlikle seçilen bildirilerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Dünyanın farklı noktalarından Türkiye’ye uzanan bir ilim yolculuğunun bilimsel ve zihinsel bir ürünü olan bu kitabın, uluslararası anlayışa, kültürlerarası etkileşime ve akademik dünyaya hayırlı olmasını temenni eder; bu süreçte emeği geçen tüm öğrencilere, danışman akademisyenlere ve organizasyona destek veren kurumlara teşekkürlerimi sunarım.

Prof. Dr. Gülfettin ÇELİK
İstanbul Bilimler Akademisi Vakfı
Yönetim Kurulu Başkanı

Brain Metastasis from Lung Adenocarcinoma Presenting as Subdural Hygroma and Hydrocephalus After Surgery: A Case Report in Turkish Republic of Northern Cyprus

Maryam Aliyu IBRAHİM, Hatice KEMAL,
Doğa GÜRKANLAR, Hüsnu KOŞUCU

Özet: Beyin metastazı, özellikle ileri evrelerde akciğer adenokarsinomunun bilinen bir komplikasyonudur. Nöroşirürjik girişimlerden sonra görülen subdural higroma, beyin omurilik sıvısı (BOS) kaçağı ve hidrosefali gibi nadir komplikasyonlar ise daha az bildirilmiştir. Bu komplikasyonlar, özellikle sistemik tedavi yan etkileriyle birlikte ortaya çıktığında önemli tanusal ve terapötik zorluklar oluşturur. Yetmiş yaşında, iki buçuk yıllık akciğer adenokarsinomu öyküsü olan erkek hasta, Yakın Doğu Üniversitesi Hastanesi'ne fokal nöbetler ve olası sol görme alanı kaybı ile başvurdu. Kemoterapiden bir yıl sonra, sağ parietal lobda beyin metastazı saptandı ve hasta cerrahi rezeksiyonun ardından radyoterapi ve immünoterapi aldı. Mevcut başvuruda Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG), aynı bölgede nüksü doğruladı ve ikinci bir beyin cerrahisi ile immünoterapi gerekliliği ortaya çıktı. Ameliyat sonrası hastada bilateral subdural higroma, BOS kaçağı ve hidrosefali gelişti. Subdural burr-hole operasyonu yapıldı, ardından subdural-peritoneal şant yerleştirildi. Ancak hastada depresif bir atak gelişti ve beyin elastikiyetinin kaybına bağlı olası komplikasyonlar ortaya çıktı: bradikardi (40 atım/dk), status epileptikus, akciğer enfeksiyonu ve atriyal fibrilasyon (150 atım/dk). Kardiyoversiyon (100 J ve 150 J) ve yoğun bakım ünitesi (YBÜ) desteği gerekti. Hasta uzun süre yüksek doz antiepileptik tedavi ile stabilize edildi ancak nörolojik olarak yanıtızsız kalmaya devam etmektedir. Bu vaka, metastatik akciğer adenokarsinomu hastalarında ortaya çıkabilen karmaşık ve ağır nörolojik ve sistemik komplikasyonları göstermektedir. Bu komplikasyonların multidisipliner yönetimi kritik öneme sahiptir. Ayrıca, beynin sağ parietal lobunda tümör lokalizasyonunun nadir bir örneği söz konusudur.

Anahtar Kelimeler: Beyin metastazı, Akciğer Adenokarsinomu, İmmünoterapi, Beyin Omurilik Sıvısı, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti

Abstract: Brain metastasis is a recognized complication of lung adenocarcinoma, particularly in advanced stages. Rare complications such as subdural hygroma, cerebrospinal fluid (CSF) leakage, and hydrocephalus following neurosurgical interventions are less frequently reported. These complications present significant diagnostic and therapeutic challenges, especially when coupled with systemic treatment side effects. A 70-year-old male with a two-and-a-half-year history of lung adenocarcinoma presented at Near East University Hospital with focal seizures and possible left-visual field deficit. One year after chemotherapy treatment, brain metastasis was identified in the right parietal lobe, and the patient underwent surgical resection followed by radiotherapy and immunotherapy. On current admission, Magnetic Resonance Imaging (MRI) confirmed recurrence at the same site, necessitating a second brain surgery and immunotherapy. Postoperatively, the patient developed bilateral subdural hygroma, CSF leakage, and hydrocephalus. A subdural burrhole operation was performed and later a subdural-peritoneal shunt was placed. However, the patient experienced a depressive episode and later complications possibility due to loss of brain elasticity such as: bradycardia (40 bpm), status epilepticus, lung infection and atrial fibrillation (150 bpm), requiring cardioversion (100 J and 150 J) and intensive care unit (ICU) management. He was stabilized with high-dose antiepileptic treatment for a long period of time but remains neurologically unresponsive. This case illustrates the complex and severe neurological and systemic complications that can arise in patients with metastatic lung adenocarcinoma. Multidisciplinary management of these complications are crucial. Also, there's a rare instance of brain tumor localization in the right parietal lobe of the brain.

Keywords: Brain Metastasis, Lung Adenocarcinoma, Immunotherapy, Cerebrospinal Fluid, Turkish Republic of Northern Cyprus

Introduction

Brain metastases occur in approximately 25% of adult cancer patients and are associated with poor overall prognosis (Cardinal et al., 2022). Lung, breast, and cutaneous melanoma are the most common primary tumors, collectively accounting for 67% to 80% of cases (Nayak, Lee, & Wen, 2012). Data from the Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER) Program indicate that patients with small-cell lung cancer (SCLC) or non-small-cell lung cancer (NSCLC) exhibit the highest rates of brain metastases at diagnosis, whereas melanoma carries the greatest relative risk for brain-metastatic disease (Cagney et al., 2017).

Non-small cell lung cancer (NSCLC) demonstrates distinct patterns of brain dissemination. (Bender & Tomé, 2011) reported that approximately one-quarter of NSCLC brain

metastases were located in the cerebellum, exceeding what would be expected based on relative brain volume. Similarly, (Quattrocchi et al., 2012) observed a predilection for the occipital lobes and cerebellum. More recently, (Schroeder et al., 2020) identified a disproportionate localization of NSCLC metastases to infratentorial regions, reinforcing posterior fossa involvement as a common site. While neurosurgical resection is widely regarded as the standard treatment for patients with solitary or symptomatic brain metastases, as it can rapidly alleviate neurological symptoms. Subsequent studies evaluating the combination of surgical resection and postoperative radiation therapy in patients with solitary metastases have demonstrated that this integrated approach yields superior outcomes compared to surgery alone (Patchell et al., 1998, 1990).

At present, Immunotherapy-based regimens constitute the standard first-line treatment for most patients, reflecting their widespread integration into clinical practice despite uncertainties regarding intracranial efficacy (Ernani & Stinchcombe, 2019). In particular, immune checkpoint inhibitors have transformed the therapeutic landscape for NSCLC by enhancing antitumor immune responses through blockade of inhibitory pathways (Ribas & Wolchok, 2018; Yshii, Hohlfeld, & Liblau, 2017). However, despite their efficacy across a range of malignancies, these agents frequently trigger immune-related adverse events (irAE's) that can affect virtually any organ system (Farina et al., 2024). Hence, the precise role of immune checkpoint inhibitors in the management of brain metastases remains an area of ongoing investigation (Ernani & Stinchcombe, 2019).

1. Case Presentation

A 70-year-old male with a known history of metastatic brain tumor presented to the hospital following a prolonged focal seizure. This patient with metastatic lung adenocarcinoma initially received platinum-pemetrexed chemotherapy combined with pembrolizumab. During treatment, a solitary cranial metastasis was detected and successfully managed with metastasectomy followed by adjuvant radiotherapy. Maintenance pembrolizumab was continued. One year later, a new cranial lesion recurred at the same site, prompting neurosurgical evaluation for repeat metastasectomy followed by immunotherapy with pembrolizumab.

On neurological examination, a left-sided visual field deficit was noted, likely related to the seizure activity and previous oncological history. Upon admission, corticosteroid therapy (dexamethasone 16mg/day) was initiated to reduce elevated intracranial pressure secondary to the tumor-associated mass effect. Preoperative laboratory evaluation revealed elevated blood urea nitrogen (BUN) (72 mg/dL), leukocytosis (WBC $12.0 \times 10^9/L$), and hypoalbuminemia (6.1 g/dL), with platelet and hemoglobin values within normal limits. Cranial MRI identified a 19.5 X 19 X 23 mm lesion in the post-central lobe medial section of the right parietal lobe, consistent with the previously diagnosed metastasis. The lesion appeared hyperintense on gadolinium-enhanced T1-weighted images and uniformly hyperintense on T2-weighted sequences. Also increase in relative cerebral blood volume (RCBV) in approximately 50% in the anterior medial part of the defined lesion drew attention (Figure 1).

Postoperatively, laboratory tests demonstrated persistently elevated white blood cell counts, BUN of 59.0mg/L, reduced calcitonin levels (secondary to intraoperative blood loss). Computed tomography (CT) scan confirmed complete

tumor excision but revealed fluid accumulation in the cranial cavity (Figure 2). Subsequent imaging identified a subdural hygroma and cerebrospinal fluid (CSF) leakage a communicating hydrocephalus in the right frontal region which led to the subdural burr-hole drainage for postoperative fluid collection. Furthermore, due to persistent fluid accumulation of CSF, subdural-peritoneal shunt was placed (Figure 3).

Furthermore, adjuvant Immunotherapy with pembrolizumab was initiated postoperatively to arrest the cancer growth, which resulted in improvement of the patient's level of consciousness. During follow-up new onset high ventricular rate (Atrial fibrillation) was observed and the patient was transferred to the ICU. Due to hemodynamic instability, synchronized cardioversion (100J and 150J) was done and sinus rhythm was restored. The patient was decompensated and furosemide diuretic was initiated. Anti-arrhythmic medication of metoprolol 50mg/day and Amiodorone 400mg/day were continued.

In coronary ICU whilst immunotherapy treatment was stopped the patient demonstrated progressive laboratory abnormalities, including hypokalemia, hypocalcemia, declining hemoglobin, elevated inflammatory markers [C-reactive protein (CRP) 15.76 mg/L and procalcitonin 0.50 ng/mL], and leukocytosis with a white blood cell (WBC) count of $11.1 \times 10^9/L$. Infectious workup confirmed pulmonary colonization with *Acinetobacter baumannii/calcoaceticus*, treated with targeted antibacterial therapy of inhaled and intravenous Colistin thrice daily. Candida infection on urine was detected and managed with antifungal therapy. Later on, hospital acquired infection with *Klebsiella pneumoniae* was confirmed via lung aspiration. Persistent increase in CRP (42.25mg/L) with increased WBC level led to sepsis.

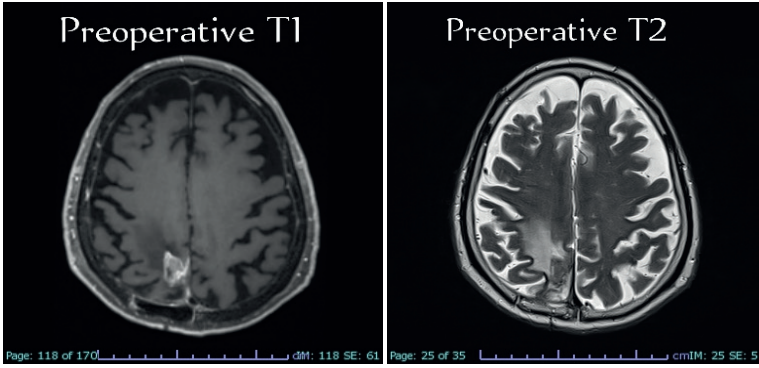


Figure 1. Cranial MRI showing preoperative gadolinium-enhanced on T1-weighted images and uniformly hyperintense on T2-weighted sequences.

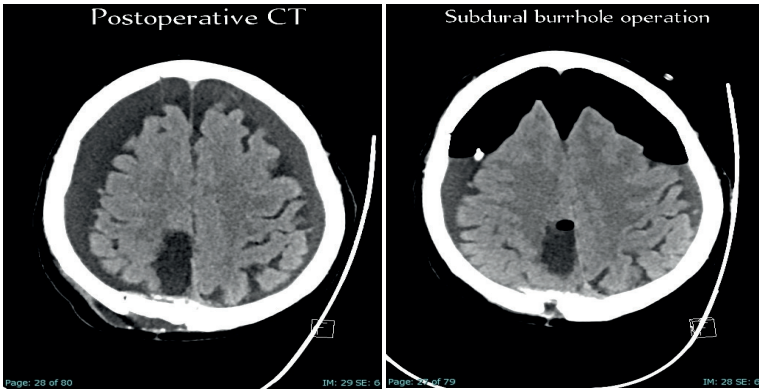


Figure 2. CT scan showing postoperative and after subdural burr-hole operation.

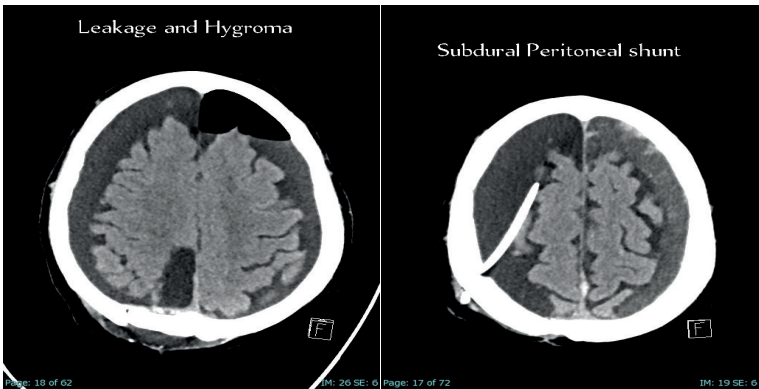


Figure 3. CT scan showing leakage and hygroma and subdural peritoneal shunt.

2. Discussion

Findings of the present study is consistent with previous reports indicating that NSCLC is a major contributor to brain metastases. (Bender & Tomé, 2011) demonstrated that nearly 25% of metastases were located in the cerebellum, while (Quattrocchi et al., 2012) observed frequent involvement of both the occipital lobes and cerebellum. Similarly, (Schroeder et al., 2020) confirmed that infratentorial localization is more common, highlighting a recurring pattern across multiple studies. In contrast to these reports, the current case demonstrated tumor development at right parietal lobe. Interestingly, (G. Wang et al., 2019) noted that adenocarcinomas which are not of NSCLC origin develops in the right parietal lobe with 182 out of 335 patients affected. This suggest that while posterior fossa involvement is characteristics for NSCLC metastases, alternative metastatic patterns may occur, particularly depending on histologic subtype.

The management of brain metastases from non-small-cell lung cancer (NSCLC) is multifaceted, often requiring both surgical and medical interventions tailored to the individual patient's clinical presentation. In this case, the patient presented with focal seizures—a common yet non-specific neurological symptom that affects approximately 10–25% of individuals with brain metastases (Arnold & Patchell, 2001). Preoperative imaging revealed raised intracranial pressure and significant peritumoral oedema, for which corticosteroids were initiated. This approach is well supported by the congress of neurological surgeons systematic review and evidence-based guidelines on the role of steroids in the treatment of adults with metastatic brain tumor, as dexamethasone remains a first-line treatment to control cerebral oedema and reduce intracranial hypertension (Ryken et al., 2019).

However, the use of corticosteroids, particularly at high doses, must be approached with caution in patients scheduled to receive immune checkpoint inhibitors (ICIs). Studies have shown that systemic steroids, especially when used prior to or concurrently with ICIs such as anti-PD-1 or anti-PD-L1 agents, may impair therapeutic efficacy by dampening the immune response (Arbour et al., 2018; Chang et al., 2019). In our patient, dexamethasone was used preoperatively. Prior treatment of metastasis with adjuvant radiotherapy followed by immunotherapy is in line with previous report (T. Wang et al., 2024); the study indicates that combining immune checkpoint inhibitors with brain radiotherapy yields superior overall survival in NSCLC patients with brain metastases compared to chemotherapy plus brain radiotherapy but key questions remain regarding the optimal timing of radiotherapy and ICIs administration, the impact of different radiotherapy modalities on combination outcomes, and the potential for increased treatment-related toxicities.

However, the hydrocephalus developed by the patient might be due to long-term effects of previous adjuvant radiotherapy after the first tumor resection. As reported by (Dawley, Rana, Abou-Al-Shaar, Goenka, & Schulder, 2019) their patient developed progressive behavioral changes, cognitive deterioration, and hydrocephalus after treatment with adjuvant radiotherapy.

After the second brain tumor resection, the patient was subsequently treated with pembrolizumab, a monoclonal anti-PD-1 antibody, due to high tumor PD-L1 expression ($\geq 50\%$), which is present in roughly 23–28% of patients with advanced NSCLC (Garon et al., 2015; Herbst et al., 2016). Pembrolizumab has demonstrated significant intracranial activity in this subgroup, with a reported response rate of 33% in brain-metastatic NSCLC (Goldberg et al., 2016). This clinical decision aligns with existing literature and reflects a growing

consensus favouring ICI use in PD-L1-positive NSCLC patients with CNS involvement.

Despite its benefits, the introduction of ICIs has brought a new set of clinical challenges. Our patient developed bradycardia, atrial fibrillation, status epilepticus, an unusual finding possibly due to loss of brain elasticity from previous treatments—potentially representing a novel or underreported irAE's. While myositis is one of the better-characterized neurological irAE's, particularly with PD-1/PD-L1 blockade (Johnson et al., 2019; Marini et al., 2021), the broader spectrum of irAE's continues to evolve with clinical experience.

Immune-related adverse events are increasingly recognized as a common consequence of ICI therapy, particularly when agents are used in combination or over prolonged periods. Neurological, cardiovascular, and hematologic toxicities tend to be more frequently associated with PD-1/PD-L1 inhibitors, while gastrointestinal and cutaneous irAEs are more common with CTLA-4 inhibitors (Casagrande et al., 2024). The timing of these irAE's can vary significantly, often appearing weeks to months after treatment initiation (Ramos-Casals et al., 2020; Sharma & Allison, 2015; Wei, Duffy, & Allison, 2018), necessitating ongoing vigilance even after therapy has commenced.

This case further emphasizes the need for a multidisciplinary approach in managing patients with brain metastases, especially those receiving systemic therapies. Coordination between oncologists, neurosurgeons, neurologists, and immunologists is essential not only to tailor treatments but also to anticipate and manage potential complications effectively (Suh et al., 2020). Our patient's complex clinical course—including subdural hygroma and post-surgical hydrocephalus—reflects the intricate interplay of surgical outcomes, tumor biology, and immunological dynamics while bradycardia,

status epilepticus, lung infection and atrial fibrillation started after immunotherapy initiation.

In conclusion, while immunotherapy has revolutionized the treatment paradigm for NSCLC with brain metastases, it brings forth unique risks that demand close monitoring and proactive management.

Conclusion

In summary, this case illustrates both the therapeutic potential and challenges associated with management modalities in patients with brain metastases. While surgery, radiotherapy and use of ICIs such as pembrolizumab offer promising intracranial control, they are also associated with a broad spectrum of complications—some expected, others less well-documented, as in this report. As the clinical use of ICIs continues to expand, further research is necessary to characterize rare toxicities, improve early detection, and refine management strategies.

References

- Arbour, K. C., Mezquita, L., Long, N., Rizvi, H., Auclin, E., Ni, A., ... Hendriks, L. E. L. (2018). Impact of baseline steroids on efficacy of programmed cell death-1 and programmed death-ligand 1 blockade in patients with non-small-cell lung cancer. *Journal of Clinical Oncology*, 36(28), 2872–2878.
- Arnold, S. M., & Patchell, R. A. (2001). Diagnosis and management of brain metastases. *Hematology/Oncology Clinics*, 15(6), 1085–1108.
- Bender, E. T., & Tomé, W. A. (2011). Distribution of brain metastases: Implications for non-uniform dose prescriptions. *The British Journal of Radiology*, 84(1003), 649–658.
- Cagney, D. N., Martin, A. M., Catalano, P. J., Redig, A. J., Lin, N. U., Lee, E. Q., ... Weiss, S. E. (2017). Incidence and prognosis of patients with brain metastases at diagnosis of systemic malignancy: A population-based study. *Neuro-Oncology*, 19(11), 1511–1521.

- Cardinal, T., Pangal, D., Strickland, B. A., Newton, P., Mahmoodifar, S., Mason, J., ... Yu, M. (2022). Anatomical and topographical variations in the distribution of brain metastases based on primary cancer origin and molecular subtypes: A systematic review. *Neuro-Oncology Advances*, 4(1), 1–12.
- Casagrande, S., Sopetto, G. B., Bertalot, G., Bortolotti, R., Racanelli, V., Caffo, O., ... Vecchia, A. (2024). Immune-related adverse events due to cancer immunotherapy: Immune mechanisms and clinical manifestations. *Cancers*, 16(7), 1–30.
- Chang, S. M., Messersmith, H., Ahluwalia, M., Andrews, D., Brastianos, P. K., Gaspar, L. E., ... Lassman, A. B. (2019). Anticonvulsant prophylaxis and steroid use in adults with metastatic brain tumors: ASCO and SNO endorsement of the congress of neurological surgeons guidelines. *Journal of Clinical Oncology*, 37(13), 1130–1135.
- Dawley, T., Rana, Z., Abou-Al-Shaar, H., Goenka, A., & Schulder, M. (2019). Major complications from radiotherapy following treatment for atypical meningiomas. *Neurosurgical Focus*, 46(6), 1–8.
- Ernani, V., & Stinchcombe, T. E. (2019). Management of brain metastases in non–small-cell lung cancer. *Journal of Oncology Practice*, 15(11), 563–570.
- Farina, A., Villagrán-García, M., Vogrig, A., Zekeridou, A., Muñiz-Castrillo, S., Velasco, R., ... Honnorat, J. (2024). Neurological adverse events of immune checkpoint inhibitors and the development of paraneoplastic neurological syndromes. *The Lancet Neurology*, 23(1), 81–94.
- Garon, E. B., Rizvi, N. A., Hui, R., Leighl, N., Balmanoukian, A. S., Eder, J. P., ... Horn, L. (2015). Pembrolizumab for the treatment of non–small-cell lung cancer. *New England Journal of Medicine*, 372(21), 2018–2028.
- Goldberg, S. B., Gettinger, S. N., Mahajan, A., Chiang, A. C., Herbst, R. S., Sznol, M., ... Jilaveanu, L. (2016). Pembrolizumab for patients with melanoma or non-small-cell lung cancer and untreated brain metastases: Early analysis of a non-randomised, open-label, phase 2 trial. *The Lancet Oncology*, 17(7), 976–983.

- Herbst, R. S., Baas, P., Kim, D.-W., Felip, E., Pérez-Gracia, J. L., Han, J.-Y., ... Ahn, M.-J. (2016). Pembrolizumab versus docetaxel for previously treated, PD-L1-positive, advanced non-small-cell lung cancer (KEYNOTE-010): A randomised controlled trial. *The Lancet*, 387(10027), 1540–1550.
- Johnson, D. B., Manouchehri, A., Haugh, A. M., Quach, H. T., Balko, J. M., Lebrun-Vignes, B., ... Salem, J.-E. (2019). Neurologic toxicity associated with immune checkpoint inhibitors: A pharmacovigilance study. *Journal for Immunotherapy of Cancer*, 7(1), 1–9.
- Marini, A., Bernardini, A., Gigli, G. L., Valente, M., Muñoz-Castrillo, S., Honnorat, J., & Vogrig, A. (2021). Neurologic adverse events of immune checkpoint inhibitors: A systematic review. *Neurology*, 96(16), 754–766.
- Nayak, L., Lee, E. Q., & Wen, P. Y. (2012). Epidemiology of brain metastases. *Current Oncology Reports*, 14(1), 48–54.
- Patchell, R. A., Tibbs, P. A., Regine, W. F., Dempsey, R. J., Mohiuddin, M., Kryscio, R. J., ... Young, B. (1998). Postoperative radiotherapy in the treatment of single metastases to the brain: A randomized trial. *JAMA*, 280(17), 1485–1489. <https://doi.org/10.1001/jama.280.17.1485>
- Patchell, R. A., Tibbs, P. A., Walsh, J. W., Dempsey, R. J., Maruyama, Y., Kryscio, R. J., ... Young, B. (1990). A randomized trial of surgery in the treatment of single metastases to the brain. *New England Journal of Medicine*, 322(8), 494–500.
- Quattrocchi, C. C., Errante, Y., Gaudino, C., Mallio, C. A., Giona, A., Santini, D., ... Zobel, B. B. (2012). Spatial brain distribution of intra-axial metastatic lesions in breast and lung cancer patients. *Journal of Neuro-Oncology*, 110(1), 79–87.
- Ramos-Casals, M., Brahmer, J. R., Callahan, M. K., Flores-Chávez, A., Keegan, N., Khamashta, M. A., ... Suárez-Almazor, M. E. (2020). Immune-related adverse events of checkpoint inhibitors. *Nature Reviews Disease Primers*, 6(38), 1–21.
- Ribas, A., & Wolchok, J. D. (2018). Cancer immunotherapy using checkpoint blockade. *Science*, 359(6382), 1350–1355.
- Ryken, T. C., Kuo, J. S., Prabhu, R. S., Sherman, J. H., Kalkanis, S. N., & Olson, J. J. (2019). Congress of neurological surgeons syste-

- matic review and evidence-based guidelines on the role of steroids in the treatment of adults with metastatic brain tumors. *Neurosurgery*, 84(3), E189–E191.
- Schroeder, T., Bittrich, P., Kuhne, J. F., Noebel, C., Leischner, H., Fiehler, J., ... Gellissen, S. (2020). Mapping distribution of brain metastases: Does the primary tumor matter? *Journal of Neuro-Oncology*, 147(1), 229–235.
- Sharma, P., & Allison, J. P. (2015). Immune checkpoint targeting in cancer therapy: Toward combination strategies with curative potential. *Cell*, 161(2), 205–214.
- Suh, J. H., Kotecha, R., Chao, S. T., Ahluwalia, M. S., Sahgal, A., & Chang, E. L. (2020). Current approaches to the management of brain metastases. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 17(5), 279–299.
- Wang, G., Xu, J., Qi, Y., Xiu, J., Li, R., & Han, M. (2019). Distribution of brain metastasis from lung cancer. *Cancer Management and Research*, 11, 9331–9338.
- Wang, T., Li, R., Liu, S., Wu, Q., Ouyang, W., & Xie, C. (2024). The effects of immune checkpoint inhibitors vs. chemotherapy combined with brain radiotherapy in non-small cell lung cancer patients with brain metastases. *BMC Cancer*, 24(1), 1343.
- Wei, S. C., Duffy, C. R., & Allison, J. P. (2018). Fundamental mechanisms of immune checkpoint blockade therapy. *Cancer Discovery*, 8(9), 1069–1086.
- Yshii, L. M., Hohlfeld, R., & Liblau, R. S. (2017). Inflammatory CNS disease caused by immune checkpoint inhibitors: Status and perspectives. *Nature Reviews Neurology*, 13(12), 755–763.

Persistent Non-communicable Diseases among Nigerian Population and Possible Solutions

Umar Muazu YUNUSA, Yau MUKHTAR

Özet: Bulaşıcı olmayan hastalıklar (BOH), özellikle hipertansiyon ve obezite, Nijerya'da giderek yaygınlaşmakta ve kardiyovasküler hastalıkların artışında önemli risk faktörleri oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı hipertansiyon ve obezitenin havuzlanmış prevalansını belirlemek ve olası çözüm önerilerinde bulunmaktır. Nijerya'da hipertansiyonun obezite ile/olmadan prevalansını bildiren güncel çalışmalar (2023–2025) çevrimiçi veri tabanlarından sistematik olarak tarandı ve PRISMA-P (Systematic Review and Meta-Analysis Protocols için Tercih Edilen Raporlama Öğeleri) protokolüne göre incelendi. Meta-analiz R yazılımı ile gerçekleştirildi. Ulusal havuzlanmış prevalans ve %95 GA rastgele etkiler modeli ile belirlendi. Yayın yanlılığı görsel olarak huni grafiği ile, matematiksel olarak ise heterojenlik için üç istatistik (Cochran'ın Q testi, τ^2 ve I^2) ile değerlendirildi. Toplam 22 çalışma ve 15802 katılımcı (5988 erkek ve 9814 kadın) meta-analize dâhil edildi. Nijerya nüfusunda hipertansiyon prevalansı %30,8'dir (%95 GA: %29,2–32,3; SH $\pm$ 0,8; I^2 = %71,8; Q = 74,36). Cinsiyete özgü analiz, erkeklerde hipertansiyon prevalansının (%31,2; %95 GA: %28,3–34,1; standart hata-SH: $\pm$ 1,39; I^2 = %79,6; Q = 93,36) kadınlara göre (%29,2; %95 GA: %27,0–31,5; SH $\pm$ 1,40; I^2 = %79,4; Q = 101,95) daha yüksek olduğunu ortaya koydu. Nijerya'da obezite prevalansı %22,4'tür (%95 GA: %20,2–24,6; SH $\pm$ 1,21; I^2 = %76,4; Q = 42,37). Bu çalışmanın bulguları, Nijerya'da hipertansiyon ve obezitenin yüksek prevalansa sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, BOH'lerin artan etkisini ele almak için güçlendirilmiş sürveyans ve hedeflenmiş halk sağlığı müdahalelerine ihtiyaç olduğunu önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Prevalans, Bulaşıcı Olmayan Hastalıklar, Hipertansiyon, Obezite, Nijerya.

Abstract: Non-communicable diseases (NCDs), notably hypertension and obesity, are increasingly prevalent in Nigeria and represent significant risk factors driving the rising incidence of cardiovascular diseases. The objective of the study is to determine the pooled prevalence of hypertension and obesity and recommends possible solutions. Recent studies (2023–2025) reporting prevalence of hypertension with/without obesity in a Nigerian setting were systematically searched from online databases and screened following the Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols (PRISMA-P). Meta-analysis was conducted with R software. National pooled prevalence and 95% CI were determined by random effect model. Publication bias were determined visually using funnel plot and mathematically using three quantifying statistics for heterogeneity Cochran's Q test, τ^2 , and I^2 . A total of 22 studies involving 15802 participants (5988 males and 9814 females) were included in the meta-analysis. The prevalence of hypertension in the Nigerian population is 30.8% (95% CI: 29.2–32.3%; standard error-SE: $\pm 0.8\%$; $I^2 = 71.8\%$; $Q = 74.36$). Gender-specific analysis for hypertension revealed a higher prevalence among males (31.2%, 95% CI: 28.3–34.1%; SE $\pm 1.39\%$; $I^2 = 79.6\%$; $Q = 93.36$) than females (29.2%, 95% CI: 27.0–31.5%; SE $\pm 1.40\%$; $I^2 = 79.4\%$; $Q = 101.95$). The prevalence of obesity in Nigeria is 22.4% (95% CI: 20.2–24.6%; SE $\pm 1.21\%$; $I^2 = 76.4\%$; $Q = 42.37$). The findings of this study suggest a high prevalence of hypertension and obesity in Nigeria. This study recommends the need for strengthened surveillance and targeted public health interventions to address the growing impact of NCDs in Nigeria.

Keywords: Prevalence, Non-communicable Diseases, Hypertension, Obesity, Nigeria.

1. Introduction

Non-communicable diseases (NCDs) are chronic medical conditions that cannot be transmitted from one person to another, including autoimmune disorders, stroke, cardiovascular diseases, Alzheimer's disease, cataracts, various forms of cancer, diabetes, obesity, and hypertension (World Health Organization, 2024). They are characterized by a long latency period, a prolonged progression over time, potential functional impairment or disability, and are often incurable (Piovani, Nikolopoulos, & Bonovas, 2022). NCDs are a growing global health concern and a leading cause of death globally, causing widespread mortality and placing heavy social, economic, and healthcare burdens on individuals, families, and public health institutions (Asuquo, Udah, & Etokidem, 2014). Hypertension and obesity are major contributor to the development of cardiovascular diseases, including coronary

artery disease, heart failure, stroke, and increased mortality risk, and reported to affects over one billion adults globally (Carey, Moran, & Whelton, 2022).

In developing countries like Nigeria, the burden of NCDs is rising significantly. The persistence of NCDs is driven by multiple interconnected factors, including rapid urbanization, unhealthy lifestyles, low awareness, and a fragile health-care system (Goswami, 2024). Combating the burden of NCDs requires a comprehensive, multi-sectoral response involving government, civil society, healthcare providers, and the general population to implement targeted interventions that effectively reduce the disease's impact and improve overall health outcomes (World Health Organization, 2024).

To contribute to this, the present study aims to determine the prevalence of two persistent non-communicable diseases (hypertension and obesity) among the Nigerian population, as well as explore possible solutions. The two NCDs examined in this study are interrelated; for instance, obesity is a well-established risk factor for the development of hypertension.

1.1. Case Definitions

1.1.1. Hypertension

Hypertension is characterized by a sustained elevation in blood pressure. The Seventh Report of the Joint National Committee on Prevention, Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure (JNC 7) (Chobanian et al., 2003) defines Hypertension as follows: Systolic/diastolic blood pressure (BP) of <120/80 mmHg as normotensive (normal), Systolic/diastolic of 120-139/80-89mmHg as prehypertension, or Systolic/diastolic of $\geq 140 / \geq 90$ mmHg as hypertension.

1.1.2. Obesity

Obesity is a complex disease characterized by excessive adiposity that adversely affects health. It is commonly identified using the body mass index (BMI), calculated as weight (kg) divided by the square of height (m²) (World Health Organization, 2025). The European Association for the Study of Obesity (The European Association for the Study of Obesity, 2025) defines overweight and obesity in adults as follows: BMI of 25.0 to 29.9 kg/m² is defined as overweight, BMI of 30.00 to 34.99 kg/m² is defined as Class 1, BMI of 35.00 to 39.99 kg/m² is defined as Class 2 (moderate), or BMI of 40.00 kg/m² or higher is defined as Class 3 (severe).

1.2. Scopes of the Study

To determine the National pooled prevalence of hypertension in the Nigerian population through a meta-analysis of recent studies (2023–2025). To determine prevalence hypertension in male gender, and in female gender. To determine prevalence of obesity in the Nigerian population that concurrently reported both obesity and hypertension. And to explore possible solutions.

1.3. Practical Implication of the Study

Understanding the prevalence of hypertension and obesity in Nigeria is essential for policymakers to design and implement effective public health interventions.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

Nigeria is a lower middle-income country with an area of 923,770 km² structured in to 36 states + Abuja capital. The World Population Dashboard of the United Nations

Population Fund estimated the Nigeria's population in 2025 as approximately 237.5 million (United Nations Population Fund, 2025).

2.2. Data Search and Strategy

A systematic literature search was performed in African Journals Online, Embase, Google Scholar, PubMed, Scopus, and Web of Science to identify relevant studies published between January 2023 and August 2025 using pre-defined Medical Subject Headings (MeSH) terms "non-communicable diseases," "prevalence of hypertension," "prevalence of obesity," "Nigeria," with Boolean operators "AND" and "OR" to combine search terms for a comprehensive search strategy that included all fields within records and MeSH terms. Information like first author last name, publication year, study design, state where the study was conducted, gender distribution, sample size, number of cases, and reported prevalence were extracted in a Microsoft Excel.

2.3. Quality Appraisal of the Included Studies

The quality of the studies was assessed using the National Institutes of Health (NIH) quality assessment tool for observational cohort and cross-sectional studies (Musa, Elyamani, & Dergaa, 2022). Only studies with a good quality grade were included in this meta-analysis.

2.4. Selection Criteria

Recent studies (2023–2025) reporting prevalence of hypertension with/without prevalence of obesity in a Nigerian setting were selected. Titles and abstracts of the retrieved studies were initially screened for relevance based on their objectives, methodology, and quality appraisal following the

Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols (PRISMA-P) (Moher et al., 2015).

2.5. Inclusion Criteria

Study was selected if it met the following criteria: (1) reported the prevalence of hypertension with/without obesity in a Nigerian setting between 2023–2025; (2) defined hypertension according to guideline of The Seventh Report of the Joint National Committee on Prevention, Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure (JNC 7); (4) defined obesity according to guideline of The European Association for the Study of Obesity; and (5) showed good quality appraisal based on NIH quality assessment tool for observational cohort and cross-sectional studies.

2.6. Exclusion Criteria

Study was excluded if: (1) it was conducted on Nigerians in diaspora; (2) its full-text was not accessible at the time of the search; (3) it has low quality appraisal; and/or (4) if it is a review, editorial, viewpoint, or commentary.

2.7. Meta-analysis with R Software

Meta-analysis was conducted with The R Project for Statistical Computing software (version 4.5.1). Forest and funnel plots were generated with the R software.

2.8. Publication Bias Assessment

The publication bias among included studies was determined visually using funnel plot and mathematically using three quantifying statistics for heterogeneity Cochran's Q test, τ^2 , and I^2 .

2.9. Hypothesis Testing

2.9.1. Hypertension

Null Hypothesis (H_0): Hypertension prevalence is similar between studies ($p > 0.05$; or $\tau^2 = 0$).

Alternative Hypothesis (H_1): The difference in hypertension prevalence between studies is statistically significant ($p < 0.05$; or $\tau^2 > 0$).

2.9.2. Obesity

H_0 : Obesity prevalence is similar between studies ($p > 0.05$; or $\tau^2 = 0$).

H_1 : The difference in obesity prevalence between studies is statistically significant ($p < 0.05$; or $\tau^2 > 0$).

3. Results

3.1. Study Selection

Figure 1 shows the results of the search strategy. The search yielded a total 639 articles from various databases: African Journals Online (87), Embase (46), Google Scholar (256), PubMed (134), Scopus and Web of Science (115). After rigorous screening as per PRISMA-P guideline, 22 publications were included in the meta-analysis.

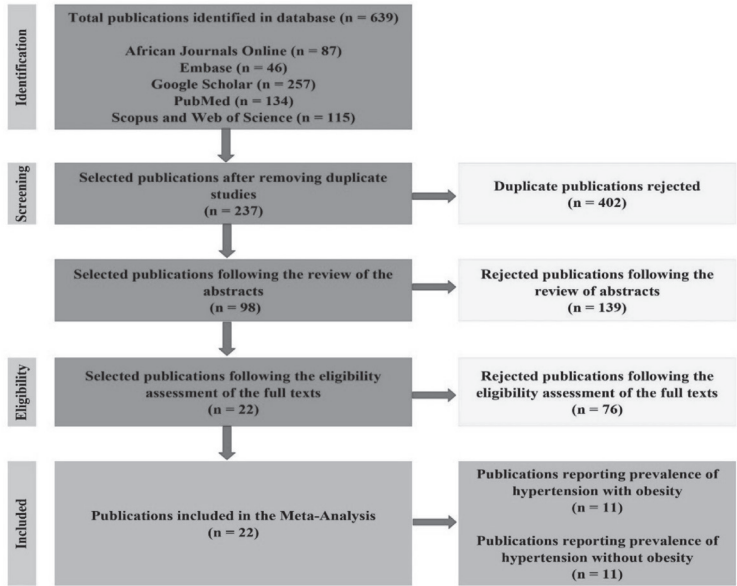


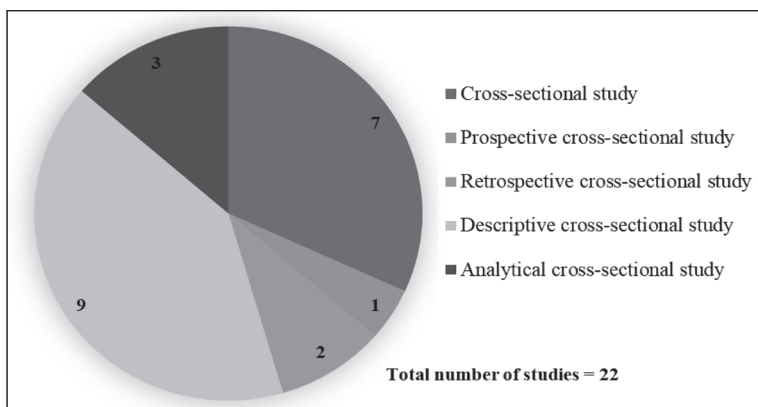
Figure 1. Flow diagram illustrating the data search and study selection following PRISMA-P guideline.

3.2. General Characteristics of the Included Studies

Table 1 presents the characteristics of the 22 studies included in the meta-analysis. A total of 15,802 participants were enrolled across these studies, comprising 5,988 males (37.9%) and 9,814 females (62.1%). Hypertension was identified in 4,891 individuals (1,866 males and 3,025 females). Furthermore, 11 of the 22 studies reported obesity alongside hypertension, with a total of 1,586 obesity cases documented. **Figure 2** depicts the study designs: most studies (9) were descriptive cross-sectional, while only 1 employed a prospective cross-sectional design.

Table 1. General characteristics of the included studies.

Author	Location	Sample size			Hypertension Cases			Obesity Cases
		Total	M	F	Total	M	F	Total
Ezeala-Adikaibe 2023	Enugu	1082	387	695	299	113	186	
Ibirongbé 2023	Oyo	400	371	29	137	133	4	
Ogboye 2023	Abuja	639	0	639	230	0	230	176
Adeniyi 2023	Osun	143	56	87	43	13	30	36
Ibrahim 2023	Jigawa	361	223	138	116	76	40	
Eze 2024	Ebonyi	120	83	37	31	28	3	
Ukangwa 2025	Ogun	238	0	238	56	0	56	59
Adeke 2024	Nigeria	3782	1654	2128	1080	419	661	
Egwim 2024	Imo	257	135	122	89	43	46	44
Nwevo 2024	Cross River	427	151	276	138	44	94	117
Fajola 2024	Delta	1597	533	1064	516	218	298	356
Ige 2025	Kwara	246	80	166	58	16	42	
Akanbi 2025	Oyo	266	145	121	76	48	28	40
Anuli 2024	Imo	380	161	219	136	58	78	86
Okwara 2025	Enugu	605	158	447	217	48	169	
Ayadi 2025	Ondo	420	164	256	117	33	84	95
Shogade 2024	Akwa-Ibom	2676	842	1834	908	297	611	523
Paulmiki-Ide 2024	Cross River	500	230	270	133	72	61	
Cookey 2024	Rivers	1116	468	648	343	157	186	
Ebereghwa 2024	Delta	222	83	139	64	30	34	54
Okafor 2024	Enugu	200	34	166	65	6	59	
Sadiq 2024	Jigawa	125	30	95	39	14	25	
	Total	15,802	5,988	9,814	4,891	1,866	3,025	1,586

**Figure 2.** Study designs employed.

3.3. National Pooled Prevalence of Hypertension

The national pooled prevalence of hypertension was estimated using a random-effects model in R software. As shown in the forest plot (Figure 3), the overall prevalence of hypertension in Nigerian population was 30.8% (95% CI: 29.2–32.3%; Standard Error ±0.8%). By gender, the pooled prevalence was 31.2% (95% CI: 28.3–34.1%; SE ±1.39%) among males (Figure 4) and 29.2% (95% CI: 27.0–31.5%; SE ±1.40%) among females (Figure 5).

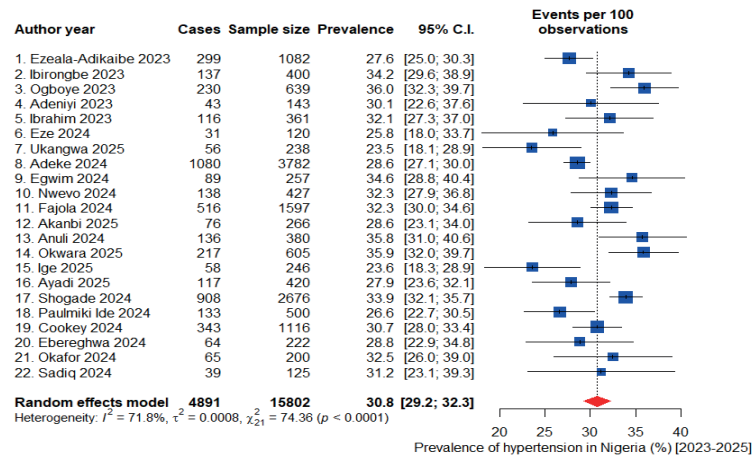


Figure 3. A forest plot of random effects model showing national pooled prevalence of hypertension in Nigeria (male and female).

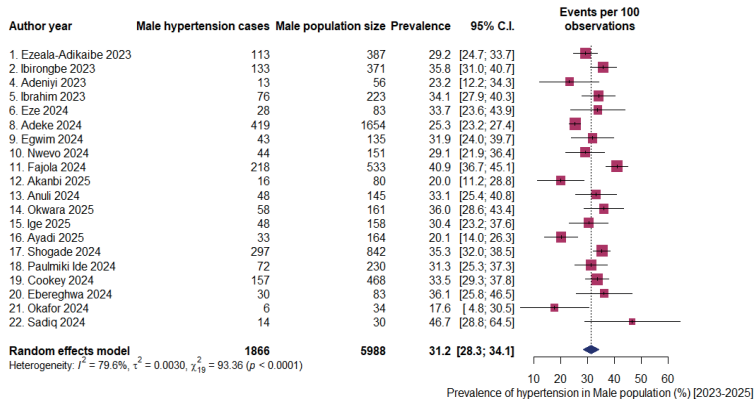


Figure 4. A forest plot showing prevalence of hypertension in Male gender.

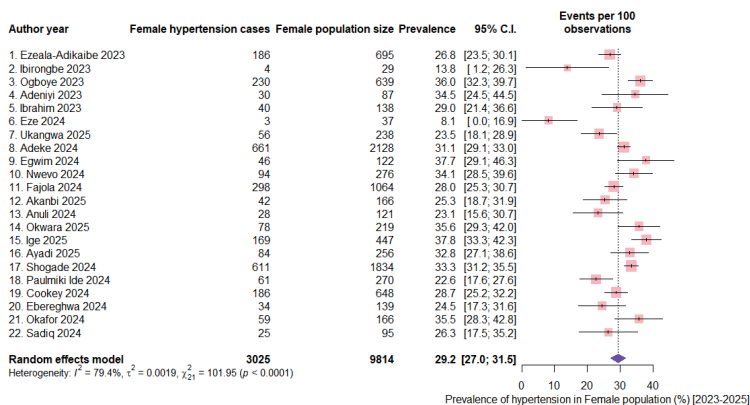


Figure 5. A forest plot showing prevalence of hypertension in Nigerian Female gender.

3.4. National Pooled Prevalence of Obesity

A forest plot of random effects model showing national pooled prevalence of obesity in Nigeria is presented in **Figure 6**. The overall prevalence was estimated at 22.4% (95% CI: 20.2–24.6%; SE $\pm 1.21\%$).

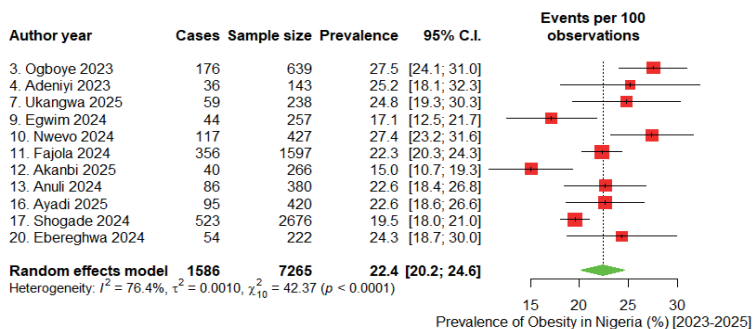


Figure 6. A forest plot showing national pooled prevalence of obesity.

3.5. Publication Bias Assessment

Figure 7 shows the funnel plot of the national pooled prevalence of hypertension in Nigeria. Within the 90% CI ($0.05 < p \leq 1.0$), the 22 studies were evenly distributed, with 11 on each side of the reference line, indicating symmetry.

At the 95% CI ($0.0 < p \leq 0.05$), however, 6 studies fell to the left and 7 to the right of the reference line, suggesting slight asymmetry with minor publication bias. **Figure 8** shows an asymmetrical funnel plot for the prevalence of hypertension among Nigerian males, with most publications clustered on the right side. Additionally, **Figure 9** depicts an asymmetrical funnel for the prevalence of hypertension among Nigerian females, with most publications scattered toward the left. Furthermore, **Figure 10** illustrates an asymmetrical funnel of the 11 publications reporting the pooled prevalence of obesity in Nigeria, with publications predominantly scattered toward the right. Overall, all the funnel plots visibly indicate potential bias among the studies included in the meta-analysis.

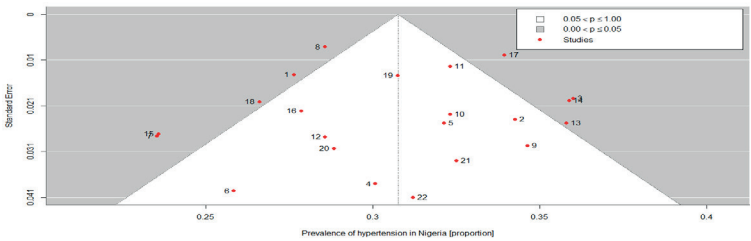


Figure 7. A funnel plot of national pooled prevalence of hypertension in Nigeria.

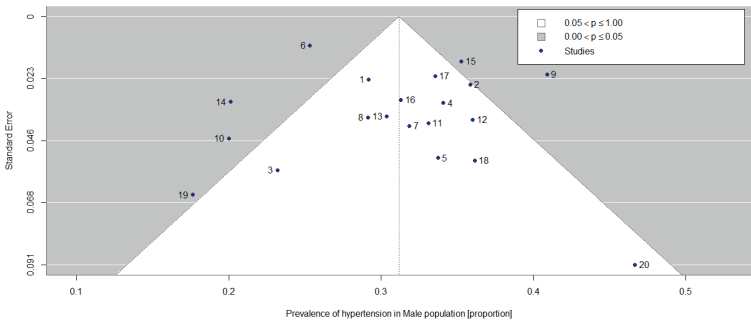


Figure 8. A funnel plot of hypertension prevalence in Male gender.

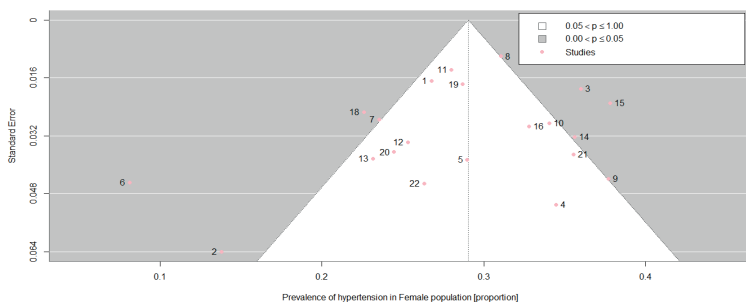


Figure 9. A funnel plot of hypertension prevalence in Female gender.

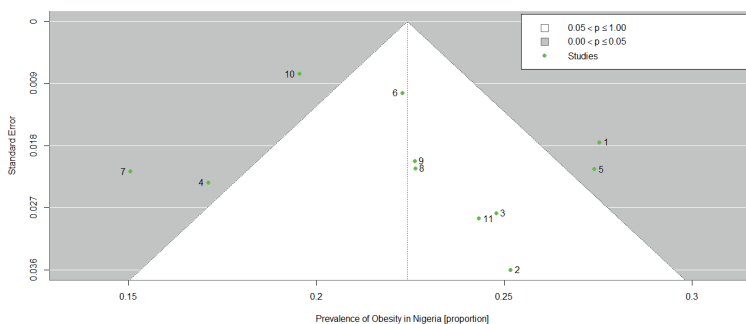


Figure 10. A funnel plot of national pooled prevalence of obesity in Nigeria.

The Cochran's Q , τ^2 , and I^2 statistics for heterogeneity were calculated using a random-effects model. This model assumes that true effect sizes vary across studies and follow a normal distribution, accounting for both within-study and between-study variances (Wang, 2023). As shown in **Table 2**, a moderate I^2 of 71.8% (95% CI: 47.47–88.10%) with significant heterogeneity ($p < 0.0001$) was observed among studies reporting the prevalence of hypertension in Nigeria. According to Wang (2023), heterogeneity is typically classified as low, moderate, or high when I^2 values reach approximately 25%, 50%, and 75%, respectively. Furthermore, since $\tau^2 \neq 0$ and the Q -statistic/ χ^2 ($df = 21$) of 74.36 exceeded the critical χ^2 value at the 95% CI (32.671), the null hypothesis is rejected and conclude that the effect sizes are heterogeneous. This suggests considerable variation in the reported prevalence of hypertension across the studies included in this meta-analysis. Moreover,

the Cochran’s Q, τ^2 , and I^2 values demonstrated significant variations ($p<0.0001$) in the male hypertension, the female hypertension, and the general obesity.

Table 2. Publication bias assessment by Cochran’s Q, τ^2 , and I^2 values.

Hypertension in general population					
	Estimate	95% confidence interval		SE	Hypothesis testing Remarks
		Lower bound	Upper bound		
τ^2	0.0008	0.0003	0.0024		1. $\tau^2 > 0$ implies effect sizes heterogeneity between-study 2. $I^2 < 75\%$ implies moderate heterogeneity between-study 3. $p<0.05$ 4. H_0 : is rejected 5. H_1 : is accepted
H^2	3.78	1.90	8.40		
I^2 (%)	71.8	47.47	88.10		
Pooled prevalence	30.8	29.2	32.3	0.8	
Q-statistic	74.36				
p-value	<0.0001				
Hypertension in male gender					
τ^2	0.003	0.0011	0.0081		6. $\tau^2 > 0$ 7. $I^2 > 75\%$ implies considerable heterogeneity 8. $p<0.05$ 9. H_0 : is rejected 10. H_1 : is accepted
H^2	4.27	2.37	11.53		
I^2 (%)	79.6	57.86	91.33		
Pooled prevalence	31.2	28.3	34.1	1.39	
Q-statistic	93.36				
p-value	<0.0001				
Hypertension in female gender					
τ^2	0.0019	0.0017	0.0098		11. $\tau^2 > 0$ 12. $I^2 > 75\%$ implies considerable heterogeneity 13. $p<0.05$ 14. H_0 : is rejected 15. H_1 : is accepted
H^2	7.64	4.47	20.49		
I^2 (%)	79.4	77.64	95.12		
Pooled prevalence	29.2	27.0	31.5	1.40	
Q-statistic	101.95				
p-value	<0.0001				
Obesity in general population					
τ^2	0.0010	0.0003	0.0044		16. $\tau^2 > 0$ 17. $I^2 > 75\%$ implies considerable heterogeneity 18. $p<0.05$ 19. H_0 : is rejected 20. H_1 : is accepted
H^2	4.86	2.04	15.82		
I^2 (%)	76.4	51.06	93.68		
Pooled prevalence	22.4	20.2	24.6	1.21	
Q-statistic	42.37				
p-value	<0.0001				

SE: standard error

4. Discussion

NCDs, particularly hypertension and obesity, continue to pose a significant global health challenge, with the burden disproportionately affecting developing countries such as Nigeria. This study conducted a meta-analysis to systematically synthesize recent evidence published between 2023–2025 on the prevalence of hypertension with/without obesity in Nigeria. The analysis further explored gender-specific disparities in hypertension prevalence, providing a nuanced understanding of its epidemiological patterns.

The pooled prevalence of hypertension (30.8%) observed in this study is similar with two previous meta-analysis of Adelaye et al. (2021a) who reported a pooled prevalence of 30.6% for the period 1995–2020, and Adelaye et al. (2015) who estimated 28.9% for the period 1980–2013 (**Table 3**). Gender-specific analysis for hypertension revealed a higher prevalence among males (31.2%) than females (29.2%).

Similarly, the pooled prevalence of obesity (22.4%) indicates a rising trend compared with earlier reports (**Table 3**), underscoring the growing impact of lifestyle-related risk factors. Adelaye et al. (2021b) estimated 14.3% for the period 1990–2020, Chukwuonye et al. (2022) reported 14.5% for 2010–2020, and Ramalan et al. (2023) documented 15% for 2000–2018. Conversely, the current obesity prevalence is lower than the 39% reported by Bashir et al. (2022) for the period 1996–2021.

The differences observed between this study and earlier systematic reviews may be attributable to several methodological and contextual factors, including variations in study settings and the length of study periods. Importantly, some earlier studies (1980s) did not uniformly apply the current diagnostic threshold of 140/80 mmHg for defining hypertension. As a result, their reported prevalence estimates may

not be directly comparable with those obtained in more recent studies adhering to standardized diagnostic criteria. Furthermore, recent studies likely reflect the increasing influence of urbanization, dietary transitions, reduced physical activity, and demographic shifts, all of which are known to contribute to higher rates of hypertension and obesity. The findings point to the need for strengthened surveillance systems and gender-sensitive interventions that address both individual lifestyle behaviors and structural determinants of NCDs in Nigeria.

4.1. Strengths of the Study

Up-to-date evidence: This meta-analysis synthesizes studies published between 2023–2025, providing the most recent and comprehensive estimates of hypertension and obesity prevalence in Nigeria.

Multiple locations coverage: Inclusion of multiple studies across diverse regions of Nigeria increases the representativeness and generalizability of the findings.

Gender-specific analysis for hypertension: The study provides insights into gender disparities in hypertension prevalence, which can inform targeted public health interventions.

Systematic approach: Use of meta-analytic techniques and standardized data extraction ensures methodological rigor and reduces bias.

4.2. Limitation of the Study

Obesity gender-specific data: Most studies did not report obesity prevalence separately for males and females; therefore, a gender-specific analysis of obesity could not be conducted.

Table 3. Comparing this study with previous Meta-analysis.

Study period	NoS	Sample size	General population % (95 CI)	Male % (95 CI)	Female % (95 CI)	References
Hypertension						
1995-2020	53	78,949	30.60 (27.3–34.0)	29.5 (25.4–33.6)	30.4 (25.2–35.6)	Adeloye 2021a
1980-2013	27	27,122	28.9 (25.1–32.8)	29.5 (24.8 –34.3)	25.0 (20.2–29.7)	Adeloye 2015
2000-2009	21	24,096	22.5 (21.8–23.2)			Ogah 2012
2023-2025	22	15,802	30.8 (29.2–32.3)	31.2 (28.3–34.1)	29.2 (27.0–31.5)	This study
Obesity						
1990-2020	35	52,816	14.3 (12.0–15.5)			Adeloye 2021b
1996-2021	18	21,859	39 (25–54)			Bashir 2022
2010-2020	33	37,205	14.5 (11.8–17.4)			Chukwuonye 2022
2000-2018	77	107,781	15 (13.0–16.0)			Ramalan 2023
2023-2025	11	7265	22.4 (20.2–24.6)			This study

NoS: Number of studies

4.3. Proposed Solutions

NCDs such as hypertension and obesity are placing an increasing strain on already fragile Nigeria's healthcare system. Despite some progress in combating these conditions, major challenges remain.

- To effectively address the growing burden of NCDs, the Nigerian government must strengthen the healthcare infrastructure by promoting early detection, improving access to essential medications, and implementing strategies that target modifiable lifestyle risk factors.
- It is crucial for Nigeria to adopt the World Health Organization's Global Action Plan for the Prevention and Control of Noncommunicable Diseases (2013–2030), which outlines a strategic framework aimed at reducing premature deaths from NCDs by one-third by 2030 (World Health Organization, 2013).
- Meanwhile, innovations in digital health and artificial intelligence (AI) are reshaping how diseases are tracked and

analyzed. Tools such as the Global Health Observatory (GHO) and the HealthMap Project provide real-time surveillance and data analytics to monitor health trends and outbreaks (Goswami, 2024).

5. Conclusion

This study demonstrates a substantial burden of hypertension and obesity in Nigeria. With pooled prevalence of 30.8% for hypertension and 22.4% for obesity, the study points that approximately 31 out of every 100 Nigerians are living with hypertension, while about 22 out of every 100 are affected by obesity. Gender-specific analysis for hypertension revealed a higher prevalence among males (31.2%) compared with females (29.2%). Heterogeneity across studies may reflect variations in study location, study settings, participant gender. With these findings, this study recommends the need for strengthened surveillance and targeted public health interventions to address the growing impact of NCDs in Nigeria.

References

- Adeke, A. S., Chori, B. S., Neupane, D., Sharman, J. E., & Odili, A. N. (2024). Socio-demographic and lifestyle factors associated with hypertension in Nigeria: Results from a country-wide survey. *Journal of Human Hypertension*, 38(4), 365–370.
- Adeloye, D., Basquill, C., Aderemi, A. V., Thompson, J. Y., & Obi, F. A. (2015). An estimate of the prevalence of hypertension in Nigeria: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hypertension*, 33(2), 230–242.
- Adeloye, D., Ige-Elegbede, J. O., Ezejimofor, M., Owolabi, E. O., Ezeigwe, N., Omoyele, C., ... Gadanya, M. A. (2021). Estimating the prevalence of overweight and obesity in Nigeria in 2020: A systematic review and meta-analysis. *Annals of Medicine*, 53(1), 495–507.

- Adeloye, D., Owolabi, E. O., Ojji, D. B., Auta, A., Dewan, M. T., Olanrewaju, T. O., ... Mpazanje, R. G. (2021). Prevalence, awareness, treatment, and control of hypertension in Nigeria in 1995 and 2020: A systematic analysis of current evidence. *The Journal of Clinical Hypertension*, 23(5), 963–977.
- Adeniyi, O. A., Eniade, O. D., Olarinmoye, A. T., Abiodun, B. A., Okedare, O. O., Eniade, A. A., & Atolagbe, J. E. (2023). Prevalence and associated factors of hypertension among type 2 diabetes mellitus patients in LAUTECH Teaching Hospital, Osogbo, Nigeria. *African Health Sciences*, 23(4), 324–332.
- Akanbi, I. M., Aremu, A. O., Idowu, A., Bobo, T. I., Abolude, A. O., Oboh, A. O. T., ... Zakariah, P. (2025). Prevalence of hypertension and behavioral risk factors among adults in a rural community of Oyo State, Southwest Nigeria. *The Nigerian Health Journal*, 25(2), 637–648.
- Anuli, I., Jideuma, E., Frank, O., Chinonye, O., Chiagozie, N., Hope, I., & Victor, D. (2024). The burden of undiagnosed hypertension and associated risk factors among adults in a rural community in Imo State, South-East Nigeria. *International Journal of Clinical Medicine*, 15(2), 101–122.
- Asuquo, M. I., Udah, E. B., & Etokidem, A. (2014). Economic burden of hematologic malignancies in Calabar, Nigeria from the patient's perspective. *Journal of Clinical Oncology*, 32(15_suppl), e19525.
- Ayadi, A. O., Bello, C. B., Ayadi, A. A., Adeyemi, O., Okunnuga, N., Adedosu, A. N., ... Ogedengbe, A. (2025). Prevalence and associated risk factors of hypertension among adults in Akure-South Local Government Area, Akure, Ondo State, South-West Nigeria. *PAMJ Clinical Medicine*, 14, Article 48.
- Bashir, M. A., Yahaya, A. I., Muhammad, M., Yusuf, A. H., & Mukhtar, I. G. (2022). Prevalence of central obesity in Nigeria: A systematic review and meta-analysis. *Public Health*, 206, 87–93.
- Carey, R. M., Moran, A. E., & Whelton, P. K. (2022). Treatment of hypertension: A review. *JAMA*, 328(18), 1849–1861.
- Chobanian, A. V., Bakris, G. L., Black, H. R., Cushman, W. C., Green, L. A., Izzo, J. L., Jr., ... Wright, J. T., Jr. (2003). The seventh report of the Joint National Committee on Prevention, Detection,

- Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure: The JNC 7 report. *JAMA*, 289(19), 2560–2571.
- Chukwuonye, I. I., Ohagwu, K. A., Ogah, O. S., John, C., Oviasu, E., Anyabolu, E. N., ... Raphael, C. O. (2022). Prevalence of overweight and obesity in Nigeria: Systematic review and meta-analysis of population-based studies. *PLOS Global Public Health*, 2(6), e0000515.
- Cooke, S., Wakama, R., Asikimabo-Ofori, D., & Bonas, H. (2024). Prevalence of hypertension across geopolitical zones in Rivers State residents. *The Nigerian Health Journal*, 24(4), 1789–1798.
- Ebereghwa, E. M., Orhe, O. G., & Anyanwu, B. E. (2024). Blood pressure and associated risk factors of hypertension in patients attending a family medicine clinic in Delta State, Nigeria. *African Journal of Tropical Medicine and Biomedical Research*, 7(2), 7–19.
- Egwim, J., Omokhua, O., Azudialu, B., Igbonagwam, H., Oke, N., Amajo, U., & Ogunnaya, F. U. (2024). Prevalence, awareness and risk factors for hypertension in adults attending a tertiary hospital in South-East Nigeria. *Open Journal of Clinical Diagnostics*, 14(2), 7–24.
- Eze, C. O., & Okorie, M. (2024). Prevalence and pattern of selected cardiovascular disease risk factors amongst a cohort of public servants in Abakaliki, Nigeria. *Orient Journal of Medicine*, 36(1–2), 51–59.
- Ezeala-Adikaibe, B. A., Mbadiwe, C. N., Okafor, U. H., Nwobodo, U. M., Okwara, C. C., Okoli, C. P., ... Ezeme, M. S. (2023). Prevalence of hypertension in a rural community in southeastern Nigeria: An opportunity for early intervention. *Journal of Human Hypertension*, 37(8), 694–700.
- Fajola, A. O., Isara, A. O., Alali, A., Adetula, B., & Akenge, S. (2024). Prevalence and risk factors of hypertension and diabetes mellitus in riverine communities in Nigeria's Niger Delta: Implications for community-based interventions. *International Journal of Community Medicine and Public Health*, 11(3), 1038–1044.
- Goswami, N. (2024). A dual burden dilemma: Navigating the global impact of communicable and non-communicable diseases and

- the way forward. *International Journal of Medical Research*, 12(3), 65–77.
- Ibirongbe, D. O., Abioye, O. O., Adebimpe, W. O., & Asuzu, M. C. (2023). Prevalence and predictors of hypertension among army personnel in Adekunle Fajuyi Military Cantonment, Ibadan, Nigeria. *Epidemiology and Public Health*, 1(2), 1–5.
- Ibrahim, U. M., Jibo, A. M., Muazu, S., Zubairu, Z., Ringim, S. U., Namadi, F. A., ... Tsiga-Ahmed, F. I. (2023). Factors associated with hypertension among adults in high-burden kidney disease areas of Jigawa State, Nigeria: A cross-sectional survey. *Nigerian Postgraduate Medical Journal*, 30(4), 275–284.
- Ige, O. A., Oni, J. O., & Lawal, L. O. (2025). Preoperative hypertension: Prevalence and control among elective surgery patients in Nigeria. *Medical Journal of Zambia*, 52(1), 55–64.
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4(1), Article 1.
- Musa, S., Elyamani, R., & Dergaa, I. (2022). COVID-19 and screen-based sedentary behaviour: Systematic review of digital screen time and metabolic syndrome in adolescents. *PLOS ONE*, 17(3), e0265560.
- Nwevo, C. O., Nkang, J., Nwilegbara, S., Okonkwo, U., Otu, A., & Ameh, S. (2024). Prevalence of hypertension and associated factors among schoolteachers in Calabar, Nigeria: A cross-sectional study. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 27(7), 850–858.
- Ogah, O. S., Okpechi, I., Chukwuonye, I. I., Akinyemi, J. O., Onwubere, B. J. C., Falase, A. O., ... Sliwa, K. (2012). Blood pressure, prevalence of hypertension and hypertension-related complications in Nigerian Africans: A review. *World Journal of Cardiology*, 4(12), 327–340.
- Ogboye, A., Akpakli, J. K., Iwuala, A., Etuk, I., Njoku, K., Jackson, S., ... Oludara, F. (2023). Prevalence of non-communicable diseases and risk factors of pre-eclampsia/eclampsia in four local government areas in Nigeria: A cross-sectional study. *BMJ Open*, 13(10), e076619.

- Okafor, A. C., Chiemerie, M. N., Maduka, N. L., Florentina, A. E., Valentine, U., Ferdinand, E. N., & Sunday, O. E. (2024). Prevalence, perception and awareness of chronic diseases (HIV, diabetes, hypertension and typhoid fever) among rural dwellers in Nomeh-Unateze community in Nkanu-East LGA of Enugu. *Sumerianz Journal of Medical and Healthcare*, 7(2), 29–40.
- Okwara, C. C., Ezeala-Adikaibe, B. A., Njoku, P. O., Mbadiwe, N. C., Ikenwugwu, T. H., Ekwe, E. A., ... Anigbo, G. E. (2025). Hypertension in the young: A post-hoc analysis of two studies in Enugu State. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 28(5), 574–581.
- Paulmiki Ide, T. J., Nwofia, B. K., Maduforo, A. N., Ene-Obong, H. N., Onyenweaku, E. O., & Ide, C. O. (2024). Prevalence of generalized obesity, abdominal obesity, hypertension, and type 2 diabetes among adults in Calabar Metropolis, Cross River State, Nigeria. *Nigerian Journal of Nutritional Sciences*, 45(2), 18–29.
- Piovani, D., Nikolopoulos, G. K., & Bonovas, S. (2022). Non-communicable diseases: The invisible epidemic. *Journal of Clinical Medicine*, 11(19), 5939.
- Ramalan, M. A., Gezawa, I. D., Musa, B. M., Uloko, A. E., & Fakhraddeen, Y. M. (2023). Prevalence and trends of adult overweight and obesity in Nigeria: A systematic review and meta-analysis. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 26(1), 1–15.
- Sadiq, A., Salisu, A. S., Ali, A. A., Abubakar, K., Saulawa, M. I., Usman, U. S., ... Sabo, A. (2024). Assessment of non-communicable disease risk factors in Jigawa State, Nigeria: A cross-sectional study. *Journal of Biomedical and Applied Sciences*, 3(1), 1–7.
- Shogade, T. T., Effiong, B. A., Udosen, A. U., Markson, F. E., Nkanga, K. E., Tanimowo, M. O., ... Oji, D. B. (2024). Trend in the prevalence, awareness, treatment and control of hypertension among adults in Nigeria over a 4-year period. *European Heart Journal*, 45(Supplement 1), ehae666.2563.
- The European Association for the Study of Obesity. (2025). *About obesity*. Retrieved September 15, 2025, from <https://easo.org/education/about-obesity/>

- Ukangwa, N. A., Esiaba, I., & Kayode, A. A. A. (2025). Prevalence of newly diagnosed high blood pressure among female adults aged 18 to 50 years in south western Nigeria. *Journal of Krishna Institute of Medical Sciences*, 14(1), 66–77.
- United Nations Population Fund. (2025). *Nigeria population 2025*. Retrieved September 15, 2025, from <https://www.unfpa.org/data/world-population/NG>
- Wang, N. (2023). Conducting meta-analyses of proportions in R. *Journal of Behavioral Data Science*, 3(2), 64–126.
- World Health Organization. (2013). *Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013–2020*. World Health Organization.
- World Health Organization. (2024). *Tackling NCDs: Best buys and other recommended interventions for the prevention and control of noncommunicable diseases* (2nd ed.). World Health Organization.
- World Health Organization. (2025). *Obesity and overweight*. Retrieved September 15, 2025, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>

IoT-Integrated Battery Management System with Real-Time Monitoring and Cell Balancing of Lithium-Ion Battery Packs for Light Electric Vehicles

Ahmed Wael Hanafy Mahmoud Hassan AFIFT*

Özet: Ulaşım sektörü, öncelikle fosil yakıtlara olan uzun süreli bağımlılığı nedeniyle sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu durum iklim değişikliğini etkilemekte ve elektrikli araçların gelecek vaat eden bir alternatif olduğu sürdürülebilir mobilite çözümlerine doğru acil bir küresel geçiş yaşanmaktadır. Bu geçişin merkezinde, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve sürekli iyileşen performans-maliyet oranları sunan lityum iyon pil teknolojisi yer almaktadır. Bu özellikler, lityum iyon piller elektrikli araçlar (EA) için gelecek vaat eden bir enerji depolama çözümü olarak konumlandırmıştır. Ancak, güvenli, ve verimli çalışmalarını sağlamak sürekli izleme ve yönetim gerektirmektedir. Batarya yönetim sistemleri (BMS), pilin sağlığını, ömrünü ve güvenliğini etkileyen temel parametreleri izlemek için gereklidir. Bu parametrelerdeki hatalar veya dengesizlikler, düşük performans, beklenmedik bozulmaya ve hatta termal kaçak olaylarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, gelişmiş pil yönetimi ve izleme sistemlerinin entegrasyonu yalnızca EA performansını optimize etmek için değil, aynı zamanda kullanıcı güvenliğini sağlamak ve elektrikli ulaşımın çevresel faydalarını korumak için de hayati önem taşımaktadır. Bu makale, elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon piller için Nesnelerin İnterneti tabanlı bir izleme ve dengeleme sisteminin tasarımını ve geliştirilmesini sunmaktadır. Önerilen sistem, sensörler ve bir mikrodenetleyici birimi kullanarak, gerilim, akım, sıcaklık ve tek tek pil hücrelerinin şarj durumu gibi temel parametreleri sürekli olarak izlemektedir. Bu çalışma, sürdürülebilir elektrikli mobilitede akıllı pil yönetim sistemlerinin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hafif Elektrikli Araçlar , Pil Yönetim Sistemi, Nesnelerin İnterneti, lityum iyon pil paketleri, Pasif hücre dengeleme

* Y.L. Öğrencisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Y.L Programı, ahmed.weal.2010@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6567-758X

Abstract: The transportation sector is a significant contributor to greenhouse gas emissions, primarily due to its prolonged dependence on fossil fuels. These causes impact on climate change, and there is an urgent global shift toward sustainable mobility solutions, with electric vehicles (EVs) as a promising alternative. At the core of this transition is depending on lithium-ion battery technology, which offers high energy density, long cycle life, and continuously improving performance-to-cost ratios. These characteristics have positioned lithium-ion batteries as a promising energy storage solution for EVs. However, ensuring their safe, reliable, and efficient operation requires continuous monitoring and management. Battery management systems (BMS) are essential for tracking key parameters that influence the battery's health, lifespan, and safety. Faults or imbalances in these parameters can lead to reduced performance, unexpected degradation, or even thermal runaway events. Therefore, the integration of advanced battery management and monitoring systems is not only vital for optimising EV performance but also for ensuring user safety and preserving the environmental benefits of electrified transport. This paper presents the design and development of an Internet of Things (IoT)-based monitoring and balancing system for lithium-ion battery packs used in electric vehicles. The proposed system continuously monitors key parameters such as voltage, current, temperature, and state of charge (SoC) of individual battery cells using sensors and a microcontroller unit. This work contributes to the advancement of intelligent battery management systems in sustainable electric mobility.

Keywords: Light Electric Vehicles (LEV), Battery Management System (BMS), Internet of Things (IoT), lithium-ion battery packs, Passive cell balancing

Introduction

The transition toward sustainable transportation has accelerated the adoption of electric bikes (e-bikes)(Ballo et al., 2023; Edge et al., 2018) as a practical and eco-friendly alternative to conventional vehicles. At the heart of every e-bike lies its energy storage system(Teja et al., 2024). Typically powered by lithium-ion battery packs(Maghssoudi et al., 2024; Saw et al., 2016) due to their high energy density, lightweight design, and long operational life. Despite these advantages, lithium-ion batteries present inherent challenges related to safety, longevity, and performance, particularly when multiple cells are connected in series or parallel. Issues such as cell imbalance(-Docimo & Fathy, 2019; Soni & Karuppasamy, 2023; Vasudha & Shubha Rao, 2025; Zhu et al., 2023), overheating(Wang et al., 2021), and overcharging (Leising et al., 2001; Ouyang et al., 2017)can lead to reduced efficiency, shortened battery life,

or even hazardous failures like thermal runaway(Liu et al., 2023; Ohsaki et al., 2005). The rapid advancement of electric vehicles (EVs) has revolutionised personal transportation, with electric bikes (e-bikes) emerging as one of the most accessible and environmentally friendly options. At the heart of every e-bike lies its power source—the Lithium-ion battery pack, which determines critical performance factors such as range, power output, charging time, and overall lifespan. As e-bike adoption continues to grow worldwide, the need for sophisticated battery management systems (BMS) has become increasingly apparent.(Khan et al., 2025) To address these concerns, battery management systems (BMS) are employed to monitor and control various battery parameters. However, traditional BMS solutions often lack real-time data accessibility, remote diagnostics, and intelligent analytics capabilities. With the advancement of the Internet of Things (IoT), it is now feasible to develop smarter, connected systems that offer enhanced monitoring, predictive maintenance, and remote-control features(Arun Kumar et al., 2025). These papers (Halder et al., 2020; Vijaya Gowri et al., 2023) present the design and implementation of an IoT-based monitoring with passive cell balancing tailored for lithium-ion battery packs in electric bikes. The proposed systems ensure real-time acquisition and transmission of critical battery data, such as voltage, temperature, and current. Furthermore, by leveraging IoT connectivity, the system offers a user-friendly interface for remote access and alerts, facilitating proactive maintenance and enhanced operational safety. The design aims to bridge the gap between traditional battery management practices and modern IoT-enabled solutions, contributing to the development of safer, smarter, and more efficient energy systems for next-generation electric mobility.

In this paper, the cell balancing approach and monitoring using IoT for the battery's charging and discharging charac-

teristics, the performance analysis of the 36V battery pack has been simulated and verified in this study. Section 2 discusses the methodology, including signal pre-conditioning and cell balancing. In section 3, the software structure is discussed, including the integration with IOT. Finally, in section 4, to confirm the design, Proteus simulation is performing as intended, through this work.

1. Methodology

A lithium-ion (Li-ion) battery pack is a collection of lithium-ion cells assembled to work as a single power source. These battery packs are commonly used in portable electronics, electric vehicles (EVs), power tools, drones, and renewable energy storage systems due to their high energy density, relatively low weight, and long lifespan. A battery pack is a group of interconnected battery cells in series and parallel configuration that work together to provide a higher level of voltage and capacity. In this study, 10S string is studied.

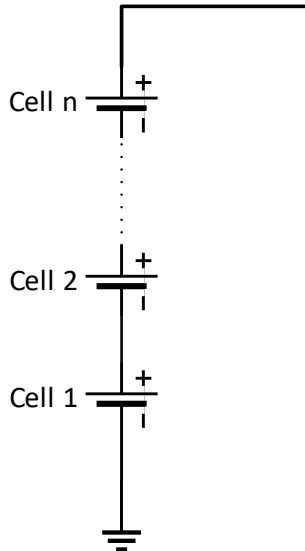


Figure 1. Multicell battery pack.

Passive cell balancing to ensure optimal performance and extended battery life. Early detection of potential failure modes and safety hazards. Remote monitoring and control capabilities through mobile and web applications, Data logging and analysis for predictive maintenance and performance optimization.

The system integrates hardware components, including voltage and current sensors, with a microcontroller unit, wireless communication modules, and cell balancing circuits. On the software side, it incorporates firmware for data acquisition and processing, a cloud platform for data storage and analysis, and user interface applications for monitoring and control. Figure 2 shows the block diagram for proposed system.

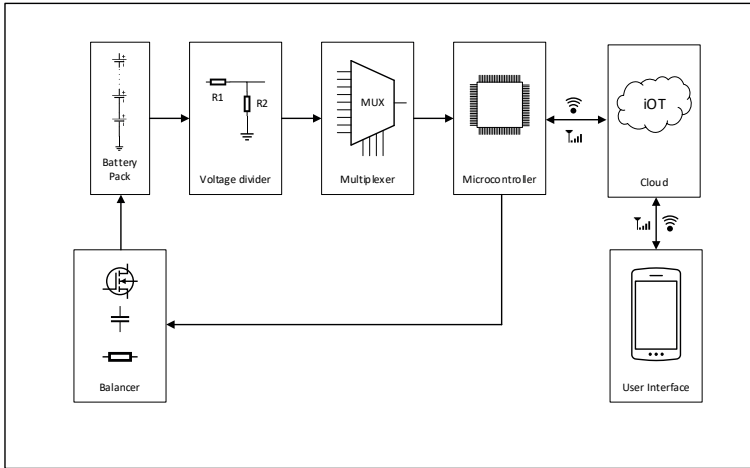


Figure 2. The Block diagram for the proposed system

2.1 Cell voltage preconditioning

In the battery pack (i.e., a 36V 10S battery pack), the voltage range of each cell referenced to the ground starts from 4.2V to 42V, depending on the string size. To read the voltage using a microcontroller, the voltage should be reduced to a suitable

level for the microcontroller, typically 1V for ESP8266. Proper design for a voltage divider circuit using commercial resistors is essential, according to the design. The next table shows the possible commercial resistors that can be used for the design.

String no.	Max Volt	R_s (k Ω)	R_{s+1} (k Ω)	Max V_{out}	I_{Loss} (mA)	P_{Loss} (mW)	Error (%)
1	4.2	3	12	0.84	0.28	1.176	0
1	4.2	7.5	30	0.84	0.112	0.4704	0
1	4.2	30	120	0.84	0.028	0.1176	0
1	4.2	75	300	0.84	0.0112	0.04704	0
1	4.2	300	1200	0.84	0.0028	0.01176	0
1	4.2	750	3000	0.84	0.00112	0.004704	0
2	8.4	2	18	0.84	0.42	3.528	0
2	8.4	3	27	0.84	0.28	2.352	0
2	8.4	20	180	0.84	0.042	0.3528	0
2	8.4	30	270	0.84	0.028	0.2352	0
2	8.4	200	1800	0.84	0.0042	0.03528	0
2	8.4	300	2700	0.84	0.0028	0.02352	0
3	12.6	1.3	18	0.8487047	0.652849741	8.225906736	0.008704663
3	12.6	13	180	0.8487047	0.065284974	0.822590674	0.008704663
3	12.6	130	1800	0.8487047	0.006528497	0.082259067	0.008704663
3	12.6	1.1	15	0.8608696	0.782608696	9.860869565	0.020869565
3	12.6	11	150	0.8608696	0.07826087	0.986086957	0.020869565
3	12.6	110	1500	0.8608696	0.007826087	0.098608696	0.020869565
3	12.6	1.6	22	0.8542373	0.533898305	6.727118644	0.014237288
3	12.6	16	220	0.8542373	0.053389831	0.672711864	0.014237288
3	12.6	160	2200	0.8542373	0.005338983	0.067271186	0.014237288
3	12.6	1.1	16	0.8105263	0.736842105	9.284210526	-0.029473684
3	12.6	11	160	0.8105263	0.073684211	0.928421053	-0.029473684
3	12.6	110	1600	0.8105263	0.007368421	0.092842105	-0.029473684
3	12.6	2.4	33	0.8542373	0.355932203	4.484745763	0.014237288
3	12.6	24	330	0.8542373	0.03559322	0.448474576	0.014237288
3	12.6	240	3300	0.8542373	0.003559322	0.044847458	0.014237288
3	12.6	1.2	16	0.8790698	0.73255814	9.230232558	0.039069767
3	12.6	12	160	0.8790698	0.073255814	0.923023256	0.039069767
3	12.6	2.2	30	0.8608696	0.391304348	4.930434783	0.020869565

3	12.6	22	300	0.8608696	0.039130435	0.493043478	0.020869565
3	12.6	220	3000	0.8608696	0.003913043	0.049304348	0.020869565
4	16.8	4.3	82	0.83708	0.194669757	3.270451912	-0.002920046
4	16.8	43	820	0.83708	0.019466976	0.327045191	-0.002920046
4	16.8	430	8200	0.83708	0.001946698	0.032704519	-0.002920046
4	16.8	2.7	51	0.8446927	0.312849162	5.255865922	0.004692737
4	16.8	27	510	0.8446927	0.031284916	0.525586592	0.004692737
4	16.8	270	5100	0.8446927	0.003128492	0.052558659	0.004692737
4	16.8	1.6	30	0.8506329	0.53164557	8.93164557	0.010632911
4	16.8	16	300	0.8506329	0.053164557	0.893164557	0.010632911
4	16.8	160	3000	0.8506329	0.005316456	0.089316456	0.010632911
4	16.8	3.6	68	0.8446927	0.234636872	3.941899441	0.004692737
4	16.8	36	680	0.8446927	0.023463687	0.394189944	0.004692737
4	16.8	360	6800	0.8446927	0.002346369	0.039418994	0.004692737
4	16.8	1.3	24	0.8632411	0.664031621	11.15573123	0.023241107
4	16.8	13	240	0.8632411	0.066403162	1.115573123	0.023241107
4	16.8	130	2400	0.8632411	0.006640316	0.111557312	0.023241107
4	16.8	1.2	22	0.8689655	0.724137931	12.16551724	0.028965517
4	16.8	12	220	0.8689655	0.072413793	1.216551724	0.028965517
4	16.8	120	2200	0.8689655	0.007241379	0.121655172	0.028965517
4	16.8	6.8	130	0.8350877	0.122807018	2.063157895	-0.004912281
4	16.8	68	1300	0.8350877	0.012280702	0.206315789	-0.004912281
4	16.8	680	13000	0.8350877	0.00122807	0.020631579	-0.004912281
4	16.8	1.1	20	0.8758294	0.796208531	13.37630332	0.035829384
4	16.8	11	200	0.8758294	0.079620853	1.337630332	0.035829384
4	16.8	110	2000	0.8758294	0.007962085	0.133763033	0.035829384
5	21	1	24	0.84	0.84	17.64	0
5	21	1.5	36	0.84	0.56	11.76	0
5	21	7.5	180	0.84	0.112	2.352	0
5	21	10	240	0.84	0.084	1.764	0
5	21	15	360	0.84	0.056	1.176	0
5	21	75	1800	0.84	0.0112	0.2352	0
5	21	100	2400	0.84	0.0084	0.1764	0
5	21	150	3600	0.84	0.0056	0.1176	0
6	25.2	6.2	180	0.8390977	0.135338346	3.410526316	-0.000902256
6	25.2	62	1800	0.8390977	0.013533835	0.341052632	-0.000902256

6	25.2	620	18000	0.8390977	0.001353383	0.034105263	-0.000902256
6	25.2	1.5	43	0.8494382	0.566292135	14.2705618	0.009438202
6	25.2	15	430	0.8494382	0.056629213	1.42705618	0.009438202
6	25.2	150	4300	0.8494382	0.005662921	0.142705618	0.009438202
6	25.2	1.6	47	0.8296296	0.518518519	13.06666667	-0.01037037
6	25.2	16	470	0.8296296	0.051851852	1.306666667	-0.01037037
6	25.2	160	4700	0.8296296	0.005185185	0.130666667	-0.01037037
7	29.4	1.5	51	0.84	0.56	16.464	0
7	29.4	2	68	0.84	0.42	12.348	0
7	29.4	15	510	0.84	0.056	1.6464	0
7	29.4	20	680	0.84	0.042	1.2348	0
7	29.4	150	5100	0.84	0.0056	0.16464	0
7	29.4	200	6800	0.84	0.0042	0.12348	0
8	33.6	1	39	0.84	0.84	28.224	0
8	33.6	10	390	0.84	0.084	2.8224	0
8	33.6	100	3900	0.84	0.0084	0.28224	0
9	37.8	7.5	330	0.84	0.112	4.2336	0
9	37.8	75	3300	0.84	0.0112	0.42336	0
10	42	1.5	75	0.8235294	0.549019608	23.05882353	-0.016470588
10	42	15	750	0.8235294	0.054901961	2.305882353	-0.016470588
10	42	150	7500	0.8235294	0.005490196	0.230588235	-0.016470588
10	42	3.3	160	0.8487446	0.257195346	10.80220453	0.008744642
10	42	33	1600	0.8487446	0.025719535	1.080220453	0.008744642
10	42	330	16000	0.8487446	0.002571953	0.108022045	0.008744642
10	42	1.3	62	0.8625592	0.663507109	27.86729858	0.022559242
10	42	13	620	0.8625592	0.066350711	2.786729858	0.022559242
10	42	130	6200	0.8625592	0.006635071	0.278672986	0.022559242

Table 1. Commercial resistor available for each string.

The Voltage divider configuration shown in Figure 3 achieves a step-down ratio of $1/5$ multiplied by the string number. The stage is followed by an analogue multiplexer 16 to 1 CD74HC4067. By using 4 digital IO pins from the microcontroller user can select the requested cell voltage, ensuring that the temperature within the battery remains within safe operating limits. Battery Management Systems (BMS) are often integrated into modules to monitor and balance individual

cell voltages, optimising overall performance and extending the lifespan of the battery.

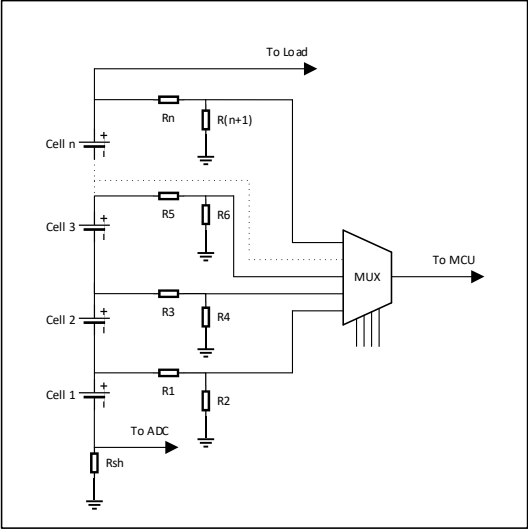


Figure 3. Voltage divider with multiplexer.

Table 2 shows the truth table for selecting the battery according to the datasheet(*CD74HC4067 Data Sheet, Product Information and Support | TI.Com, n.d.*) for the used IC.

S_0	S_1	S_2	S_3	Selected channel
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	0	0	2
1	1	0	0	3
0	0	1	0	4
1	0	1	0	5
0	1	1	0	6
1	1	1	0	7
0	0	0	1	8
1	0	0	1	9
0	1	0	1	10
1	1	0	1	11
0	0	1	1	12
1	0	1	1	13
0	1	1	1	14
1	0	1	1	15

Table 2. CD74HC4067 truth table for selecting the output

1.2. Analog to Digital Converter (ADC)

The output of the multiplexer is going to the ADC pin for the microcontroller. According to the resolution of the microcontroller and the reference voltage, we can get the accuracy for the microcontroller. In ESP8266, the reference voltage for ADC is 1V, and the number of bits is 10 bits. Then the resolution can be calculated using equation 1

$$V_{res} = \frac{V_{ref}}{2^n - 1} = \frac{1}{1024 - 1} = 0.000977 V$$

Equation 1

For the first cell, the *Analog_Read_Value* (between 0-1023) read by the ADC when the cell is fully charged it will be 860, which represents the full voltage of the cell, 4.2V

To get the voltage of each cell, it is required to subtract the previous voltage (Except the first cell) using equation 2.

$$V_{cell_n} = V_n - V_{n-1}$$

Equation 2

Where V_n is voltage read by the ADC is before the voltage divider is referenced to the ground.

V_{cell_n} is the actual voltage of the cell number n

$$V_n = Analog_Read_Value \times \frac{5 \times n}{1023}$$

Equation 3

1.3 Balancing Circuit

Passive balancing is a method used in battery management systems to equalise the state of charge (SoC) among individual cells in a battery pack.(Koganti et al., 2021; Nath &

Rajpathak, 2022; Patel et al., 2023; Shridhar et al., 2024) Each cell in the string is supported with a balancing circuit, the passive balancing is to ensure that the voltage is equal. The circuit involves using a switch and a power resistor in parallel with each cell. When a cell reaches a higher voltage or state of charge compared to other cells in the pack, the microcontroller activates the switch, allowing current to flow through the resistor. This process dissipates the excess energy as heat, effectively “bleeding off” the extra charge until all cells reach a similar state of charge. The balancing process typically occurs during the charging phase, particularly during what would normally be the absorption (Constant Voltage) stage of charging.

The advantages of using the passive balancing method

- **Simplicity:** Passive balancing circuits are relatively simple to implement, requiring minimal additional components beyond resistors and switches.
- **Cost-Effectiveness:** The straightforward design makes passive balancing more economical compared to active balancing methods
- **Reliability:** With fewer components and simpler circuitry, passive balancing systems generally offer higher reliability and longer operational lifespans.
- **Safety:** By preventing overcharging of individual cells, passive balancing enhances the overall safety of battery packs, reducing the risk of thermal runaway and potential hazards.

Figure 4 shows the implementation of passive cell balancing in the system.

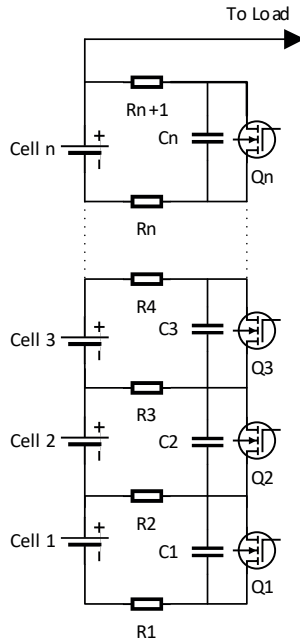


Figure 4. Passive Balancing Circuit diagram.

2. Software design

The software is organised into 3 modules. The first module is responsible for monitor the cell batteries. This module is the main module. It reads the cell voltages and sends real-time data to the cloud. In the discharging mode, the controller checks the voltages if the voltage of one cell is lower than 2.8V the controller will disconnect the load and give the user low battery alarm indicating the reason for the error and requesting the user to connect the charger. In charging mode. The controller checks the voltage and if the voltage of one cell exceeds the max voltage of 4.2 V the controller will disconnect the charger indicating the user that the battery is full charged then the other module will start which is responsible for balancing the cells Figure 5 shows the main algorithm for controlling charging and discharging of the cells

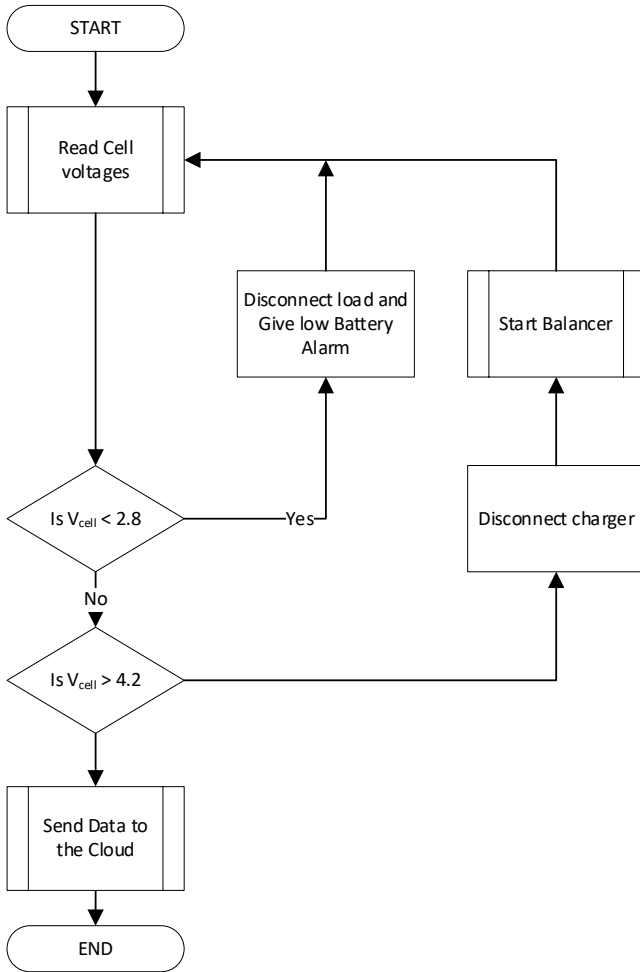


Figure 5. Flowchart for charging and discharging algorithm.

3. Voltage reading function

The voltage reading algorithm flow chart is shown in Figure 6, as it was mentioned in the previous Section 2, the microcontroller can select one cell using a multiplexer as shown in table 2. The system can use only one ADC pin.

From the previous equations 2 and 3, the voltage of each cell can be measured.

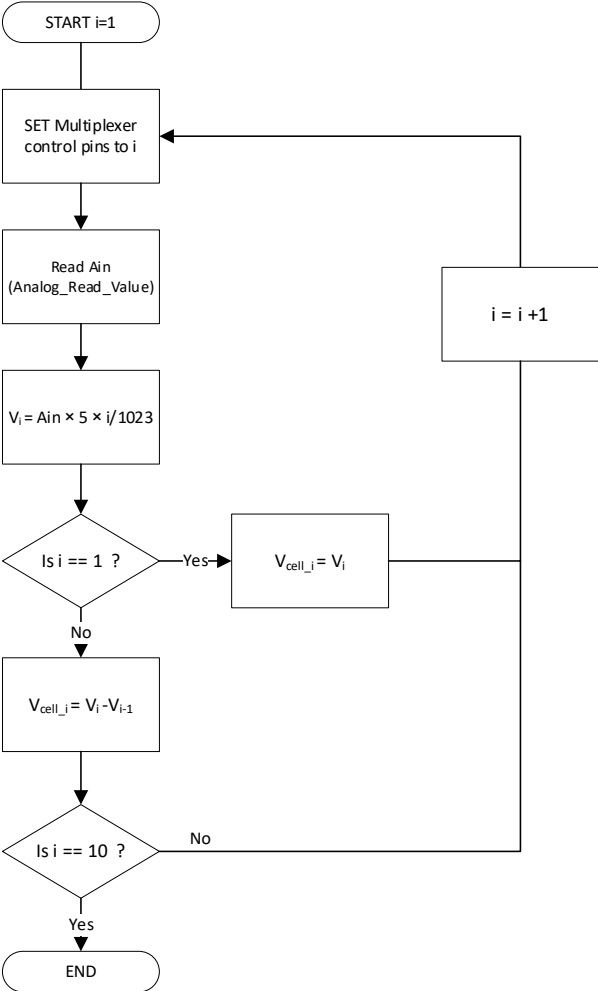


Figure 6. Flowchart for reading cell voltages function

4. Cell Balancing function.

Figure 7 shows the passive cell balancing algorithm, which is responsible for balancing the cell in charging mode. As discussed in section 2.2, the microcontroller checks for higher voltage cells and turns on the corresponding transistor for the high voltage cell, allowing its voltage to be equal to the other cells.

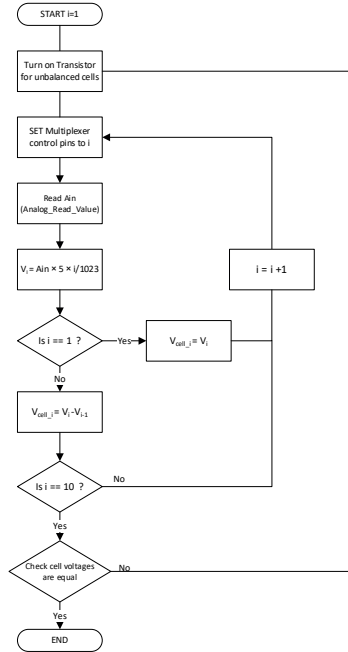


Figure 7. Flowchart for cell balancing function

5. Cloud interface and IoT

The Internet of Things (IoT) is an electronic ecosystem that links electronic equipment to the internet, giving users access to control and monitor their status from any location with internet access. The data is sent to Google Firebase Cloud, allowing the user to access the cell voltage data from anywhere in the world using a mobile application. For local users, there is a web-based server that allows users on the LAN to access real-time data.

6. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

The publish-subscribe messaging protocol known as MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) is an ISO standard (ISO/IEC PRF 20922)(ISO/IEC 20922:2016 - *Information Technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*)

v3.1.1, n.d.). The TCP/IP protocol serves as its foundation. It facilitates edge-to-edge communication between sensors/actuators and middleware. No client is directly connected to another client; the MQTT connection itself is always between a client and the broker. A client sends a CONNECT message to the broker to start the connection. Receiving all communications, screening them, determining who is interested, and finally forwarding the message to all subscribers are the broker's main responsibilities. The authentication key encrypts the broker's unauthorized access. In addition to collecting the published data in real time, the client application that offers a structured overview of MQTT subjects is already specified on the middleware server. The Arduino IDE development environment is used to write the microcontroller's application code, which is written in Embedded C. Battery conditions are monitored and controlled by system software, which also configures hardware peripherals.

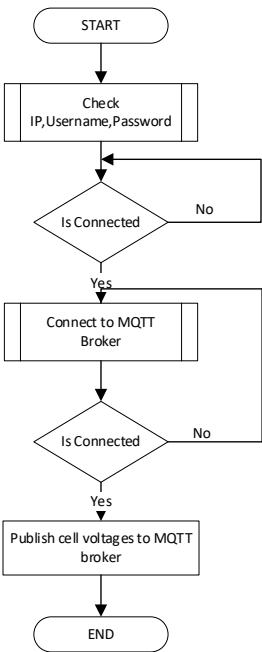


Figure 8. Flowchart for MQTT

Results and Simulation

This section discusses the simulation for the proposed system using Proteus software. The system is designed to monitor and manage a lithium-ion battery pack consisting of multiple cells connected in series. Each cell's voltage is measured, and passive balancing is implemented using resistor-based bleeding, where excess charge from higher-voltage cells is dissipated through resistors to match the level of lower-voltage cells. In Proteus, the simulation includes voltage sensing circuits for each cell, a Multiplexer microcontroller (typically Atmega328) programmed to monitor the voltages, and control logic that activates balancing resistors when cell voltages exceed a predefined threshold. The simulation visualises how the system maintains balanced cell voltages to improve battery performance, safety, and lifespan.

The passive balancing method is simple and cost-effective, making it suitable for low- to medium-power battery applications. The Proteus simulation helps validate the balancing logic, microcontroller programming, and overall system response before implementing the hardware.

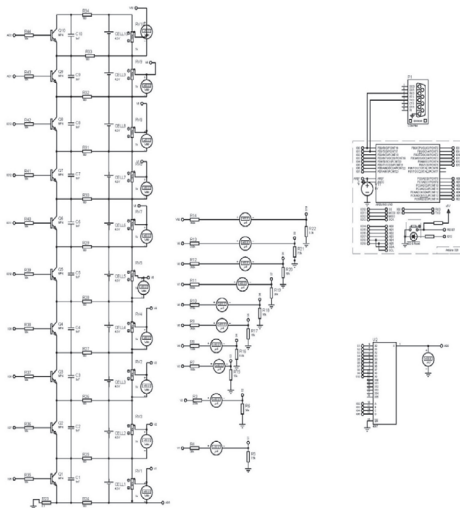


Figure 9. Simulation setup using Proteus.

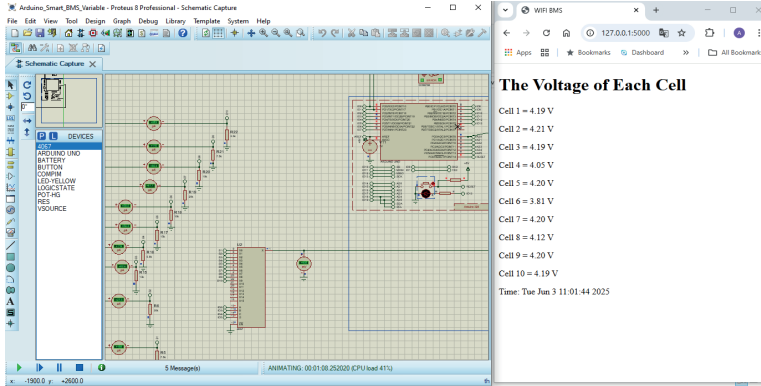


Figure 10. Simulation of the monitoring system user interface.

Integration of MQTT protocol adds a significant enhancement by enabling real-time wireless data transmission. Through this, critical parameters such as individual cell voltages and balancing status can be monitored remotely, allowing for smarter energy management and early fault detection.

Overall, the project validates the feasibility of combining analog balancing circuits with modern IoT communication protocols. The Proteus simulation provides a safe and flexible environment to test the system's behavior before hardware deployment, making it an essential step in developing reliable and intelligent battery management solutions.

Conclusion

This paper presents the design and implementation of an IoT-based monitoring with balancing system specifically tailored for lithium-ion battery packs in electric bikes. The proposed system addresses several key challenges in e-bike battery management: Real-time monitoring of critical battery parameters, including voltage, current, temperature, and state of charge. The simulation of a Battery Management System (BMS) with passive cell balancing and MQTT communication in Proteus successfully demonstrates a practical approach to

maintaining cell voltage uniformity and enabling remote battery monitoring. The passive balancing technique, implemented through resistor-based discharging, effectively equalises cell voltages, thereby ensuring improved battery health and an extended lifespan.

References

- Arun Kumar, P., Shalini, S., Sneha, R., Vasunthra, P., & Suganyadevi, S. (2025). Intelligent battery management system for electric vehicle with IoT-based monitoring, AI-driven multiple fault diagnosis and energy optimization. *3rd International Conference on Electronics and Renewable Systems, ICEARS 2025 - Proceedings*, 700–705. <https://doi.org/10.1109/ICEARS64219.2025.10940519>
- Ballo, L., de Freitas, L. M., Meister, A., & Axhausen, K. W. (2023). The E-Bike City as a radical shift toward zero-emission transport: Sustainable? Equitable? Desirable? *Journal of Transport Geography*, 111, 103663. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGE.2023.103663>
- CD74HC4067 data sheet, product information and support | TI.com. (n.d.). Retrieved June 1, 2025, from <https://www.ti.com/product/CD74HC4067>
- Docimo, D. J., & Fathy, H. K. (2019). Analysis and control of charge and temperature imbalance within a lithium-ion battery pack. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(4), 1622–1635. <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2819966>
- Edge, S., Dean, J., Cuomo, M., & Keshav, S. (2018). Exploring e-bikes as a mode of sustainable transport: A temporal qualitative study of the perspectives of a sample of novice riders in a Canadian city. *Canadian Geographer*, 62(3), 384–397. <https://doi.org/10.1111/CAG.12456>;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION
- Haldar, S., Mondal, S., Mondal, A., & Banerjee, R. (2020). Battery management system using state of charge estimation: An IoT based approach. *2020 National Conference on Emerging Trends on Sustainable Technology and Engineering Applications, NCETSTE 2020*. <https://doi.org/10.1109/NCETSTE48365.2020.9119945>

- ISO/IEC 20922:2016 - Information technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1. (n.d.). Retrieved June 2, 2025, from <https://www.iso.org/standard/69466.html>
- Khan, F. I., Hossain, M. M., & Lu, G. (2025). Sensing-based monitoring systems for electric vehicle battery: A review. *Measurement: Energy*, 6, 100050. <https://doi.org/10.1016/J.MEAENE.2025.100050>
- Koganti, S. K., Purnima, G., Bhavana, P., Raghava, Y. V., & Resmi, R. (2021). Comparative study between cell balancing methods in electric vehicle. *Proceedings of the IEEE Madras Section International Conference 2021, MASCON 2021*. <https://doi.org/10.1109/MASCON51689.2021.9563617>
- Leising, R. A., Palazzo, M. J., Takeuchi, E. S., & Takeuchi, K. J. (2001). A study of the overcharge reaction of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 97–98, 681–683. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00598-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00598-5)
- Liu, P., Li, S., Jin, K., Fu, W., Wang, C., Jia, Z., Jiang, L., & Wang, Q. (2023). Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by overheating and overcharging. *Fire Technology*, 59(3), 1051–1072. <https://doi.org/10.1007/S10694-022-01287-2/FIGURES/11>
- Maghsoudi, R., Ghezi, A., Jamalpour, S., Tamsilian, Y., Tohidian, M., & Shahebrahimi, Y. (2024). Advantages, limitations, and industrial applications of lithium-ion batteries. In *Nanostructured materials for energy storage* (pp. 793–820). <https://doi.org/10.1002/9783527838851.CH22>
- Nath, A., & Rajpathak, B. (2022). Analysis of cell balancing techniques in BMS for electric vehicle. *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power, ICICCSPP 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICICCSPP53532.2022.9862513>
- Ohsaki, T., Kishi, T., Kuboki, T., Takami, N., Shimura, N., Sato, Y., Sekino, M., & Satoh, A. (2005). Overcharge reaction of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 146(1–2), 97–100. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.03.105>
- Ouyang, D., Liu, J., Chen, M., & Wang, J. (2017). Investigation into the fire hazards of lithium-ion batteries under overcharging. *Applied Sciences*, 7(12), 1314. <https://doi.org/10.3390/APP7121314>

- Patel, K. H., Darji, P. B., & Viswanathan, J. G. T. (2023). Analysis of active cell balancing topologies with electrical cell modeling techniques. *2023 11th National Power Electronics Conference, NPEC 2023*. <https://doi.org/10.1109/NPEC57805.2023.10385028>
- Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2016). Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 113, 1032–1045. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.011>
- Shridhar, S. M., Reddy, S., & Kishore, Y. K. (2024). Modeling and simulation analysis of cell voltage balancing techniques for lithium-ion EV battery. *3rd IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics, ICDCECE 2024*. <https://doi.org/10.1109/ICDCECE60827.2024.10548602>
- Soni, P., & Karuppasamy, I. (2023). Performance analysis of a 48V battery pack using SoC estimation and cell balancing for electric vehicle. *2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2023*. <https://doi.org/10.1109/I2CT57861.2023.10126257>
- Teja, J. S., Ramakriishna, K., Mahesh, K., & Kumar, G. N. (2024). Design and monitoring of 36V 7.5AH lithium-ion battery pack for electric bi-cycle. *2024 IEEE 1st International Conference on Green Industrial Electronics and Sustainable Technologies, GIEST 2024*. <https://doi.org/10.1109/GIEST62955.2024.10959975>
- Vasudha, K., & Shubha Rao, K. (2025). Simulation and performance analysis of passive cell balancing technique for lithium batteries using modified generic model. *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics, IITCEE 2025*. <https://doi.org/10.1109/IITCEE64140.2025.10915336>
- Vijaya Gowri, G., Aruna, N., Janadharani, S., & Varshini, N. D. (2023). IoT based lithium-ion battery monitoring system in electric vehicle. *Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy, ICAIS 2023*, 1092–1096. <https://doi.org/10.1109/ICAIS56108.2023.10073696>
- Wang, H., Shi, W., Hu, F., Wang, Y., Hu, X., & Li, H. (2021). Overheating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion

battery with high nickel content in positive electrode. *Energy*, 224, 120072. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120072>

Zhu, W., Lei, F., Zhong, H., & Wang, D. (2023). An improved reliability assessment method for lithium-ion battery system considering imbalanced current and uneven cooling. *Energy*, 276, 127424. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.127424>

Şebekeye Bağlı Üç Fazlı Fotovoltaik Sistemlerin Arıza Koşullarındaki Performansının Değerlendirilmesi

Kamilia KHANNOUSSI

Özet: 100 kW kapasiteli üç fazlı bir fotovoltaik (PV) sistemin elektrik şebekesine entegrasyonu, modern enerji altyapılarında sürdürülebilirliğin ve güç kalitesinin korunması için oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu tür sistemlerin güvenilir bir şekilde çalışabilmesi, yalnızca güneş enerjisinden maksimum faydanın elde edilmesiyle değil, aynı zamanda şebekenin kararlılığı ve hizmet sürekliliğinin sağlanabilmesi için arıza yönetiminin hassas bir şekilde yapılmasını da gerektirir. Bu amaç doğrultusunda sistem, güç maksimumunu gerçek zamanlı olarak artırmak için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve yapay sinir ağlarını (ANN) birleştiren gelişmiş bir MPPT algoritması ile kontrol edilmektedir. Ayrıca dönüştürücü kontrolünde kullanılan d-q referans çerçevesi sayesinde, hem aktif hem de reaktif güç akışı daha dinamik ve esnek şekilde düzenlenmektedir.

Performansın daha da iyileştirilmesi için, çeşitli arıza senaryolarına göre eğitilmiş ANFIS tabanlı bir akım kontrolörü devreye alınmıştır.

Simülasyon sonuçları, normal çalışma koşullarında sistemin 99,37 kW düzeyinde kararlı güç enjeksiyonu yapabildiğini doğrulamaktadır. Bununla birlikte, özellikle asimetrik arızalar gibi şebeke gerilimini olumsuz etkileyen durumlarda sistem, reaktif güç enjeksiyonu yoluyla gerilim desteği sağlayabilmekte ve güç kalitesini koruyabilmektedir. Üç fazlı kısa devre gibi ciddi arızalarda ise akım hızlı bir şekilde sınırlandırılarak donanımın korunması sağlanmıştır. Sistemin 0,1 saniyeden daha kısa bir sürede toparlanabilmesi, Arıza Geçiş (Fault Ride-Through – FRT) gereksinimlerini başarıyla karşıladığını göstermekte ve bu PV sisteminin şebekeye güvenli ve kararlı bir şekilde entegre olabileceğini teyit etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistem (PV), Arıza Geçiş (FRT), Asimetrik Arıza, Simetrik Arıza, Kararlılık.

* Doktora öğrencisi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, khannoussikamilia@outlook.fr, 0009-0005-7277-7745.

Abstract: A 100 kW three-phase photovoltaic (PV) system integrated into the electrical grid requires advanced and precise fault management to ensure network stability, equipment protection, and continuous energy supply. As the penetration of renewable energy increases, maintaining a high-quality power flow becomes even more critical, particularly during disturbances that may compromise grid reliability. In this system, the control strategy is based on the d-q reference frame, allowing independent and dynamic regulation of active and reactive power components.

To optimize the power extraction process, a hybrid Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm combining Particle Swarm Optimization (PSO) and Artificial Neural Networks (ANN) is employed. This approach ensures fast and accurate tracking of the global maximum power point under varying environmental conditions such as irradiance changes or temperature fluctuations. In addition, an ANFIS-based current controller, trained on a wide range of fault scenarios, is integrated to strengthen the system's resilience and maintain stable operation even in the presence of grid voltage disturbances.

Simulation results demonstrate that under normal operating conditions, the system provides a stable power injection of approximately 99.37 kW. During asymmetric grid faults, the controller effectively supports voltage recovery by injecting reactive power, preventing severe voltage drops. In the case of a three-phase short circuit, the current is rapidly limited to protect the converter and PV modules. A recovery time of less than 0.1 seconds confirms compliance with Fault Ride-Through (FRT) requirements, highlighting the suitability and reliability of this PV system for safe and efficient large-scale grid integration.

Keywords: Photovoltaic System (PV), Fault Ride-Through (FRT), Asymmetrical Fault, Symmetrical Fault, Stability.

Giriş

Fotovoltaik (PV) enerjinin kullanımı dünya genelinde hızla artmakta ve bu temiz enerji kaynağının elektrik şebekesine entegrasyonu, beraberinde önemli zorluklar getirmektedir. Şebeke kararlılığının her koşulda sürdürülmesi kritik olduğundan, PV sistemlerin sadece normal çalışma koşullarında değil, aynı zamanda şebekede bir arıza meydana geldiğinde de güvenilir bir şekilde çalışması hayati önem taşımaktadır.

Kısa devre gibi büyük bir bozucu etki karşısında PV evriminin davranışı temel bir rol oynamaktadır. “Arıza Geçiş” (Fault Ride-Through - FRT) olarak bilinen modern şebeke kodları (Matambo vd., 2025), santrallerin arıza boyunca şebekeye bağlı kalmasını ve gerilimi desteklemek amacıyla reaktif akım enjekte etmesini gerektirmektedir.

Bu gereksinimleri karşılamak, gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Senkron dönen (d-q) referans düzleminde PI denetleyiciler ile yapılan vektör kontrolü yaygın bir yaklaşım olsa da, performansı oldukça dinamik koşullar altında sınırlı kalabilmektedir. Bu sınırlılıkların üstesinden gelmek amacıyla, bu çalışma yapay zekâ tabanlı yenilikçi bir yaklaşım önermektedir. Bu kapsamda, özellikle çeşitli arıza senaryolarından elde edilen verilerle eğitilmiş, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) temelli bir akım denetleyicisi geliştirilmiştir (Bilgundi et al., 2022; Kalwar, 2025)

Bu makale, bu akıllı denetleyici ile donatılmış sistemin simetrik ve asimetrik arızalar karşısındaki dinamik tepkisinin bir analizini sunmaktadır. Amaç, ANFIS yaklaşımının, arıza akımını güvenli bir seviyede sınırlamakla kalmayıp, aynı zamanda FRT stratejilerine uygun olarak konvansiyonel metotlara göre daha hızlı ve hassas bir reaktif güç desteği sağladığını göstermektir. Elde edilen sonuçlar, böyle akıllı bir denetleyiciye sahip bir PV sisteminin, geleceğin elektrik şebekelerinin dayanıklılığı için anahtar bir bileşen olduğunu kanıtlamayı hedeflemektedir.

1. Pv Sistemlerde Kararlılık Ve Arızalar

1.1. Şebeke Enerji Kalitesine Bağlı Arızalar

Bu arızalar genellikle şebeke gerilimindeki bozulmalarla kendini göstermektedir. Uzun süreli bozulmalar, geçici olaylar ve kesintiler olarak sınıflandırılmaları mümkündür.

1.2. Uzun Süreli Bozulmalar

- Dengesizlik (Unbalance): Üç fazlı sistemin genlik veya faz açısı bakımından eşit olmaması durumudur ve gerilim ya da akım dengesizliğine yol açabilmektedir (Alharbi, 2024).

- Harmonikler (Harmonics): Temel frekansın (50/60 Hz) katları olan frekanslarda gerilim veya akımların varlığı olup, dalga formunda bozulmalara neden olabilmektedir (Jaiswal ve Deb, 2024).
- Frekans Değişimi (Frequency Variation): Genellikle üretim ve tüketim arasındaki dengesizlikten kaynaklanan, şebeke frekansının nominal değerinden sapmasıdır (Babu vd., 2024).
- Titreme (Flicker): Aydınlatmada algılanabilir parlaklık değişimlerine yol açabilen, gerilimdeki hızlı ve tekrarlayan dalgalanmalardır (Tobbal vd., 2025).

1.3. Geçici Olaylar

- Gerilim Düşümü (Sag): Genellikle arızalar veya büyük yüklerin devreye girmesiyle oluşan, şebeke gerilimindeki geçici düşüştür.
- Gerilim Yükselmesi (Swell): Genellikle büyük yüklerin devreden çıkması veya arızalar nedeniyle oluşan, şebeke gerilimindeki geçici artıştır.
- Ani Gerilim Yükselmeleri/Geçici Rejimler (Spikes/Transient): Ekipmanların anahtarlanması veya atmosferik deşarjlar nedeniyle oluşabilen, çok kısa süreli ve yüksek genlikli gerilim darbeleridir .
- Kesintiler (Outages): Ciddi bir arıza veya planlı bir bağlantı kesintisi sonucu şebeke geriliminin tamamen kaybolması durumudur.

1.4. Aşırı Gerilim veya Aşırı Akım Arızaları

- Aşırı Akım: Kısa devre veya aşırı yüklenme nedeniyle oluşan yüksek akımdır. Ekipmanlara zarar verebilmekte ve koruma cihazlarını tetikleyebilmektedir (Baeckeland vd., 2024).

- Aşırı Gerilim: Şebekedeki geçici rejimler veya yıldırım düşmeleri nedeniyle gerilimin artmasıdır ve hassas bileşenlere zarar verebilmektedir (Sharma vd., 2024).

1.5. Topraklama Arızaları

- Şebekede: Tehlikeli kaçak akımlarının toprağa akmasına neden olan yalıtım hatalarıdır.
- PV Sistemde: Kablolarda veya panellerde meydana gelebilen ve istenmeyen akım yollarının toprağa doğru oluşmasına neden olan yalıtım hatalarıdır.

1.6. Pasif Bileşen Arızaları

- Kablolama: Kablolarda aşınma, aşırı ısınma veya kısa devreler meydana gelebilmektedir.
- Sigortalar: Altta yatan bir sorunu işaret eden, aşırı akım nedeniyle sigortanın atması durumudur.
- Konnektörler: Enerji kayıplarına veya elektrik arklarına yol açabilen kötü temaslardır.

1.7. Panel Kaynaklı Arızalar

- Bozulmalar (Degradations): PV modüllerinin verimliliğini azaltan fiziksel hasarlar veya yaşlanma durumlarıdır.
- Kirlenme (Salissure): Panel yüzeyinde toz veya kir birikmesi sonucu üretimin azalmasıdır.
- Gölgeleme (Ombrage): Panellerin kısmen gölgede kalması nedeniyle güç kaybı yaşanmasıdır (Danyali vd., 2024).

1.8. Hat Arızaları

- Fazlar Arası Kısa Devre: İki faz arasında doğrudan temas sonucu yüksek aşırı akım oluşmasıdır (Basu Roy Chowdhury ve Gayen, 2024).

- Faz-Toprak: Genellikle yalıtım hatalarından kaynaklanan, toprağa doğru kaçak akımlardır.

1.9. Evirici Arızaları

- Bileşen Hataları: Yarı iletkenlerin (IGBT, MOSFET) veya kapasitörlerin arızalanmasıdır.
- Yanlış Senkronizasyon: Frekans, gerilim veya fazın şebeke ile uyumsuzluğudur (Tan, 2025).
- Evirici Doyumu: Genellikle aşırı yük veya şebeke arızaları durumunda eviricinin elektriksel büyüklükleri doğru şekilde düzenleyememesi halidir.

1.10. Spesifik Arıza Türleri

- Simetrik Arıza: Üç fazı eşit şekilde etkiler, fazlar arasında denge korunur ancak gerilim anormaldir. Gerilim desteği sağlamak ve şebekenin nominal değerine dönmelerini sağlamak için reaktif güç enjekte edilerek yönetilir (Soomro vd., 2023).

- Asimetrik Arıza: Bir veya iki fazı eşit olmayan şekilde etkiler, gerçek bir dengesizlik oluşturur ve yönetimi daha karmaşıktır. Bu durum, istikrarsızlığı telafi etmek için gelişmiş kontrol stratejileriyle dengesiz akımların enjekte edilmesini gerektirir (Pola vd., 2023).

Bu arıza türlerinin tespiti ve düzeltilmesi, PV sistemlerinin sürdürülebilir ve verimli bir şekilde çalışması için büyük önem taşımaktadır.

2. Pv Sistemlerinin Şebekeye Entegrasyonu İçin Kontrol Stratejileri

PV sistemlerin şebekeye güvenli entegrasyonu, hem normal çalışma hem de arıza durumlarını etkili şekilde kontrol edebilen gelişmiş stratejiler gerektirir. Bu kontrol yöntemle-

ri, klasik PI tabanlı yaklaşımlardan yapay zekâ destekli modern tekniklere kadar geniş bir çeşitlilik sunmaktadır. Uygun kontrol stratejisinin seçimi, özellikle Arıza Geçiş (FRT) şartlarını karşılamak için büyük önem taşır. Bu nedenle, sunulan tablo geleneksel PI kontrolünün sınırlamalarını göstererek ANFIS tabanlı daha gelişmiş bir yöntemin tercih edilmesini desteklemektedir.

Tablo 1: İlgili Kontrol Stratejilerinin Karşılaştırmalı Özeti

Kategori	Yöntem	Temel Prensip	Avantajlar	Yeniliği Gerektelendiren Sınırlılıklar
Klasik Kontrol (Referans)	PI Denetleyici (Ellithy vd., 2024)	Hız için oransal (P) ve statik hatayı ortadan kaldırmak için integral (I) etkiyi birleştirir.	Güvenilir endüstri standardı. Normal rejimde yüksek kaliteli bir referans veri seti oluşturmak için idealdir.	Şebeke arızalarının oldukça doğrusal olmayan ve hızlı dinamikleri karşısında sınırlı performans.
İleri Kontrol (Önerilen Çözüm)	ANFIS (Patra vd., 2024)	Bulanık mantığın sağlamlığını sinir ağlarının öğrenme yeteneği ile birleştirir.	PI verilerinden öğrenir ancak öngörülemeyen koşullara daha iyi uyum sağlar. Arıza geçişlerini yönetmek için idealdir.	Tasarımı ve eğitimi daha karmaşıktır, bu da titiz bir metodoloji (ön aşamada PI kullanımı) gerektirir.
Şebeke Gereklinimi (Nihai Hedef)	Arıza Geçiş (FRT) (Nithya ve Roselyn, 2022)	Evirici, bir arıza sırasında şebekeye bağlı kalmalı ve aktif olarak destek sağlamalıdır.	Sistemin modern şebeke kodlarına uygunluğunu gösterir. Zincirleme kesintileri önleyerek genel şebeke güvenilirliğini artırır.	Klasik denetleyiciler (PI), modern FRT stratejilerinin gerektirdiği optimal ve hızlı yanıt garanti etmekte zorlanabilir.

3. 100 Kw'lık Fotovoltaik Sistemin Analizi Ve Arıza Simülasyonu

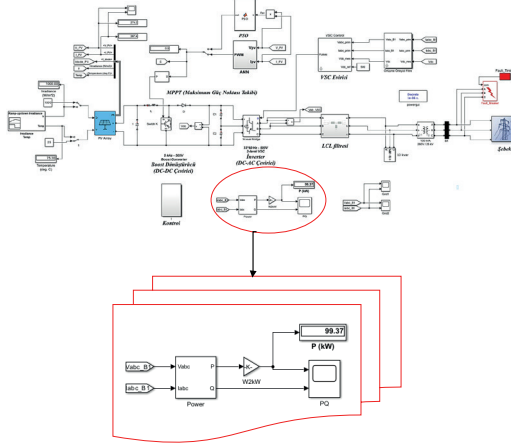
3.1. 100 kW'lık Fotovoltaik Sistemin Analizi

Şekil 1'de, şebekeye bağlı 100 kW gücünde üç fazlı fotovoltaik (PV) sistemin MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş tam simülasyon şeması gösterilmektedir. Bu sistem,

güneş enerjisi santralinin çeşitli çalışma koşullarındaki performansını analiz etmek amacıyla tasarlanmıştır.

Sistemin ana bileşenleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Fotovoltaik Alan (PV Dizi): Enerji üretim kaynağı olarak işlev görmektedir. Bu alan, standart test koşullarında (STC: 1000 W/m² ışınım ve 25°C sıcaklık) sürekli doğru akım (DC) üretimi yapacak şekilde modellenmiştir.
- Boost DC-DC Dönüştürücü: PV alanının çıkış gerilimini yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu katman, DC bara gerilimini referans değeri olan 500 V'da sabit tutmak için bir MPPT algoritması ile kontrol edilmektedir (Hayat vd., 2023).
- MPPT Algoritması (Maksimum Güç Noktası Takibi): PV alanının çalışma noktasını sürekli olarak ayarlayarak maksimum gücün elde edilmesini sağlamaktadır. Modelde, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması (Hayder vd., 2020) ile Yapay Sinir Ağı (ANN) tabanlı gelişmiş hibrit bir yaklaşım kullanılmaktadır (Alkhalaf vd., 2022). Bu yöntem, değişken ışınım koşullarında dahi hızlı ve hassas takip sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Kiran vd., 2022).
- Üç Fazlı Evirici (VSC - Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü): DC bara (500 V) üzerindeki doğru akım gücünü, şebeke ile senkronize üç fazlı alternatif akıma (AC) dönüştürmektedir.
- LCL Filtresi: Evirici çıkışında yer almakta olup anahtarlarma harmoniklerini bastırarak (Wang vd., 2022), şebekeye enjekte edilen akımın sinüzoidal ve yüksek kaliteli olmasını sağlamaktadır (Upadhyay vd., 2023).
- Transformatör ve Şebeke: Transformatör, gerilimi dağıtım şebekesi seviyesine uyarlamaktadır. Ayrıca, ileride hata durumlarının simülasyonu amacıyla "Fault Breaker" bloğu modele dahil edilmiştir.



Şekil 1: Şebekeye bağlı 100 kW'lık üç fazlı fotovoltaik sistemin simülasyon şeması

3.1.1. Evirici Kontrol Stratejisi

Şekil 8'de, Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC) kontrol yapısının ayrıntılı yapısı gösterilmektedir. Bu yapı, senkron döngü (dq) eksenine dayalı kademeli (hiyerarşik) bir kontrol konfigürasyonudur.

- **Faz Kilitlemeli Döngü (PLL - Phase-Locked Loop)**

PLL, şebekeye ait üç fazlı gerilimleri (V_{abc_prim}) ölçer ve buradan açı ve frekans bilgilerini elde eder. Bu işlem, eviricinin şebeke ile tam senkronizasyonu için ve abc ekseninden dq eksenine dönüşümün gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Mishra ve Lal, 2021).

- **Harici Kontrol Döngüleri (DC Gerilim ve Reaktif Güç Kontrolü)**

DC Bara Gerilimi Üzerinden Aktif Güç Kontrolü : Ana harici kontrol döngüsü, DC bara gerilimini düzenlemektedir. "Kontrol1" bloğunda yer alan PI denetleyici, ölçülen DC gerilimi (V_{dc_mes}) ile referans değeri ($V_{dc_ref} = 500$ V) arasında karşılaştırma yapar. Bu denetleyicinin çıkışı, d-ekseni akım referansı olan I_{d_ref} değerini üretir. Bu mekanizma sayesinde, şebekeye enjekte edilen aktif güç, PV alanı tarafından üre-

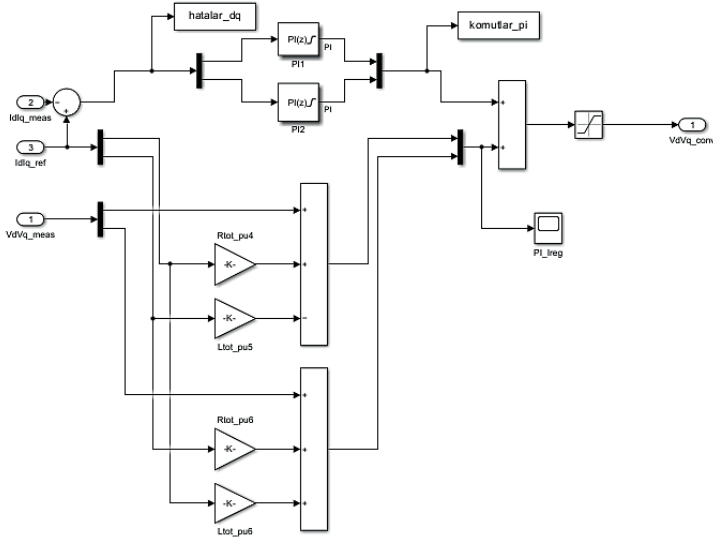
tilen güç ile uyumlu hale getirilerek DC bara gerilimi kararlı tutulur.

Reaktif Güç Kontrolü : q-ekseni akım referansı (I_{q_ref}), “Kontrol2” bloğu tarafından üretilmektedir. Normal çalışma koşulları altında bu referans, reaktif gücün sıfır ($Q = 0$) olması ve dolayısıyla birim güç faktörü ($PF = 1$) sağlanacak şekilde ayarlanmıştır (Kumar vd., 2023).

- **Dahili Kontrol Döngüleri (Akım Regülasyonu)**

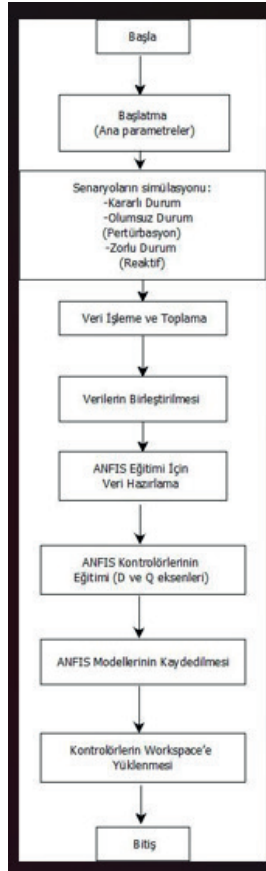
- ANFIS Denetleyici Tasarım Metodolojisi

Şebekeye enjekte edilen akımların regülasyonu, senkron referans çerçevesinde (dq) çalışan bir dahili kontrol döngüsü tarafından sağlanan kritik bir işlemdir. Yüksek performans elde etmek amacıyla, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) temelli akıllı bir kontrol stratejisi kullanılmıştır. Bu denetleyicinin tasarımı, titiz bir metodolojiyi takip etmektedir: İlk aşamada, kapsamlı bir eğitim veri seti oluşturmak için Şekil 2’de gösterilen konvansiyonel bir Oransal-İntegral (PI) denetleyici kullanılmıştır.



Şekil 2 : Veri toplama amacıyla kullanılan konvansiyonel PI tabanlı akım denetleyicisi

Bu veri seti, sistemin kararlı durum, dinamik pertürbasyonlar ve reaktif güç yönetimi gibi zorlu koşullar da dahil olmak üzere çeşitli senaryolar altında simüle edilme- siyle zenginleştirilmiştir. Veri toplama ve ANFIS denetleyicilerinin eğitim süreci, Şekil 3'de sunulan akış şemasında özetlenmektedir.



Şekil 3: ANFIS denetleyicileri için veri toplama ve eğitim metodolojisi akış şeması

Toplanan veriler daha sonra, biri d ekseni ve diğeri q ekseni için olmak üzere iki ayrı ANFIS denetleyicisini eğitmek için kullanılmış ve bu denetleyiciler nihai modele entegre edilmiştir.

➤ Eğitim Sonuçları ve Geliştirilen ANFIS Denetleyici Yapısı

Eğitim süreci sonunda elde edilen performans metrikleri, Şekil 4'te sunulan özetle gösterilmektedir. Düşük Karesel Ortalama Hatanın Kökü (RMSE) değerleri, ANFIS modellerinin eğitim verilerini yüksek bir doğrulukla öğrendiğini göstermektedir.

```

153 disp('Grafikler oluşturuldu. ');
154
155 %% =====
156 % AŞAMA 4: EĞİTİM SONUÇLARI TABLOSU (FİNAL SÜRÜM)
157 % =====
158 disp(' ');
159 disp('*** 4. Aşama: Eğitim sonuçları özetleniyor... ***');
160 % --- Bilgileri Topla (Doğru Metot) ---
161 % Eğitim hata vektörünün SADECE SON elemanını alıyoruz.
162 rmse_d = hata_egitim_d(end);
163 rmse_o = hata_egitim_o(end);

```

Command Window

```

*** 3. Aşama: Sonuçlar çizdiriliyor... ***
Grafikler oluşturuldu.

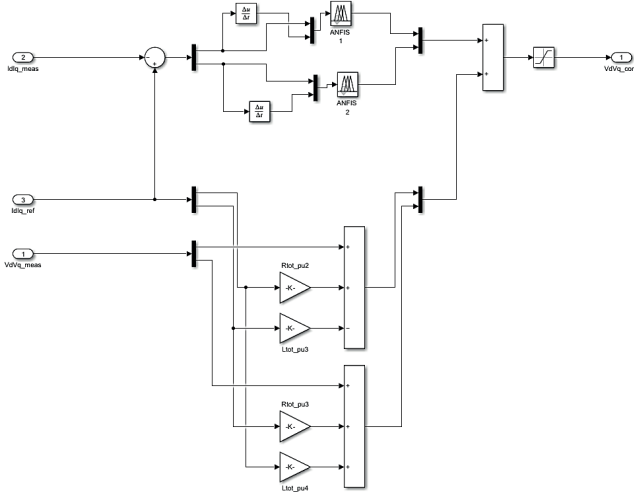
*** 4. Aşama: Eğitim sonuçları özetleniyor... ***
+-----+
|                ANFIS EĞİTİM ÖZETİ                |
+-----+-----+-----+
| EKSEN | KURAL SAYISI | SON EĞİTİM RMSE |
+-----+-----+-----+
| D-Eksen | 9 | 0.010849 |
| Q-Eksen | 9 | 0.018729 |
+-----+-----+-----+

```

Tüm süreç tamamlandı.

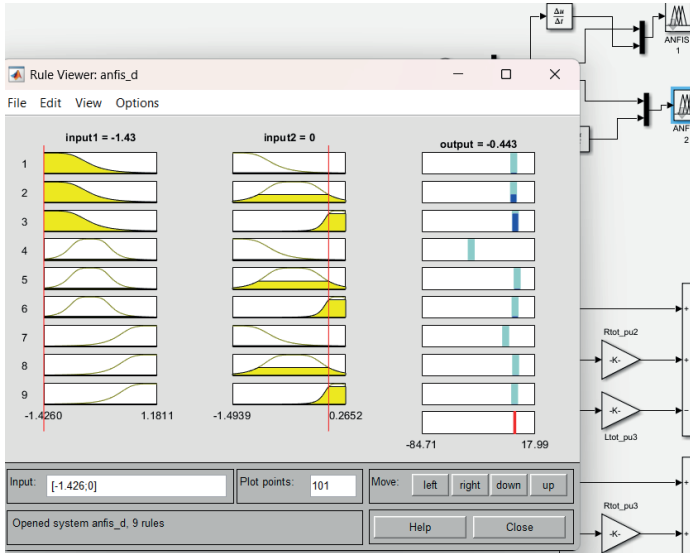
Şekil 4: ANFIS denetleyicileri için eğitim sonuçları özeti

ANFIS tabanlı akım regülatörünün nihai Simulink yapısı Şekil 5'de sunulmuştur.

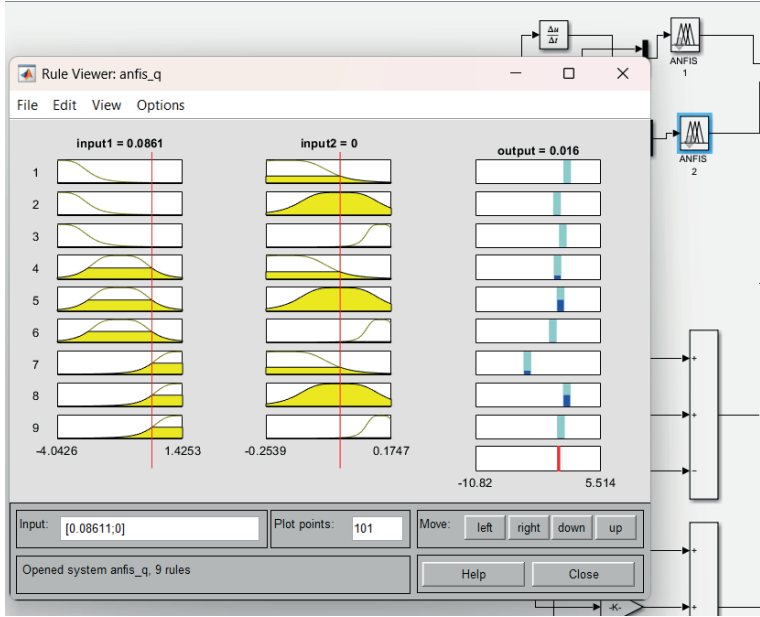


Şekil 5: ANFIS tabanlı akım denetleyicisi

Ayrıca, eğitilmiş d-ekseni ve q-ekseni ANFIS denetleyicilerinin iç kural tabanları ve çıkarım mekanizmaları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmektedir. Bu yapılar, her bir denetleyicinin girişler ve çıkış arasında 9 adet bulanık kurallı dayalı bir ilişki kurduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6: D eksen ANFIS denetleyicisinin kural tabanı

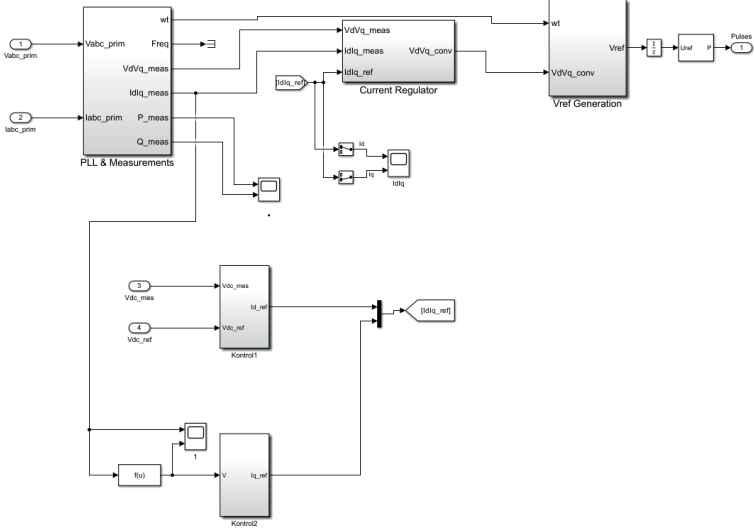


Şekil 7: Q eksenli ANFIS denetleyicisinin kural tabanı

Sonuç olarak, d ve q eksenleri için ANFIS akım regülatörleri başarıyla tasarlanmış ve eğitilmiştir. Elde edilen düşük Karesel Ortalama Hata Kökü (RMSE) değerleri (d eksen için 0.010849 ve q eksen için 0.018729), modellerin PI denetleyiciden üretilen verilerden yüksek bir hassasiyetle öğrendiğini doğrulamaktadır.

• PWM Komut Sinyallerinin Üretilmesi

Vd_conv ve Vq_conv gerilim sinyalleri tekrar abc eksenine dönüştürülerek PWM modülatörüne gönderilir. Bu modülatör, evirici anahtarlama elemanlarının kontrol darbelerini üretir.



Şekil 8: Senkron referans çerçevesine (dq) dayalı VSC evirici kontrol stratejisinin şeması

3.1.2. Kalıcı Rejimde Simülasyon Sonuçları

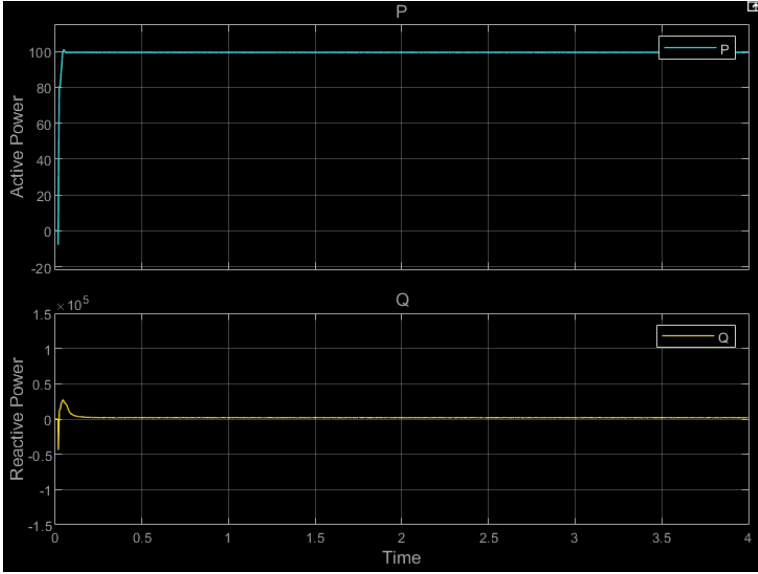
Şekil 9'da, ortak bağlanma noktasında (PCC) ölçülen aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) değerleri sunulmaktadır. Yaklaşık 0,2 saniyelik kısa bir geçici sürecin ardından aktif güç 99,37 kW'da sabitlenmiş, bu da PV sisteminden elde edilen enerjinin yüksek verimlilikle şebekeye aktarıldığını göstermektedir. Reaktif güç ise kontrol stratejisi gereği kalıcı durumda sifıra yakın tutulmakta olup ($Q \approx 0$ VAR), bu durum sistemin birim güç faktörü ile çalıştığını ve sadece aktif güç enjekte ettiğini ortaya koymaktadır. Böylece sistem, şebekeye reaktif güç alışverişi yapmadan verimli ve dengeli bir şekilde entegre olmaktadır. Aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve görünür güç (S) arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1)$$

$Q = 0$ olduğunda bu ifade $S = P$ haline dönüşmektedir. Dolayısıyla, güç faktörü

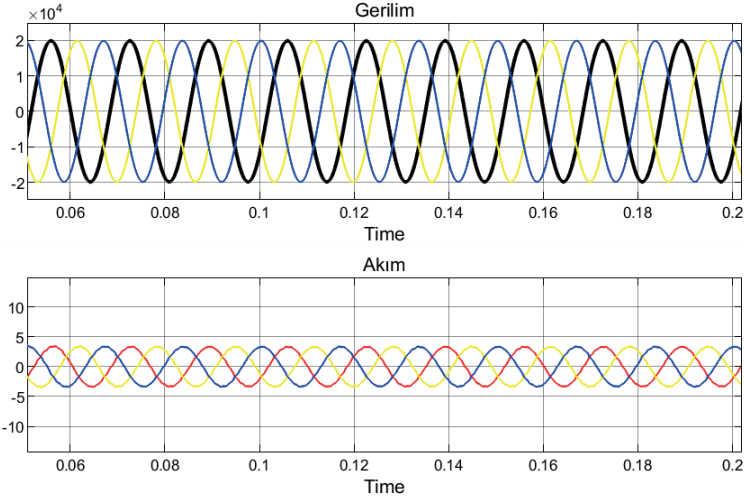
$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

olarak tanımlandığında, bu oran 1 olmaktadır. Bu da sistemin birim güç faktörü ile çalıştığını ve şebekeye yalnızca aktif (yararlı) güç enjekte ettiğini, reaktif güç alışverişi yapmadığını göstermektedir.



Şekil 9: Normal çalışma rejiminde şebekeye enjekte edilen aktif (P) ve reaktif (Q) güçler

Şekil 10, ortak bağlama noktasındaki (PCC) gerilim ve akım dalga şekillerini göstermekte olup, şebekeye enjekte edilen enerjinin kalitesinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Gerilimler kararlı, dengeli ve tamamen sinüzoidal olup, şebeke ile iyi bir senkronizasyon sağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde, evirici tarafından enjekte edilen akımlar da dengeli ve sinüzoidal olup, LCL filtresinin harmoniklerin azaltılmasındaki etkinliğini kanıtlamaktadır. Gerilim ve akım tepe noktalarının zaman uyumu, güç faktörünün bire ($\cos \varphi \approx 1$) yakın senkron çalışmayı doğrulamakta ve güç analizi sonuçlarıyla uyum göstermektedir.



Şekil 10: Normal çalışma rejiminde PCC'deki üç fazlı gerilim ve akım dalga şekilleri

3.2. Arıza Simülasyonu

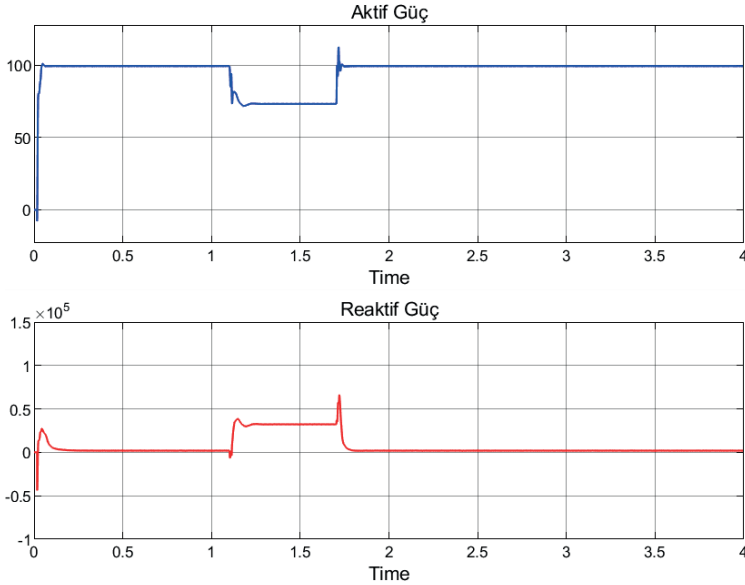
3.2.1. Kısa Devrelere Giriş

Kısa devre, bir elektrik devresinin iki veya daha fazla noktası arasında düşük empedanslı anormal bir bağlantı oluşması durumudur ve bu durum aşırı akım akışına neden olur. Şebekeye bağlı üç fazlı bir sistemde kısa devreler çeşitli şekillerde meydana gelebilir: fazlar arası, faz-nötr arası, iki faz-nötr arası veya üç fazlı birden (topraklı veya topraksız) içerecek şekilde (Zarei vd., 2021). Bu arızalar, ani gerilim düşümlerine, önemli akım artışlarına ve aktif-reaktif güçlerde ciddi bozulmalara yol açar. Üç fazlı bir fotovoltaik (PV) sistemin bu tür arızalar karşısındaki performansının değerlendirilmesi; şebekenin kararlılığını, güvenilirliğini ve emniyetini sağlamanın yanı sıra PV sistem ekipmanlarının korunması için de hayati öneme sahiptir (Alzyoud vd., 2021).

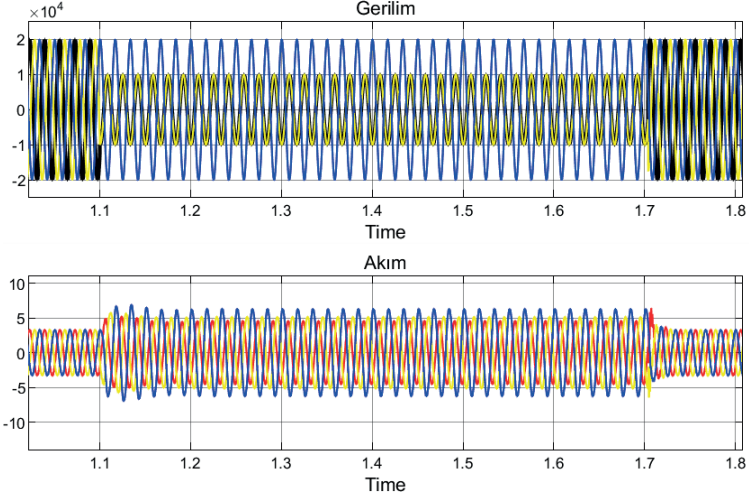
3.2.2. İki Faz Arası Arıza (Asimetrik Arıza)

1,1 s ile 1,7 s zaman aralığında uygulanan asimetrik iki fazlı bir arıza sırasında gerçekleştirilen performans analizi, kontrol stratejisinin sağlamlığını açıkça ortaya koymaktadır.

Arıza süresince, aktif güç yaklaşık 75 kW seviyesine ani bir düşüş gösterirken, şebeke gerilimini desteklemek amacıyla yaklaşık 40 kVAR reaktif güç enjekte edilmektedir. Bu davranış, arıza süresince şebekeye bağlı kalma ve reaktif güç enjeksiyonu gerekliliklerini kapsayan Fault Ride-Through (FRT) standartları ile tam uyum içerisinde. Fotovoltaik (PV) giriş gücü ile alternatif akım çıkış gücü arasındaki ani dengesizlikten kaynaklanan DC gerilimindeki hafif artış, gerilim regülatörü tarafından etkin bir şekilde kontrol altına alınmıştır. Arızanın 1,7 s anında giderilmesinin ardından, sistemin nominal çalışma koşullarına 0,1 saniyeden daha kısa sürede geri döndüğü gözlemlenmiştir. Bu hızlı toparlanma, sistemin yüksek dinamik kararlılığını ve şebeke kodlarına tam uyumluluğunu açıkça göstermektedir.



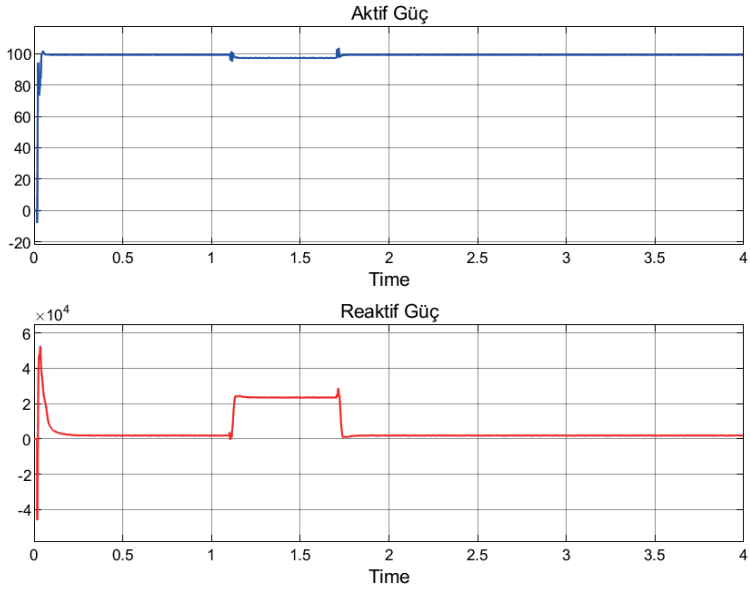
Şekil 11: İki faz arası (L-L) arıza sırasında aktif ve reaktif güçler



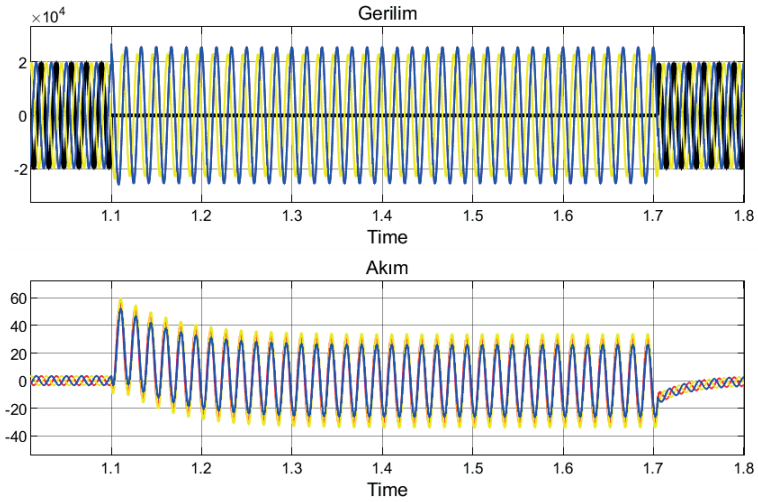
Şekil 12: İki faz arası (L-L) arıza sırasında PCC'deki gerilim ve akım dalga şekilleri

3.2.3. Faz-Nötr Arası Arıza (Asimetrik Arıza)

Şekil 13, aktif güç üzerindeki etkinin sınırlı olduğunu, hata süresince yaklaşık 98 kW seviyesinde sabitlendiğini göstermektedir. Bu durum, bir faz kaybına rağmen üretimin kesintisiz sürdürülebileceğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda sistem, şebeke gerilimini desteklemek için yaklaşık 25 kVAR reaktif güç enjekte etmektedir. Şekil 14, yalnızca bir fazda gerilim düşüşü olduğunu doğrulamaktadır. Sistem, arızalı fazdaki akımı sıfırlarken, sağlıklı fazlardaki akımları artırarak güç dengesini korumaktadır. Bu durum, asimetrik arıza durumunda bile sistemin nominal güç seviyesine yakın güç enjekte edebilme ve hızlı toparlanma yeteneğini ve kontrol stratejisinin etkinliğini göstermektedir.



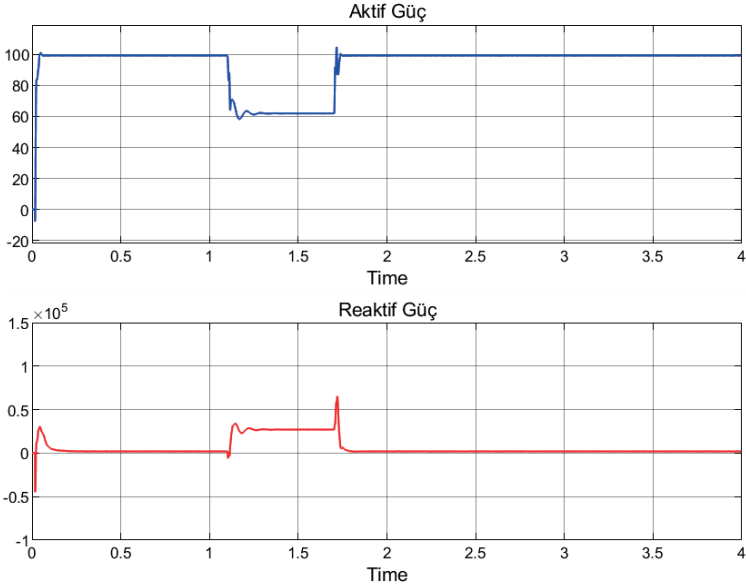
Şekil 13: Faz-nötr (L-N) arası arıza sırasında aktif ve reaktif güçler



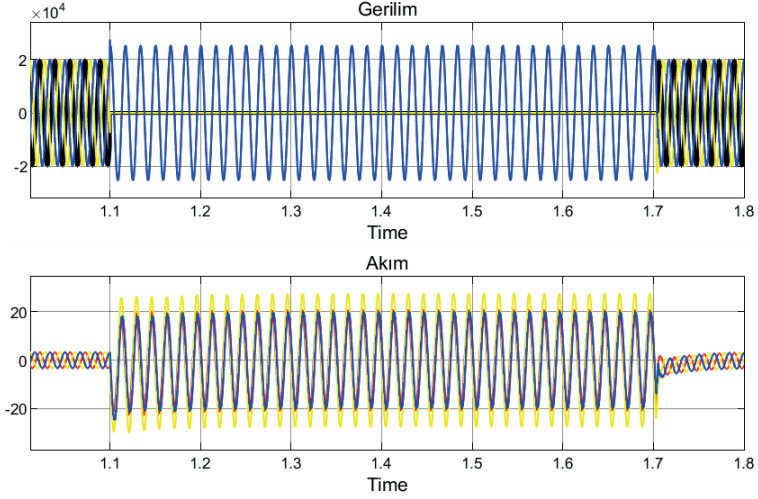
Şekil 14: Faz-nötr (L-N) arası arıza sırasında PCC'deki gerilim ve akım dalga şekilleri

3.2.4. İki Faz-Nötr Arıza (Asimetrik Arıza)

Şekil 15, sistem tepkisinin basit iki fazlı hata durumunda da benzer olduğunu göstermektedir. Hata sırasında aktif güç hızla yaklaşık 62 kW'a düşerken, sistem şebeke gerilimini desteklemek için yaklaşık 35 kVAR reaktif güç enjekte etmektedir. Şekil 16, iki fazdaki gerilim çöküşünü doğrulamaktadır. Kontrol algoritması, sağlıklı fazdaki akımı artırıp hatalı fazlardaki akımları sınırlandırarak evirici üzerindeki gerilim ve akım zorlanmalarını azaltmaktadır. Hata kaldırıldıktan sonra sistemin 0.1 saniyeden kısa sürede toparlanması, kontrol stratejisinin şiddetli asimetrik hatalara karşı etkinliğini ve sağlamlığını doğrulamaktadır.



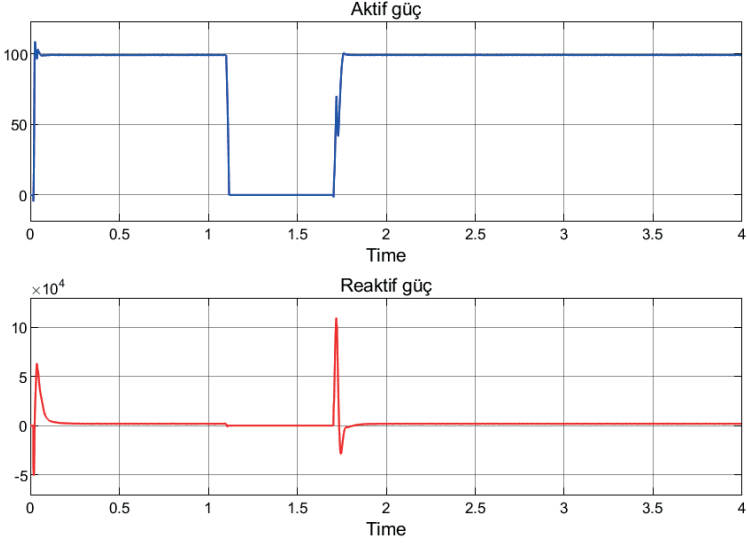
Şekil 15: İki faz-nötr (L-L-N) arıza sırasında aktif ve reaktif güçler



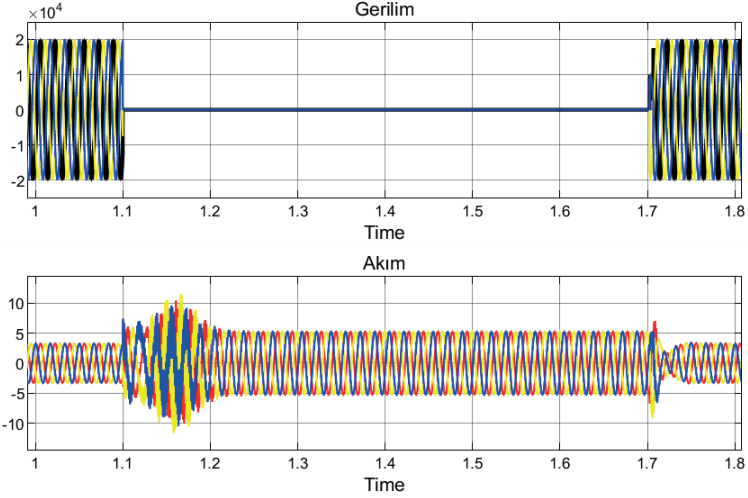
Şekil 16: İki faz-nötr (L-L-N) arıza sırasında PCC'deki gerilim ve akım dalga şekilleri

3.2.5. Üç Faz Arızası (Simetrik Arıza)

En şiddetli senaryo olan üç fazlı simetrik hata analizi, sistemin FRT (Fault Ride-Through) yeteneğinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır. 1,1 s ile 1,7 s arasında uygulanan bu hata sırasında PCC'deki gerilimler tamamen çökmüş ve aktif güç anında sıfıra düşmüştür. Buna rağmen kontrol sistemi, eviriciyi koruyarak enjeksiyon akımlarını güvenli sınırdan tutmuş ve şebekeye bağlı kalmayı başarmıştır. Hata sona erdikten sonra sistem 0,1 saniyeden kısa sürede nominal güç çıkışına geri dönerek, şebeke standartlarına tam uyumluluğunu göstermiştir.



Şekil 17: üç faz (L-L-L) arızası sırasında aktif ve reaktif güçler

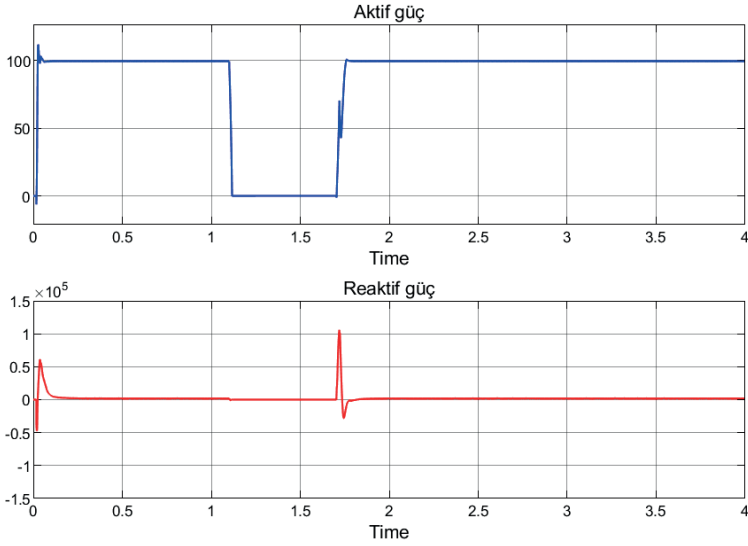


Şekil 18: üç faz (L-L-L) arızası sırasında PCC'deki gerilim ve akım dalga şekilleri

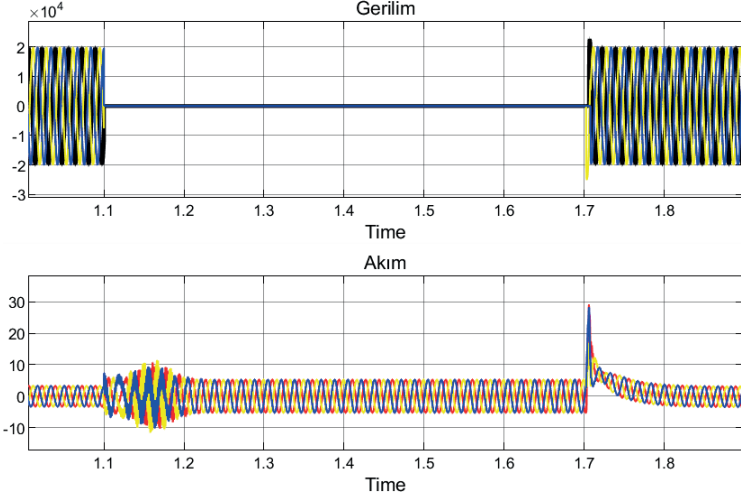
3.2.6. Üç Faz-Nötr Arası Arıza (Simetrik Arıza)

Üç faz-nötr arızası durumunda, Şekil 20'de görüldüğü gibi, ortak bağlantı noktası (PCC) gerilimi tamamen çökmekte ve bu nedenle şebekeye enjekte edilen aktif güç anında sıfır

ra düşerek hata süresince bu seviyede kalmaktadır. Bu ciddi duruma rağmen, kontrol sistemi enjeksiyon akımlarını düşük ve kontrol altında tutarak eviriciyi korumaktadır; bu durum yine Şekil 20’de gözlemlenmektedir. Hata kaldırıldıktan sonra sistem 0,1 saniyeden daha kısa sürede toparlanmakta ve Şekil 19’da görüldüğü üzere nominal güç enjeksiyonuna geri dönmektedir. Bu da sistemin en zorlu koşullarda dahi Fault Ride-Through (FRT) gereksinimlerine tam uyum sağladığını doğrulamaktadır.



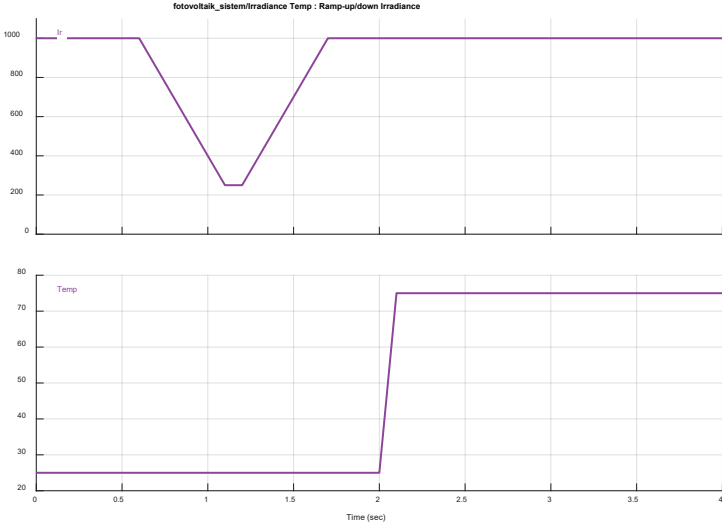
Şekil 19: Üç faz-nötr (L-L-L-N) arası arıza sırasında aktif ve reaktif güçler



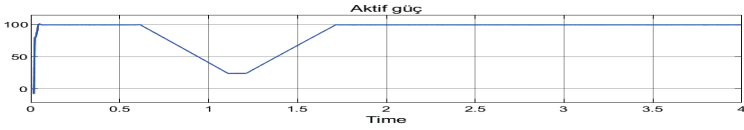
Şekil 20: Üç faz-nötr (L-L-L-N) arası arıza sırasında PCC'deki gerilim ve akım dalga şekilleri

3.2.7. Işınım ve Sıcaklığın Çıkış Gücüne Etkisi

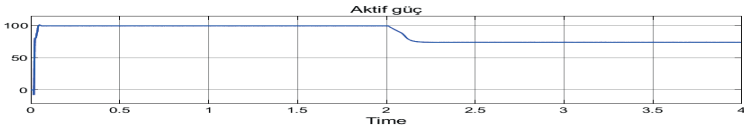
Şekil 22'ye göre, çıkış gücü ışıınım miktarı ile doğru orantılıdır; ışıınım arttıkça üretilen güç de artmaktadır. Öte yandan, Şekil 23, fotovoltaik panellerin sıcaklığındaki artışın verimliliği düşürerek çıkış gücünü azalttığını göstermektedir. Bu değişiklikler, evirici girişine gelen güç miktarını etkileyen normal çalışma koşulları kapsamında değerlendirilmelidir. Bu nedenle, sistem performansının hata analizinde sadece şebeke kaynaklı bozulmalar değil, meteorolojik koşullara bağlı değişen referans güç seviyeleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin referans gücü, hem arızalara hem de çevresel faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 21: Sisteme uygulanan ışınlam ve sıcaklık değışim profilleri



Şekil 22: Işınlam değışiminin üretilen aktif güç üzerindeki etkisi



Şekil 23: Sıcaklık değışiminin üretilen aktif güç üzerindeki etkisi

4. Bulgular

Simülasyon sonuçları, d-q referans çerçevesinde ANFIS akım denetleyicisiyle kontrol edilen PV sisteminin, hem normal çalışma koşullarında hem de farklı şebeke arızalarında yüksek kararlılık ve dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Sistem, sürekli rejimde birim güç faktöründe yaklaşık 99 kW güç üretirken çevresel değışimlere hızlı uyum sağlamaktadır. En zorlu durum olan üç fazlı kısa devre sırasında bile

ANFIS denetleyicisi, eviriciyi koruyarak akımı güvenli seviyede tutmuş ve arıza giderildiğinde 0.1 saniyeden kısa sürede yeniden nominal çalışma noktasına dönmüştür. Bu sonuçlar, ANFIS tabanlı kontrolün modern şebeke gereksinimlerini karşılayan hızlı, güvenilir ve sağlam bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 2: Fotovoltaik sistemin normal rejim ve arıza koşullarındaki dinamik tepkisinin sentezi ve karşılaştırmalı analizi.

Test Senaryosu	Temel Bozucu Etki	Aktif Güç (P) Tepkisi	Reaktif Güç (Q) Tepkisi	Kontrol Performansı & Sonuç
Normal Çalışma	Kararlı koşullar (1000 W/m ² , 25°C)	99.37 kW'ta kararlı	Sıfır (0 kVAR)	Optimum. Sistem, maksimum güç noktasında ve birim güç faktöründe çalışmaktadır.
Faz-Nötr Arızası (Asimetrik)	1 fazda gerilim kaybı	Neredeyse kararlı (~98 kW)	Orta düzeyde enjeksiyon (~25 kVAR)	Mükemmel servis sürekliliği. Kontrol, sağlam fazları kullanarak kaybı telafi eder ve gerilim desteği sağlar.
İki Faz Arası Arıza (Asimetrik)	2 fazda gerilim kaybı	Kontrollü düşüş (~75 kW)	Belirgin enjeksiyon (~40 kVAR)	Sağlam (Robust). Sistem, uyum sağlamak için gücü azaltır ve şebeke kodlarının gerektirdiği gibi aktif gerilim desteği sağlar.
Üç Faz Arızası (Simetrik)	Tam gerilim kaybı (V≈0)	0 kW'a düşüş (kaçınılmaz)	0 kVAR'a düşüş (kaçınılmaz)	Güvenlik ve FRT uyumluluğu. Kontrol, akımı sınırlayarak eviriciyi korur ve anında toparlanma sağlar.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, şebekeye bağlı 100 kW kapasiteli üç fazlı bir fotovoltaik sistemin dinamik performansını değerlendirmektedir. Sistem, gücü maksimize etmek amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) tabanlı bir Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) algoritması kullanmakta olup, çeşitli arıza senaryolarında eğitilmiş ve senkron dönen (d-q) referans düzleminde çalışan Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) tabanlı bir

akım denetleyicisi ile yönetilmektedir. Elde edilen sonuçlar, normal çalışma koşullarında 99,37 kW etkili güç enjeksiyonu ve şebeke arızalarına karşı yüksek dayanıklılık göstermektedir. Sistem, ciddi asimetrik arızalar sırasında reaktif güç enjekte ederek gerilim desteği sağlamakta ve üç fazlı kısa devre durumunda akımı sınırlandırarak 0,1 saniyeden kısa sürede hızlı bir şekilde toparlanmayı mümkün kılmaktadır. Bu performanslar, sistemin Fault Ride-Through (FRT) gereksinimlerine uygun olduğunu ve şebeke entegrasyonu için güvenilir olduğunu doğrulamaktadır.

Bu çalışma sağlam bir kontrol mimarisini doğrulamış olmakla birlikte, gelecekteki araştırmalar ve iyileştirmeler için çeşitli yollar açmaktadır.

- ✓ ANFIS denetleyicisinin performansını Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL) ile karşılaştırırken, optimizasyonu hızlandırmak ve daha global çözümler bulmak amacıyla Kuantum Esinli Optimizasyon Algoritmalarının kullanımını araştırmak (Ozgenc vd., 2025).
- ✓ Batarya depolama entegrasyonu (BESS): Sistemin ada modunda çalışma ve şebekeye frekans regülasyonu hizmeti sunma yeteneği, bir batarya sistemi entegre edilerek incelenmelidir.
- ✓ Şebeke hizmetlerinin genişletilmesi: Eviricinin, şebeke-deki mevcut harmonik bozulmaları telafi eden bir aktif filtre gibi davranma yeteneği geliştirilmelidir.
- ✓ Donanım döngüsünde doğrulama (HIL): Kontrol algoritmalarının performansı, gerçek zamanlı bir Donanım Döngüsünde Doğrulama (HIL) platformunda test edilerek onaylanmalıdır (Kumar vd., 2023).

Kaynakça

- Acharya, S., Kumar, D. V., Venu, R., Rajasekhar, B., Rohini, G., & Sathvika, R. (2025). Enhanced grid integration in hybrid power systems using ANFIS-based distributed controllers. *International Journal of Information Technology*, 17(4), 2271–2285.
- Alharbi, M. (2024). Control approach of grid-connected PV inverter under unbalanced grid conditions. *Processes*, 12(1), 212.
- Alkhalaf, S., Ali, Z. M., & Oikawa, H. (2022). A novel hybrid gravitational and pattern search algorithm based MPPT controller with ANN and perturb and observe for photovoltaic system. *Soft Computing*, 26(15), 7293–7315.
- Alzyoud, A. R., Dalabeeh, A. S., Al-Rawashdeh, A. Y., Al-Mofleh, A., Allabadi, A., Almomani, T., & Hindi, A. (2021). The impact of integration of solar farms on the power losses, voltage profile and short circuit level in the distribution system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(3), 1129–1141.
- Babu, V. V., Roselyn, J. P., Nithya, C., & Sundaravadivel, P. (2024). Development of grid-forming and grid-following inverter control in microgrid network ensuring grid stability and frequency response. *Electronics*, 13(10), 1958.
- Baekeland, N., Chatterjee, D., Lu, M., Johnson, B., & Seo, G. S. (2024). Overcurrent limiting in grid-forming inverters: A comprehensive review and discussion. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Basu Roy Chowdhury, S., & Gayen, P. K. (2024). An improved capability of LVRT in single-stage three-phase grid-linked PV systems. *Electrical Engineering*, 106(1), 125–143.
- Bilgundi, S. K., Sachin, R., Pradeepa, H., Nagesh, H. B., & Kumar, M. L. (2022). Grid power quality enhancement using an ANFIS optimized PI controller for DG. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(1), 1–14.
- Danyali, S., Babaeifard, M., Shirkhani, M., Azizi, A., Tavoosi, J., & Dadvand, Z. (2024). A new neuro-fuzzy controller based maximum power point tracking for a partially shaded grid-connected photovoltaic system. *Heliyon*, 10(17), e30025.

- Ellithy, H. H., Hasanien, H. M., Alharbi, M., Sobhy, M. A., Taha, A. M., & Attia, M. A. (2024). Marine predator algorithm-based optimal PI controllers for LVRT capability enhancement of grid-connected PV systems. *Biomimetics*, 9(2), 66.
- Hayat, A., Sibtain, D., Murtaza, A. F., Shahzad, S., Jajja, M. S., & Kilic, H. (2023). Design and analysis of input capacitor in DC–DC boost converter for photovoltaic-based systems. *Sustainability*, 15(7), 6321.
- Hayder, W., Ogliari, E., Dolara, A., Abid, A., Ben Hamed, M., & Sbitta, L. (2020). Improved PSO: A comparative study in MPPT algorithm for PV system control under partial shading conditions. *Energies*, 13(8), 2035.
- Heroual, S., Belabbas, B., Elzein, I. M., Diab, Y., Ma'arif, A., Mahmoud, M. M., ... Benabdallah, N. (2025). Enhancement of transient stability and power quality in grid-connected PV systems using SMES. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 5(2), 990–1005.
- Jaiswal, A., & Deb, S. (2024). A novel technique to detect and mitigate harmonic during islanding in grid-connected PV system. *Energy Reports*, 12, 3940–3956.
- Kalwar, D. K. (2025). *Design and performance analysis of dual stage multifunctional PV inverter for non-active current compensation using ANFIS controller* [Doctoral dissertation, Institute of Engineering, Tribhuvan University].
- Khanna, A., & Garg, A. (2025, January). Voltage sag ride analysis for grid-connected PV system. In *2025 International Conference on Cognitive Computing in Engineering, Communications, Sciences and Biomedical Health Informatics (IC3ECSBHI)* (pp. 512–516). IEEE.
- Kiran, S. R., Basha, C. H., Singh, V. P., Dhanamjayulu, C., Prusty, B. R., & Khan, B. (2022). Reduced simulative performance analysis of variable step size ANN based MPPT techniques for partially shaded solar PV systems. *IEEE Access*, 10, 48875–48889.
- Kumar, C., Lakshmanan, M., Jaisiva, S., Prabaakaran, K., Barua, S., & Fayek, H. H. (2023). Reactive power control in renewable rich power grids: A literature review. *IET Renewable Power Generation*, 17(5), 1303–1327.

- Kumar, N., Tripathi, S. M., & Govil, V. K. (2023, February). Virtual HIL simulation of grid-tied PV inverter with hysteresis current controller. In *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)* (pp. 1–5). IEEE.
- Kumar, P., Ranjan, R., & Yadav, A. K. (2024). Comparative power quality performance evaluation of grid-connected solar PV system. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 105(3), 585–594.
- Matambo, F. T. (2025). *Stability analysis of grid-connected solar PV systems under asymmetrical faults* [Doctoral dissertation, Texas Tech University].
- Mishra, M. K., & Lal, V. N. (2021). An enhanced control strategy to mitigate grid current harmonics and power ripples of grid-tied PV system without PLL under distorted grid voltages. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 4587–4602.
- Nithya, C., & Roselyn, J. P. (2022). Development of grid-side converter-based FRT control and protection in a grid-connected solar photovoltaic park system under different control modes. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1009196.
- Ozgenc, B., Aslanhan, Y. A. B., & Altas, I. H. (2025). Improving LVRT capability in grid-connected PV system using DRL based controller. *IEEE Access*.
- Patra, R., Chaudhary, P., & Shah, O. A. (2024). Design and development of ANFIS based controller for three phase grid-connected system. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 4(1), 125–138.
- Pola, S., Azzouz, M., Awad, A. S., & Sindi, H. (2023). Fault ride-through strategies for synchronverter-interfaced energy resources under asymmetrical grid faults. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 14(4), 2391–2405.
- Roy, R. B., Rokonuzzaman, M., Amin, N., Mishu, M. K., Alahakoon, S., Rahman, S., ... Pasupuleti, J. (2021). A comparative performance analysis of ANN algorithms for MPPT energy harvesting in solar PV system. *IEEE Access*, 9, 102137–102152.

- Sandar, W., & Wai, H. P. (2025). Voltage sag and swell mitigation using dynamic voltage restorer in grid-connected PV system. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 14(1).
- Sharma, V., Haque, M. H., Aziz, S. M., & Kauschke, T. (2024). Reducing overvoltage-induced PV curtailment through reactive power support of battery and smart PV inverters. *IEEE Access*.
- Soomro, M., Memon, Z. A., Baloch, M. H., Mirjat, N. H., Kumar, L., Tran, Q. T., & Zizzo, G. (2023). Performance improvement of grid-integrated doubly fed induction generator under asymmetrical and symmetrical faults. *Energies*, 16(8), 3350.
- Tan, A. (2025). Grid integration of single-phase inverters using a robust PLL-less control strategy for renewable energy applications. *Energy Science & Engineering*.
- Tobbal, F., Hadj Arab, A., & Boulahchiche, S. (2025). Experimental analysis of voltage quality at PCC of grid-connected PV system. In *Technological and Innovative Progress in Renewable Energy Systems: Proceedings of the 2024 International Renewable Energy Days (IREN Days' 2024)* (pp. 181–185). Springer Nature Switzerland.
- Upadhyay, N., Padhy, N. P., & Agarwal, P. (2023). Grid-current control with inverter-current feedback active damping for LCL grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(1), 1738–1749.
- Wang, B., Zhao, P., & Wang, S. (2022, October). Research on control of photovoltaic grid-connected inverter based on filter of LCL. In *International Conference on Computer Engineering and Networks* (pp. 821–827). Springer Nature Singapore.

Ayçiçeği Çekirdeği Kabuklarından Elde Edilen Aktif Karbonların Sentezi ve Karakterizasyonu: Dokusal Özellikler, Elektrokimyasal Performans ve Tarımsal-Endüstriyel Atıkların Değerlendirilmesi

Gilbert Jose LİRA RAMOS*

Özet: Lityum iyon piller (LIB'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve kararlılıkları nedeniyle elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar çok çeşitli uygulamalar için enerji depolamada kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, mevcut sınırlamaların üstesinden gelmek için gelişmiş anot malzemelerinin geliştirilmesi çok önemlidir. 372 mAh/g özgül kapasiteye sahip konvansiyonel grafit, yüksek enerji talepleri için yetersizdir. Silikon, önemli ölçüde daha yüksek bir teorik kapasite (4200 mAh/g) sunmasına rağmen, lityumlama sırasında büyük hacimsel genleşme (yaklaşık %400) nedeniyle hızlı bozulmaya uğrar, bu da toz haline gelmeye ve kararsız bir katı elektrolit arayüzünün oluşumuna neden olur (SEI). Bu bağlamda, biyokütle kaynaklı aktif karbonların umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, ayçiçeği kabuklarından, bol ve düşük maliyetli tarımsal-endüstriyel kalıntılardan elde edilen aktif karbonların sentezi ve kapsamlı karakterizasyonuna odaklanmaktadır. LIB'ler için yüksek performanslı anot malzemeleri olarak potansiyellerinin değerlendirilmesi önerilmektedir. Aktif karbonların sentezi, nispeten düşük sıcaklıklarda verimliliği ve yüksek verimi ile bilinen bir yöntem olan çinko klorür ($ZnCl_2$) ile kimyasal aktivasyon yoluyla gerçekleştirilecektir. Sıcaklık, alıkonma süresi ve $ZnCl_2$ emprenye oranı gibi temel aktivasyon parametreleri, dokusal özellikleri kontrol etmek için optimize edilecektir. Bu çalışma, ayçiçeği kabuğu gibi tarımsal-endüstriyel atıkların, enerji depolama ihtiyaçları için sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif sağlayarak LIB'ler için gelişmiş anot malzemelerine dönüştürülebileceğini göstermeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, anot, lityum-iyon piller, ayçiçeği kabuğu, kimyasal aktivasyon.

* Yüksek Lisans Öğrencisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Y.L. Programı, YL2330151006@ogr.sdu.edu.tr, ORCID: 0009-0003-8565-0941

Abstract: Lithium-ion batteries (LIBs) are critical for energy storage in a wide range of applications, from electronic devices to electric vehicles, due to their high energy density and stability. However, the development of advanced anode materials is crucial to overcome current limitations. Conventional graphite, with a specific capacity of 372 mAh/g, is insufficient for high energy demands. Although silicon offers a significantly higher theoretical capacity (4200 mAh/g), it undergoes rapid degradation due to large volumetric expansion (approximately 400%) during lithification, leading to pulverization and the formation of an unstable solid-electrolyte interface (SEI). In this context, biomass-derived activated carbons are emerging as promising alternatives. This study focuses on the synthesis and comprehensive characterization of activated carbons obtained from sunflower hulls, an abundant and low-cost agricultural-industrial residue. It proposes to evaluate their potential as high-performance anode materials for LIBs. The synthesis of activated carbons will be carried out via chemical activation with zinc chloride ($ZnCl_2$), a method known for its efficiency and high yield at relatively low temperatures. Key activation parameters such as temperature, retention time, and $ZnCl_2$ impregnation rate will be optimized to control textural properties. This study aims to demonstrate that agricultural-industrial wastes such as sunflower hulls can be transformed into advanced anode materials for LIBs, providing a sustainable, economical, and environmentally friendly alternative for energy storage needs.

Keywords: Activated carbon, anode, lithium-ion batteries, sunflower shell, chemical activation.

Giriş

Lityum iyon piller (LIB'ler), elektronik cihazlarımıza, araçlarımıza ve enerji depolama sistemlerimize güç sağlama şeklimizi dönüştürerek kendilerini günümüzün enerji depolama ortamında lider bir teknoloji olarak konumlandırdı. Başarısı, etkileyici enerji yoğunluğuna, yüksek nominal voltajına ve düşük kendi kendine deşarjına bağlanmaktadır (Malik ve ark., 2022). Bununla birlikte, elektrikli araçlar ve büyük ölçekli depolama sistemleri gibi daha zorlu uygulamalara yönelik artan talep, daha da büyük kapasiteler, daha uzun hizmet ömrü ve daha fazla güvenlik sunabilen gelişmiş malzemeler için sürekli arayışı artırıyor (Casimir ve ark., 2016; Fergus, 2010).

Anot, LIB'lerin kritik bir bileşenidir ve malzemesi, pilin genel performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Geleneksel olarak grafit, stabilitesi ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle baskın anot malzemesi olmuştur. Bununla birlik-

te, 372 mAh/g'lik teorik özgül kapasitesi, daha yüksek enerji yoğunluğu gerektiren yeni nesil uygulamalar için önemli bir sınırlama olduğunu kanıtlamaktadır (Casimir ve ark., 2016). Alternatif arayışında silikon, grafitin on katından fazla olan 4200 mAh/g'lik olağanüstü teorik gravimetrik kapasitesi sayesinde umut verici bir aday olarak ortaya çıkmıştır (Casimir ve ark., 2016). Bu avantaja rağmen, silikon, büyük ölçekte ticarileştirmeyi zorlaştıran doğal zorluklar sunar. En ünlüsü, lityum yerleştirme (lityum) sırasında maruz kaldığı muazzam hacimsel genişlemedir (yaklaşık %400), malzemenin toz haline gelmesine, elektrik temasının kaybına ve fazlar arası katı elektrolit (SEI) tabakasının kararsız oluşumuna yol açar (Casimir ve ark., 2016; Fergus, 2010). Bu fenomenler, şarj ve deşarj döngüleri boyunca pil performansının hızlı bir şekilde düşmesine neden olur.

Bu sınırlamaları ele almak için araştırmalar, yalnızca yüksek kapasite sunmakla kalmayıp aynı zamanda mükemmel döngüsel stabilite sunan yeni anot malzemeleri geliştirmeye odaklanmıştır. Bu bağlamda, biyokütle kaynaklı aktif karbonlar (AC'ler) uygulanabilir bir alternatif olarak büyük ilgi görmüştür (Deng ve ark., 2015; Fletcher ve ark., 2024). Bu malzemeler, bollukları, düşük maliyetleri, sürdürülebilir yapıları ve verimli lityum iyon taşımacılığı için çok önemli özellikler olan yüksek özgül yüzey alanı ve kontrol edilebilir gözeneklilik sunma yetenekleri ile karakterize edilir (Fletcher ve ark., 2024).

Bu çalışma, dünya çapında büyük hacimlerde üretilen bir tarımsal-endüstriyel atık olan ayçiçeği kabuklarından aktif karbonların sentezi ve karakterizasyonuna odaklanmaktadır. Çinko klorür ($ZnCl_2$) ile kimyasal aktivasyon stratejisi, bu malzemelerin dokusal özelliklerini optimize etmek için kullanılacaktır. Daha sonra, mevcut malzemelerin sınırlamalarının üstesinden gelme ve atıkları değerlendirerek döngüsel ekonomiye katkıda bulunma potansiyellerini göstermek ama-

çıyla LIB'ler için anot malzemeleri olarak elektrokimyasal performansları değerlendirilecektir (Dawood ve ark., 2014; Fletcher ve ark., 2024).

1. Literatür Taraması

1.1. Lityum İyon Piller ve Anotun Rolü

Lityum iyon piller (LIB'ler), lityum iyonlarının bir katot ve bir anot arasındaki hareketi yoluyla enerji depolayan ve serbest bırakan elektrokimyasal cihazlardır. 1990'larda Sony tarafından ticarileştirilmelerinden bu yana kapasite, güç yoğunluğu, kullanım ömrü ve güvenlik konularında önemli ilerlemeler kaydettiler. Bu ilerleme, büyük ölçüde, bileşenleri için, özellikle katot ve anot malzemeleri olmak üzere gelişmiş malzemelerin sürekli olarak piyasaya sürülmesinden kaynaklanmaktadır (Malik ve ark., 2022). Anot malzemesi, LIB'lerin elektrokimyasal özellikleri ve güvenliği için çok önemlidir (Casimir ve ark., 2016; Fergus, 2010).

1.2. Konvansiyonel Anot Malzemeleri ve Yüksek Kapasiteli Alternatif Arayışları

Geleneksel olarak grafit, LIB'lerde standart anot malzemesi olmuştur (Casimir ve ark., 2016; Fergus, 2010). Grafit yapısı, LiC_6 oluşturan lityum iyonlarının enterkalasyonuna izin verir ve bu da 372 mAh/g 'lik bir spesifik kapasite ile sonuçlanır. Grafit, iyi bir döngüsel kararlılık ve düşük çalışma voltajı sunarken, elektrikli araçlar gibi modern uygulamaların artan güç taleplerini karşılama yeteneği sınırlıdır (Casimir ve ark., 2016). Silisyum (Si), bir silikon atomu yaklaşık dört lityum iyonuna ($\text{Li}_{4.4}\text{Si}/\text{Li}_{22}\text{Si}_5$) bağlanabildiğinden, 4200 mAh/g 'lik olağanüstü teorik gravimetrik kapasitesi nedeniyle grafitin yerini alacak en umut verici anot malzemesi olarak tanımlanmıştır (Casimir ve ark., 2016).

1.3. Umut Verici Anot Malzemeleri Olarak Biyokütle Türevli Aktif Karbonlar

Aktif karbonlar (AC'ler), günümüz anotlarının zorluklarının üstesinden gelmek için çekici bir çözüm olarak sunulmaktadır. Bollukları, öncüllerin (tarımsal kalıntılar) düşük maliyeti ve yüzey alanı ve gözeneklilik gibi dokusal özelliklerini tasarlama yetenekleri, onları lityum iyon depolama için ideal kılar (Deng et al., 2015; Fletcher et al., 2024). AC'lerin gözenekli yapısı, lityum iyonlarının difüzyonunu kolaylaştırabilir, depolama alanlarının sayısını artırabilir ve küçük hacimli genişlemeler için bir yastık sağlayabilir, böylece döngüsel stabiliteyi artırabilir (Casimir et al., 2016; Shchegolkov et al., 2021).

Önceki çalışmalar, optimize edilmiş koşullar altında 1600 m²/g'yi aşan spesifik yüzey alanlarına sahip kabuklar da dahil olmak üzere çeşitli biyokütlelerden CA üretimini bildirmiştir (Fletcher et al., 2024). Bu değerler, geleneksel olarak LIB anotlarında kullanılan karbonların değerlerinden çok daha yüksektir (Shchegolkov et al., 2021).

1.4. Aktif Karbon Sentez Yöntemleri ve Anahtar Parametreler Fiziksel Aktivasyon

Biyokütlenin inert bir atmosferde karbonizasyonunu ve ardından elde edilen karbonun gözenek yapısını geliştirmek için yüksek sıcaklıklarda (700-1000 °C) oksitleyici maddelerle (CO₂, su buharı veya hava) kısmi gazlaştırılmasını içerir (Fletcher ve ark., 2024). Kimyasal Aktivasyon: Daha düşük sıcaklıklar gerektirir (genellikle <700 °C) ve çinko klorür (ZnCl₂), fosforik asit (H₃PO₄) veya potasyum hidroksit (KOH) gibi dehidrasyon maddeleri kullanır (Dawood ve ark., 2014; Fletcher ve ark., 2024). Bu yöntem, enerji tüketimini azaltan ve daha yüksek aktif karbon verimine izin veren düşük sıcaklıklarda verimliliği nedeniyle tercih edilir. Çinko klorür (ZnCl₂)

yaygın olarak kullanılan bir aktive edici ajandır ve yüksek yüzey alanlarına sahip aktif karbonların üretilmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. Mekanizması, öncüsün emprenye edilmesini, ardından $ZnCl_2$ 'nin bir dehidrasyon maddesi olarak işlev gördüğü, katran oluşumunu inhibe ettiği ve gözenek gelişimini teşvik ettiği karbonizasyonu içerir (Dawood ve ark., 2014; Fletcher ve ark., 2024).

Kimyasal aktivasyon sırasında aktif karbonların özelliklerini etkileyen temel parametreler şunları içerir:

Aktivasyon Sıcaklığı, Gözenek yapısını ve yüzey alanını doğrudan etkiler (Dawood ve ark., 2014; Fletcher ve ark., 2024). Uygun olmayan sıcaklıklar yetersiz gözenekliliğe neden olabilir.

Bekletme süresi, Malzemenin aktivasyon sıcaklığında tutulduğu ve gözenek gelişim derecesini etkileyen süre (Fletcher ve ark., 2024). Emprenye Oranı, ($ZnCl_2$ /Öncü). Aktive edici ajan miktarı, aktif kömürün nihai özelliklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir, çünkü yetersiz bir oran gözenek oluşumunu sınırlayabilir veya kalıntı bırakabilir (Fletcher ve ark., 2024). Bu parametrelerin optimize edilmesi, belirli uygulamalar için istenen dokusal özelliklere sahip malzemeler tasarlamak için çok önemlidir.

2. Metodoloji

Bu çalışmada, ayçiçeği ve yer fıstığı kabuklarından türetilen aktif karbonların sistematik bir sentezi ve karakterizasyonu gerçekleştirilecek, ardından lityum iyon piller için anot olarak elektrokimyasal performanslarının kapsamlı bir değerlendirmesi yapılacaktır.

2.1. Öncü Malzemeler

Ayçiçeği kabukları yerel tarımsal-endüstriyel kaynaklardan toplanacaktır. Bu malzemeler bollukları, düşük maliyet-

leri ve yüksek karbon içerikleri nedeniyle seçilmiştir (Deng ve ark., 2015; Fletcher ve ark., 2024).

2.2. Kimyasal Aktivasyon ile Aktif Karbonların Sentezi

Aktif karbonların (AC'ler) sentez süreci, biyokütle atıkları için önceden belirlenmiş protokolleri uyarlayarak çinko klorür ($ZnCl_2$) ile kimyasal aktivasyon yöntemine dayanacaktır (Dawood ve ark., 2014; Fletcher ve ark., 2024): Öncü Hazırlık: Ayçiçeği ve yer fıstığı kabukları, yüzey safsızlıklarını gidermek için deiyonize su ile yıkanacak, gece boyunca $100 \pm 2^\circ C$ 'de bir fırında kurutulacak, öğütülecek ve 2mm'lik bir partikül boyutuna kadar taranacaktır. Emprenye: 5g elenmiş öncü (W1), deiyonize su içinde bir $ZnCl_2$ çözeltisi ile emprenye edilecektir. Aktivatör miktarının etkisini belirlemek için 0.25, 1.13 ve 2 gibi farklı emprenye oranları ($ZnCl_2$ g/öncü g) araştırılacaktır. Karışım, oda sıcaklığında yaklaşık 24 saat dengelenmeye bırakılacaktır. Emprenye edilmiş numune daha sonra gece boyunca $100 \pm 2^\circ C$ 'de bir fırında kurutulacaktır. Karbonizasyon: Kuru numune, inert bir nitrojen atmosferi (250mL/dak) altında bir tüp fırında karbonize edilecektir. 300, 450 ve $600^\circ C$ sıcaklıklar, 15, 68 ve 120 dakikalık bekleme/tutma süreleri ve $15^\circ C/dk$ rampa hızı uygulanacaktır. İşlem sonrası: Karbonize ürün tartılacak (W3) ve kalan aktif edici tuzu süzmek için 200mL 0.1 M HCl içeren bir kaba aktarılacaktır. Karışım 1 saat çalkalanır. Ürün daha sonra sıcak deiyonize suda kaynatılacak ve klorür iyonları tamamen uzaklaştırılana ve asitlik azalana kadar oda sıcaklığında birkaç kez deiyonize su ile yıkanacaktır. Yıkanan klima, yaklaşık 24 saat boyunca $100 \pm 2^\circ C$ 'de bir fırında kurutulacak ve verimi hesaplamak için tekrar tartılacaktır (W4).

2.3. Fizikokimyasal karakterizasyon

Sentezlenen aktif karbonlar çeşitli teknikler kullanılarak karakterize edilecektir, Proksimal Analiz: Öncülerin ve

CA'ların uçucu madde, sabit karbon, nem ve kül içeriğini belirlemek için termogravimetrik bir teknik (BS1016'ya benzer) kullanılarak gerçekleştirilecektir (Fletcher ve ark., 2024). Dokusal Analiz (BET): -195.8°C 'de nitrojen adsorpsiyonu kullanan bir Micromeritics ASAP 2420 cihazı kullanılacaktır. Numuneler vakum altında 4 saat boyunca 250°C 'de gazdan arındırılacaktır. Spesifik yüzey alanı (SBET), Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi kullanılarak hesaplanacaktır. Mikro gözenek alanı (Smicro) ve mikro gözenek hacmi (Vmicro) t-plot yöntemi ile elde edilecek ve gözenek boyutu dağılımı Barrett-Joyner-Halenda denklemi (BJH) ile hesaplanacaktır (Deng ve ark., 2015; Fletcher ve ark., 2024). Morfoloji (SEM): Malzemelerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM, LEO-1530, LEO, Almanya) ile analiz edilecektir. Bu, heterojen doğanın ve yapıdaki kanalların veya gözeneklerin varlığının görselleştirilmesine izin verecektir (Deng ve ark., 2015; Fletcher ve ark., 2024). Yoğunluk: AC'lerin yoğunluğu helyum piknometrisi (Micromeritics Accupyc II) kullanılarak belirlenecektir (Fletcher ve ark., 2024). Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR): $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ aralığında bir FTIR spektrometresi (MB3000 FT-IR) kullanılarak AC'lerin yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupları tanımlamak için yapılandırılır (Fletcher ve ark., 2024).

2.4. Elektrokimyasal Değerlendirme

Anot malzemeleri olarak aktif karbonların elektrokimyasal değerlendirmesi, yarı hücre konfigürasyonlarında gerçekleştirilecektir. Elektrot hazırlama: AC'ler, iletken bir ajan (örneğin karbon siyahı) ve bir bağlayıcı (örneğin PVDF veya PAA veya CMC gibi daha elastik bir bağlayıcı) ile optimum oranda karıştırılacaktır. Süspansiyon bir bakır akım kolektörü üzerinde biriktirilecek ve kurutulacaktır. Yarım Hücre

Konfigürasyonu: Madeni para hücreleri, çalışma elektrodu olarak aktif karbon, karşı elektrot ve referans elektrot olarak metalik lityum ve susuz bir elektrolit (örneğin, EC/DEC'de 1.0 M LiPF₆) ile birleştirilecektir (Fergus, 2010; Shchegolkov ve ark., 2021). Döngüsel Voltametri (CVA): Elektrot/elektrolit arayüzünde meydana gelen lityum-iyon interkalasyon/deinterkalasyon süreçlerini ve reaksiyonlarını araştırmak için CVA testleri yapılacaktır. Bu, malzemenin elektrokimyasal olarak aktif olduğu potansiyel aralıkların belirlenmesini mümkün kılacaktır (Shchegolkov ve ark., 2021). Galvanostatik Yükleme/Boşaltma Testleri: Galvanostatik çevrim, belirli şarj/deşarj kapasitesini, coulombic verimliliği ve uzun vadeli çevrim kararlılığını ölçmek için farklı akım yoğunluklarında (örneğin, C/10, C/5, 1C) ve voltaj aralıklarında (örneğin, 0.01 ila 2.0 V ve Li/Li+) gerçekleştirilecektir (Fergus, 2010; Shchegolkov ve ark., 2021). Yüksek sayıda döngüden sonra kapasitenin korunmasına özellikle dikkat edilecektir. Lityum Difüzyon Katsayılarının Hesaplanması: Kronoamperometri gibi teknikler kullanılarak, aktif karbon yapısındaki lityum iyonlarının difüzyon katsayıları hesaplanacak ve iyon taşıma kinetiği hakkında bilgi verilecektir (Shchegolkov ve ark., 2021).

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmanın sonuçlarının, ayçiçeği kabuklarından türetilen aktif karbonların ve LIB'ler için yüksek performanslı anot malzemelerinin fizibilitesini göstermesi beklenmektedir.

3.1. Dokusal Özellikler ve Morfoloji

ZnCl₂ (sıcaklık, alıkonma süresi, emprenye oranı) ile kimyasal aktivasyon parametrelerinin optimizasyonu, istenen dokusal özelliklerin elde edilmesi için kritik öneme sahiptir (Fletcher ve ark., 2024). Sentezlenen aktif karbonların şunları

sergilemesi beklenir: Yüksek Özgül Yüzey Alanları: Önceki çalışmalar, fıstık kabuğu CA'ları için $1700 \text{ m}^2/\text{g'ye}$ kadar yüzey alanları bildirmiştir (Fletcher ve ark., 2024) ve ayçiçeği kabukları için benzer aralıklar (Deng ve ark., 2015). Bu yüksek yüzey alanları, iyi dağılmış gözeneklilik ile, lityum iyonları için çok sayıda interkalasyon bölgesi sağlamak ve bunların hızlı taşınmasını kolaylaştırmak için çok önemlidir (Shchegolkov ve ark., 2021). Mezogözenekli ve mikro gözenekli yapılar: Malzemelerin, ortalama gözenek boyutları 2 nm' den büyük olan mikro gözenekler ve mezoporların bir kombinasyonunu sergilemesi beklenir ve bu da onları mezogözenekli malzemeler olarak sınıflandırır. Mikro gözenekler yüksek adsorpsiyon kapasitesinden sorumlu olabilirken, mezoporlar lityum iyonlarının malzemenin yapısı boyunca difüzyonunu kolaylaştıracaktır (Fletcher ve ark., 2024). Heterojen ve Gözenekli Morfoloji: SEM görüntüleri, kanalların varlığını ve oldukça gözenekli bir yapıyı göstererek AC'lerin heterojen doğasını ortaya çıkaracaktır. Bu morfoloji, elektrolit difüzyonu ve aktif bölgelere erişim için avantajlıdır (Fletcher ve ark., 2024).

3.2. Proksimal Analiz ve Yoğunluk

Proksimal analizler (uçucu madde, sabit karbon, kül) kömürlerin saflığını ve bileşimini anlamak için önemlidir. Ayçiçeği ve yer fıstığı kabuğu CA'larının, malzemenin kalitesini gösteren düşük kül içeriğine (%1'den az) ve yüksek sabit karbon içeriğine (%86'dan fazla) sahip olması beklenmektedir (Fletcher ve ark., 2024). Elektrotun daha yüksek bir enerji yoğunluğuna katkıda bulunan nispeten yüksek bir yoğunluk (örneğin 1.455 g/cm^3 ile 1.750 g/cm^3 arasında) da beklenir (Fletcher ve ark., 2024).

3.3. Elektrokimyasal Performans

Aktif karbonların elektrokimyasal değerlendirmesinin, anot malzemeleri olarak büyük potansiyellerini göstermesi beklenmektedir: Üstün Özgül Kapasite: Yüksek yüzey alanı

ve kontrollü gözeneklilik göz önüne alındığında, AC'lerin geleneksel grafitten (372 mAh/g) daha üstün bir spesifik şarj/deşarj kapasitesi sergileyeceği tahmin edilmektedir (Casimir ve ark., 2016). Bu, lityum iyonlarının malzemenin mikro gözenekleri ve yüzeyi üzerinde enterkalasyonu/adsorpsiyonu yoluyla sağlanacaktır (Shchegolkov ve ark., 2021). Karbon nanotüplere dayalı benzer malzemeler, saf aktif karbon için 277 mAh/g'ye kadar kapasiteler göstermiştir (Shchegolkov ve ark., 2021), optimize edilmiş biyokütle ile performansı artırmak için kapsam önermektedir. Geliştirilmiş döngüsel kararlılık: Aktif karbonların gözenekli yapısı, küçük hacimli genleşmeler için bir tampon görevi görecek, böylece saf silikon anotlarda gözlenen toz haline gelme ve yapısal bozulmayı azaltacaktır. Bu, pil dayanıklılığı için kritik bir faktör olan çok sayıda döngü boyunca daha iyi kapasite tutma ile sonuçlanacaktır. Ek olarak, yeni yüzeylere daha az maruz kalması nedeniyle daha kararlı bir SEI tabakası oluşacaktır (Casimir ve ark., 2016). Gelişmiş Lityum-İyon Kinetiği: Gözenek dağılımı ve yüksek elektrik iletkenliği (özellikle optimize edilmiş grafit veya bağlayıcı ile birleştirildiğinde), lityum iyonlarının hızlı ve verimli bir şekilde taşınmasını kolaylaştıracak ve yüksek şarj/deşarj oranlarında iyi performans sağlayacaktır (Casimir ve ark., 2016; Shchegolkov ve ark., 2021). Lityum iyonlarının difüzyon katsayılarının olumlu olması beklenir, bu da iyonların malzemenin yapısı içinde hızlı bir şekilde hareket ettiğini gösterir. Anyon Serpiştirme Mekanizması: İşlevselleştirilmiş aktif karbonlar söz konusu olduğunda, hekzaflorofosfat anyonlarının grafit malzemelerin interlaminar boşluğunda ve karbon nanotüplerin kendisinde enterkalasyonunun, özellikle bir lityum elektroda göre 3.5-4.5 V potansiyeller aralığında kapasiteye katkıda bulunabileceği gözlemlenmiştir (Shchegolkov ve ark., 2021). Bu, biyokütle CA'larının yüzey işlevselleştirilmesinin, şarj depolaması için ek yollar açabileceğini düşündürmektedir. Özetle, beklenen sonuçlar, sentez

ve yapısal özellikleri dikkatli bir şekilde kontrol ederek, ayçiçeği ve yer fıstığı kabuklarından türetilen aktif karbonların, yüksek kapasite, döngüsel kararlılık ve iyon taşıma kinetiği arasında optimal bir denge sunabileceğini ve bunları gelecek nesil LIB'ler için rekabetçi anot malzemeleri olarak konumlandırabileceğini göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma, lityum-iyon pil anotlarındaki uygulamalar için yüksek performanslı aktif karbonların üretimi için tarımsal-endüstriyel atık olarak ayçiçeği kabuklarının potansiyelinin altını çizmektedir. Sıcaklık, alıkonma süresi ve emprenye oranı gibi temel parametreleri optimize eden çinko klorür ile kimyasal aktivasyon metodolojisi, belirli dokusal özelliklere sahip malzemeler tasarlamak için gereklidir. Sentezlenen aktif karbonların, verimli lityum iyon taşınması ve çok sayıda depolama alanı sağlamak için çok önemli olan yüksek özgül yüzey alanları ve iyi gelişmiş gözeneklilik sergilemesi beklenmektedir. BET, SEM ve proksimal analiz kullanan fizikokimyasal karakterizasyon, bu özellikleri doğrulayacak ve elektrokimyasal performansı destekleyen gözenekli morfolojileri ve yapıları ortaya çıkaracaktır.

Elektrokimyasal performans açısından, bu malzemelerin geleneksel grafitin sınırlı kapasitesini aşması ve saf silikon anotlarla ilişkili hacimsel genleşme sorunlarını ve SEI kararsızlığını ele alması beklenmektedir. AC'lerin gözenekli yapısı, döngüsel stabiliteyi ve uzun vadeli kapasite korumasını iyileştiren bir tampon görevi görecektir. Ek olarak, optimize edilmiş gözenek dağılımı ile kolaylaştırılan iyi lityum iyon kinetiği, çeşitli şarj ve deşarj hızlarında verimli performansla izin verecektir. Sonuç olarak, bu çalışma, tarımsal endüstriyel atıkları LIB'ler için gelişmiş anot malzemelerine dönüştürmenin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini doğrulamayı, döngüsel

ekonomiye katkıda bulunmayı ve artan enerji depolama taleplerini karşılamak için ekonomik olarak uygulanabilir ve çevre dostu bir alternatif sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

- Bensalah, N., & Dawood, H. (2016). Review on synthesis, characterizations, and electrochemical properties of cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Material Sciences & Engineering*. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000258>
- Casimir, A., Zhang, H., Ogoke, O., Amine, J. C., Lu, J., & Wu, G. (2016). Silicon-based anodes for lithium-ion batteries: Effectiveness of materials synthesis and electrode preparation. *Nano Energy*, 27, 359–376. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.07.023>
- Dawood, S., Sen, T. K., & Phan, C. (2014). Synthesis and characterisation of novel-activated carbon from waste biomass pine cone and its application in the removal of Congo red dye from aqueous solution by adsorption. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(1), 1818.
- Deng, S., Hu, B., Chen, T., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., & Yu, G. (2015). Activated carbons prepared from peanut shell and sunflower seed shell for high CO₂ adsorption. *Adsorption*, 21(1–2), 125–133.
- Fergus, J. W. (2010). Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 195(4), 939–954.
- Fletcher, A., Somorin, T., & Aladeokin, O. (2024). Production of high surface area activated carbon from peanut shell by chemical activation with zinc chloride: Optimisation and characterization. *BioEnergy Research*, 17(1), 467–478. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10683-7>
- Malik, M., Chan, K. H., & Azimi, G. (2022). Review on the synthesis of LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O₂ (NMC) cathodes for lithium-ion batteries. *Materials Today Energy*, 28, 101066.
- Shchegolkov, A., Komarov, F., Lipkin, M., Milchanin, O., Parfimovich, I., Shchegolkov, A., ... Nokhaeva, V. (2021). Synthesis and study of cathode materials based on carbon nanotubes for lithium-ion batteries. *Inorganic Materials: Applied Research*, 12(5), 1281–1287.

To study and control leakage of Massey Ferguson cylinder head gray cast iron casting at pressure test by identifying actual root cause of the issue.

Muhammad AHMED, Abdullah SANİ,
Muhammad Umair ARSHAD

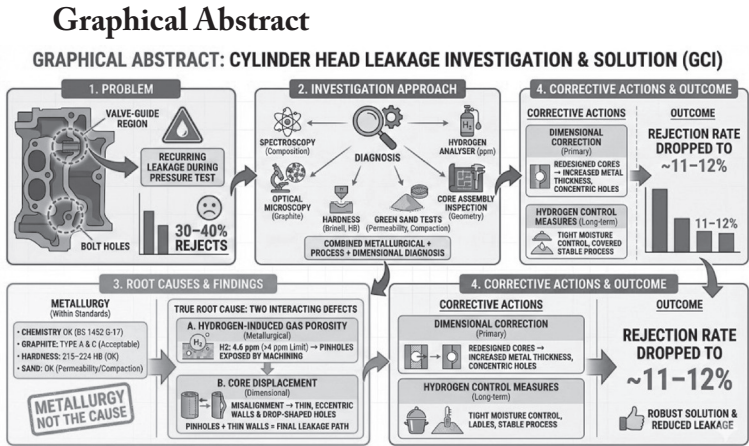
Özet: Bolan Casting Limited tarafından üretilen gri dökme demir (BS 1452 G-17) silindir kapağında meydana gelen sızıntının kök nedenlerini belirlemek için spektroskopi, hızlı analiz testleri, optik mikroskopi, sertlik ölçümü ve kompaktlık, geçirgenlik ve tane boyutu analizini içeren yaş kum değerlendirmeleri gibi çeşitli teşhis testleri uygulanmıştır. Bulgular, sızıntının birincil nedeninin, ergimiş metalde aşırı hidrojen tutulması sonucu oluşan gaz gözenekliliği olduğunu göstermiştir. Ölçülen hidrojen seviyesi, standart kabul edilebilir ppm sınırlarının üzerinde bulunmuş ve katılaşma sırasında bu fazla hidrojen iç pinhol (iğne gözenekleri) oluşumuna yol açmıştır. İkincil ancak önemli bir diğer etken, döküm sırasında çapulelerin yer değiştirmesi sonucu çift egzoz çekirdeğinin yanlış hizalanmasıdır. Bu yanlış hizalanma, kalıp dolumunu etkilemiş ve döküm boyunca düzensiz et kalınlıkları oluşturmuştur. İşleme sırasında bu daha ince bölgeler daha zayıf hale gelmiştir. İç pinhol birleşimi ile delinme sırasında oluşan ısı ve sürtünme, özellikle zayıf olan bu bölgelerde çatlak başlatma ve ilerlemesine neden olmuştur. Gaz gözenekliliğini ortadan kaldırmak ve döküm kalitesini artırmak için bazı düzeltici önlemler önerilmiştir. Kalıp ve çekirdeklerde kullanılan silika kumundaki nem seviyeleri, hidrojen oluşumunu sınırlamak için sıkı şekilde kontrol edilmelidir. Çift egzoz çekirdeğinin boyutları, çapule hareketini önlemek amacıyla kesin toleranslarda tutulmalıdır. Ayrıca, endüksiyon ocağı ile döküm hattı arasında kapaklı pota kullanılması, atmosferik temasın azaltılmasını ve hidrojen soğurulmasının minimuma indirilmesini sağlayacaktır. Bu önlemler, kalıp stabilitesini artırmayı, içsel döküm hatalarını azaltmayı ve silindir kapağının mekanik bütünlüğünü güçlendirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gri Dökme Demir, Silindir Kapağı, Sızıntı Problemi.

Abstract: In order to determine the root causes of leakage in the grey cast iron (BS 1452 G-17) cylinder head produced at Bolan Casting Limited, several diagnostic tests were performed, including spectroscopy, rapid analyzer testing, optical microscopy, hardness testing, and green sand evaluations such as compaction, permeability, and grain-size analysis. The findings showed that the primary cause of leakage was gas porosity, resulting from excessive hydrogen entrapment in the molten metal. The measured hydrogen level exceeded the standard acceptable ppm limits, and during solidification, this excess hydrogen produced internal pinholes. A secondary but significant factor was the displacement of chaplets during pouring, which led to the misalignment of the double exhaust core. This misalignment affected mold filling and created uneven wall thickness throughout the casting. During machining, these thinner regions became more vulnerable. The combination of internal pinholes with the heat and friction produced during drilling caused crack initiation and propagation, especially in already weakened sections.

To eliminate gas porosity and improve casting quality, several corrective actions were recommended. Moisture levels in the silica sand for both molds and cores must be tightly controlled to limit hydrogen generation. The dimensions of the double exhaust core should be kept within strict tolerances to prevent chaplet movement. Additionally, using a covered ladle between the induction furnace and the casting line is advised to reduce atmospheric exposure and minimize hydrogen absorption. These measures aim to improve mold stability, reduce internal defects, and enhance the mechanical integrity of the cylinder head.

Keywords: Grey Cast Iron, Cylinder Head, Leakage issue.



1. Introduction

1.1 Brief background

Cylinder heads are geometrically complex GCI castings with multiple cored passages for intake/exhaust and fasteners as shown by Figure 1.(W. Wang et al., 2007) . Tight machining tolerances, local hot spots, and thin sections around guides/bolts make them sensitive to dimensional variation and micro-porosity. Failures typically surface at machining/pressure-test stages as through-leaks. (Gyarmati et al., 2021) .

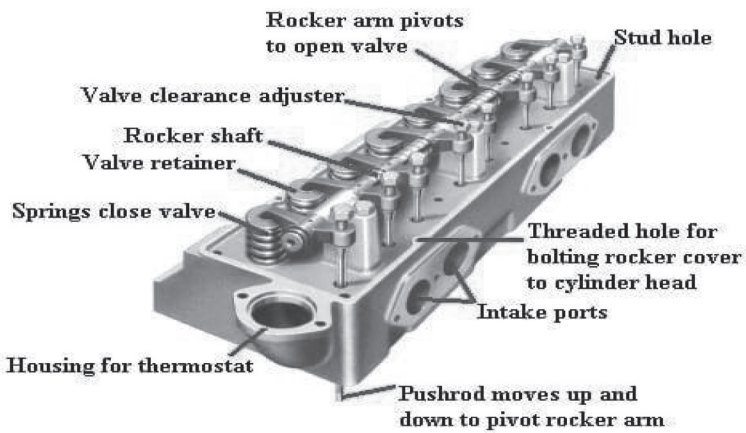


Figure 1: part of cylinder head showing different weak sections, which can be a cause of leakage during pressure test (Wang et al., 2007)

1.2. Problem statement

Bolan Casting Limited, one of the prestigious foundries of Pakistan was experiencing persistent post-machining leakage in specific zones (valve-guide and neighboring bolt holes). Initial batch rejections were reported as high ($\approx 30\text{-}40\%$), creating cost and delivery risk. A rigorous, evidence-based diagnosis was needed to isolate primary causes and implement remedies that fit existing tooling and process constraints.

1.3. Aims and objectives

1. Diagnose the dominant mechanism(s) behind the leakage.
2. Rule in/out contributions from chemistry, microstructure, hardness, and green-sand health.
3. Evaluate hydrogen's role in pinhole formation.
4. Identify dimensional vulnerabilities caused by core assembly and pouring dynamics.
5. Implement low-cost, production-viable modifications and verify improvement.

1.4. Scope of work

The work covers component sampling, laboratory characterization, green-sand testing, hydrogen analysis, dimensional/visual checks of core assemblies, and plant-level modifications. Out-of-scope items include complete gating/feeding redesign and extensive CFD/solidification modeling (they are discussed as future opportunities).

1.5. Grey cast iron (GCI) and its properties

GCI contains graphite as interconnected flakes within a ferrite/pearlite matrix. (X. Wang et al., 2023). Graphite class (A, B, C, D, E) as shown by figure 2, affects properties: Type-A flakes (random) and Type-C (kish) are generally acceptable in many GCI grades; Types B/D/E can degrade mechanical integrity and surface finish. (Nayyar et al., 2012). Typical advantages are good young modulus, damping capacity and machinability where as bad tensile and fatigue resistance are its disadvantages as shown by **table 1**, sensitivity includes gas pin holing when hydrogen pickup is excessive and edge Chilling if chemistry/section thickness are mismanaged.(Fox & Adams, 1973)

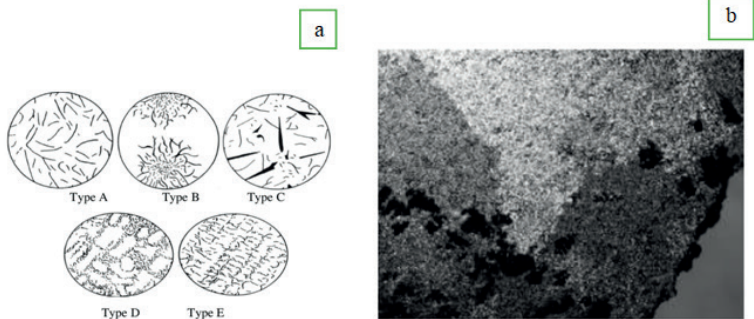


Figure 2(a): grey iron flakes showing different classes from A to E having different impact on grey iron castings b) shows gas porosity at the end of the sample (Kassie & Assfaw, 2013) (Söderholm, n.d.)

Properties	GCI (gray cast iron)
Tensile strength (MPa)	250
Young Modulus (GPa)	105
Fatigue resistance (MPa)	110
Heat conductivity (W/ (mK))	48
Hardness (HB)	179-202
Relative damping capacity	1.0
Machinability	Good

Table 1: Gray cast iron (GCI) properties (Diniz et al., 2010)

1.6. Methodology used in the study

A mixed approach was applied: (i) plant walk-throughs and visual/dimensional checks around cored features; (ii) emission spectroscopy; (iii) optical microscopy at 200X and 1000X magnification; (iv) Brinell hardness at three sites; (v) sand grain-size, permeability, and green compaction tests; (vi) rapid analyzer (hydrogen ppm); and (vii) corrective action trials with core redesign and subsequent quality monitoring.

2. Literature Review

Several foundry industries across the world as shown by table 2, have reported recurring problems with cylinder head castings, particularly involving leakage, porosity, and cracking as shown by Figure 2 (Özdemir et al., 2009). A review

of published case studies and industrial investigations highlights the different challenges faced, along with the remedial measures adopted to improve performance and reduce rejection rates.

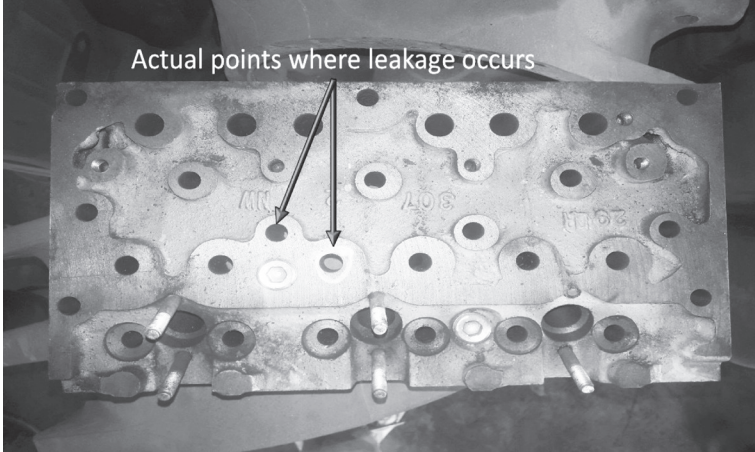


Figure 2: actual picture of cylinder head showing position from where leakage happened

A collaborative program involving Swedish foundries and the Casting Innovation Center studied the occurrence of pinholes and gas porosity in grey iron cylinder heads. These defects were traced mainly to hydrogen and nitrogen pick-up during melting and mold filling, with hydrogen levels above 4 ppm in solid iron identified as a critical factor. Additional sources included excess moisture in molding sand, undried ladles or cores, and condensation on mold surfaces. To overcome these issues, Swedish engineers recommended stricter drying of ladles and cores, improved venting systems, control of moisture in green sand, and better mold layout design to avoid localized hot spots. These measures were shown to reduce gas-related porosity and improve the consistency of cylinder head castings. (Sivanantham et al., 2024)

Region	Supplier	Name of Industry	Model Year
India	Nemak Aluminium Castings India Pvt. Ltd.	Hyundai	2021
America	Nemak of Canada Corp.	GM	2022
China	Guangzhou Qisheng Powertrain Co., Ltd.	GAC Motor	2021
Europe	Nemak, S.A.B. de C.V.	Maserati	2022
Japan	Toyota Industries Corporation	Hino	2021

Table 2: List of manufacturing countries along with its suppliers and makers

ZHY Casting Company encountered leakage in water jackets of platinum-series four- and six-cylinder heads, primarily caused by shrinkage defects at hot spots. To mitigate this, the company applied a special tellurium powder coating beneath the normal refractory layer. When used in controlled quantities, this coating promoted carbide formation and reduced surface leakage. However, the study emphasized that excessive use of tellurium altered surface tension of molten iron and intensified veining defects in water jackets. Later trials combined tellurium coatings with graphite washes, but these also created hard spots and crack-prone areas. This highlighted the delicate balance required between sealing shrinkage porosity and avoiding new surface-related defects in critical regions. (Doty et al., 2025)

In India, a major leakage problem was reported in inlet-port subassemblies of light commercial vehicle cylinder heads, where rejection rates reached nearly 42%. An industrial engineering team analyzed the defect using Lean Six Sigma methods. The investigation concluded that the root cause was dimensional deviation due to displacement of cores and improper chaplet placement during mold filling. This displacement caused concentricity errors and reduced wall thickness around the port, which later failed during machining or pressure testing. The corrective measures focused on improving chaplet design and ensuring accurate positioning of cores within molds. After implementation, rejection levels dropped

significantly, and customer complaints reduced accordingly. (Parsana & Desai, 2016)

A Chinese foundry producing high-performance diesel engine cylinder heads reported cracking during durability tests. Cracks initiated at the junction of two exhaust passages and extended towards the cooling water jacket, resulting in coolant leakage and early component failure. Metallurgical analysis revealed an abnormal graphite zone approximately 1 mm below the surface of the exhaust tube, created by localized rapid cooling. The presence of undesirable graphite morphologies (Types D and E), along with inclusions and voids, further increased stress concentration. High-temperature gases accelerated oxidation at these cracks, causing premature fracture. The study concluded that controlling cooling rates, minimizing inclusions, and promoting favorable graphite structures were essential to improve durability. (Li et al., 2021)

Another failure analysis, conducted at Dalian Maritime University, focused on a truck diesel engine cylinder head made of HT250 grey cast iron. A longitudinal crack developed from the inner wall and propagated to the outer surface during road testing. Microstructural examination showed larger-than-acceptable graphite flakes and higher ferrite content, which lowered overall hardness and strength. The study stressed that strict control of composition and microstructure during solidification is vital to prevent early cracking in heavy-duty applications.

The reviewed cases highlight that cylinder head defects are not restricted to one specific cause but are often a combination of metallurgical and dimensional issues. Excess dissolved gases, particularly hydrogen above critical limits, have been shown to cause pinhole porosity and leakage. Shrinkage at hot spots can result in surface leakage if not managed by

proper thermal control. Core displacement and chaplet misalignment introduce dimensional errors that reduce wall thickness and lead to failures under machining or service conditions. Finally, unfavorable graphite morphologies (Types D/E) combined with localized rapid cooling are strongly linked with crack initiation. Each case reinforces the need for a holistic approach, combining strict metallurgical control, dimensional accuracy, and process stability, to produce defect-free cylinder heads. (Xu & Yu, 2006)

3. Experimental Roadmap

1. Sampling: Pieces removed from (i) a leak-prone guide/bolt-hole region; (ii) a remote, non-leaking surface.
2. Visual/dimensional checks: Inspected core assembly photographs and as-cast hole shapes for concentricity and wall thickness symmetry; compared to CAD intent.
3. Emission spectroscopy: Chemistry measured on component samples; compared to plant GCI standard for the cylinder head grade.
4. Optical metallography: Standard prep; bright-field images at 200×/1000× from both regions to classify graphite and assess matrix.
5. Brinell hardness: 1000-kg load; three sites, guide-hole, bolt-hole, remote surface.
6. Green-sand health:
 - Grain-size distribution via sieve shaker (53–212 μm range).
 - Permeability using electric permeability meter; four readings and mean.
 - Green compression/compaction strength on universal sand-strength tester.

7. Rapid Analyzer (RA): Hydrogen ppm on the casting, since spectrometer does not quantify Hydrogen
8. Corrective action trial: Targeted core redesign (reduced thickness of specific exhaust cores to increase local casting wall around holes) and production monitoring of rejection rate.

4. Results and Discussion

This section presents the results obtained from the experimental analysis of the MF cylinder head and discusses their significance in relation to the leakage issue observed at Bolan Casting Limited (BCL). A comprehensive evaluation was carried out using spectroscopy, microstructural analysis, hardness testing, green sand characterization, and hydrogen content determination. Each characterization technique provided valuable insight into possible causes of the recurring defect, and when viewed together, the results revealed a clear picture of the problem and its resolution. Additionally, the effects of dimensional modifications to the core assembly were examined to assess their role in mitigating leakage.

The spectroscopy analysis of samples taken from leakage and non-leakage regions shown by table 3, showed that the chemical composition of the cylinder head material was well within the BS 1452 G-17 standard shown by table 4 (Sackey & Ngewana, 2022). Key alloying elements such as carbon, silicon, and manganese were consistent with prescribed ranges, and trace elements were present in safe limits. Nitrogen, which is sometimes implicated in porosity, was also within tolerance. This eliminated the possibility that compositional imbalance was the cause of the leakage. However, spectroscopy could not quantify hydrogen, leaving a critical gap since hydrogen is strongly associated with porosity in cast iron.

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Concentration (wt %)	3.35	2.04	0.671	0.00850	0.137	0.209	0.012	0.0020
Elements	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
Concentration (wt %)	0.006	0.002	0.0348	0.003	0.009	0.006	0.0022	0.0011
Elements	Sn	Mg	As	Ca	Zn	CE	N	Fe
Concentration (wt %)	0.0032	0.0001	0.005	0.0012	0.0004	4.05	0.0119	93.4

Table 3: Showing composition of grey iron cylinder head from leaked area obtained through spectroscope

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Concentration (wt %)	3.35-3.40	1.98-2.03	0.60-0.70	0.08-0.10	0.08-0.10	0.18-0.20	0.1 Max	0.5 Max
Elements	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
Concentration (wt %)	0.03 Max	0.02 Max	1,0 Max	0.5 Max	0.15 Max	0.10 Max	0.05 Max	0.005 Max
Elements	Sn	Mg	As	Ca	Zn	CE	N	Fe
Concentration (wt %)	0.015 Max	0.01 Max	0.05 Max	0.01 Max	0.05 Max	4.05-4.09	0,02 Max	Balance

Table 4: Showing composition of grey iron cylinder head from standard of BCL (Sackey & Ngewana, 2022)

To complement this, microstructural analysis was performed on samples from both the leakage-prone guide and bolt hole areas and from unaffected surfaces. The graphite morphology observed was primarily Type A in the leakage zones as shown by Figure 3 and Type C in the surface regions as shown by Figure 4, which resembles the grey iron standard flakes morphology as shown by Figure 5 (Makowska & Kowalewski, 2024). Both of these flake structures are desirable, as Type A enhances mechanical properties and machinability, while Type C improves thermal conductivity. Importantly, none of the undesirable morphologies (Types B, D, or E) were present, ruling out microstructural abnormalities as a contributor to leakage. Thus, the material’s internal morphology was not responsible for the failure.

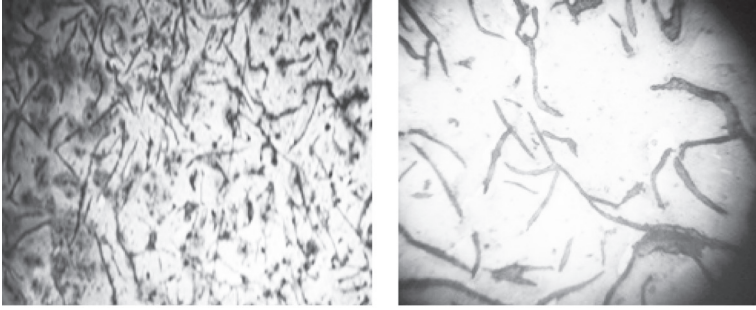


Figure 3: Microstructure of cylinder head at pin holes area were leakage occurred showing A class graphite flakes a) At 200X magnification b) at 1000X

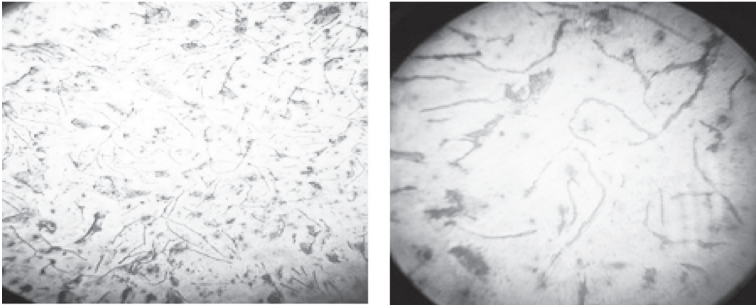


Figure 4: Microstructure of cylinder head far away from pin holes area were leakage not occurred also showing C class graphite flakes a) At 200X magnification b) at 1000X

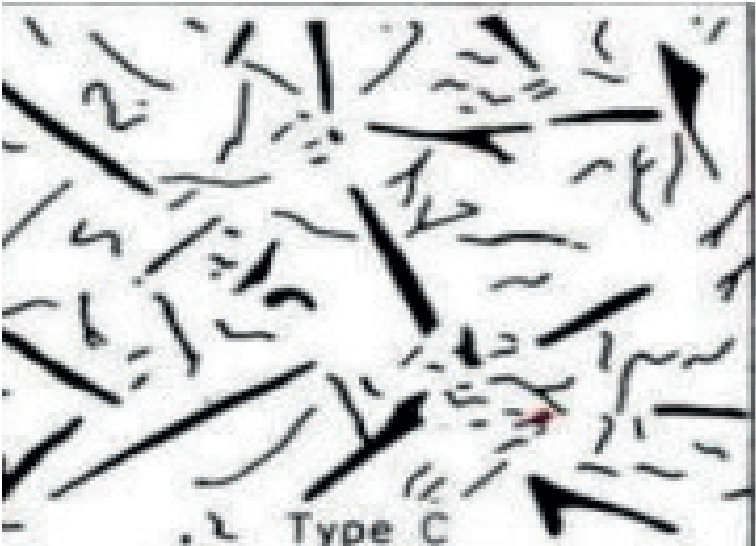


Figure 5: Microstructure of grey iron showing type C flakes (Makowska & Kowalewski, 2024)

Hardness testing was carried out at multiple points, including leakage areas and unaffected surfaces. The results, ranging from 215 to 224 HB, were all within the BCL standard of 179-230 HB. No significant variations were observed across different regions. Since hardness values remained consistent, neither excessive brittleness nor inadequate hardness could be linked to the leakage defect. This further supported the view that mechanical property variation was not responsible.

S.NO	Standard of BCL	179-230 HB
1	Guide hole leakage area	218 HB
2	Bolt hole leakage area	215 HB
3	Sample upper surface away from leakage area	224 HB

Table 5: Hardness values at Brinell hardness tester from three different positions of cylinder head part.

The role of the molding material was evaluated through green sand characterization. Grain size distribution was found to be well-balanced, dominated by mid-range fractions that ensured both strength and permeability. The permeability test gave a mean value of 98 as shown by table 6, which lies comfortably within the standard range of 90-130, indicating sufficient capacity for gases to escape during solidification. Similarly, compaction strength averaged 140 kN/m² as shown by table 7, also within the required range of 140–175 kN/m², ensuring mold integrity during pouring (Radchenko, 2004). These results confirmed that molding sand properties were stable and unlikely to cause leakage through inclusions, blowholes, or weak mold structures.

BCL Standard	Reading 1	Reading 2	Reading 3	Reading 4	Mean
90-130 Nos.	98	99	98	96	98

Table 6: Result of permeability test of green sand used in core and mold making showing mean value of 98

BCL Standard	Reading 1	Reading 2	Reading 3	Reading 4	Mean
140-175 KN/m ²	145 KN/m	140 KN/m ²	140 KN/m ²	135 KN/m ²	140 KN/m ²

Table 7: Values of green sand compaction test which is used in core and mold making.

The most significant finding came from the rapid analyzer test for hydrogen content. The hydrogen level in the cylinder head was measured at 4.6 ppm, which exceeded the acceptable maximum of 4 ppm as shown by Figure 8. Literature confirms that hydrogen levels above this threshold can cause subsurface porosity, manifesting as pinholes that may later serve as leakage points when exposed during machining (Orlenius et al., 2008; Siafakas & Högskolan, n.d.). The presence of hydrogen slightly above the limit strongly correlated with the observed leakage defects and established gas porosity as one of the main root causes.

In addition to metallurgical factors, dimensional analysis and visual inspection of the castings revealed irregularities in wall thickness around guide and bolt holes. This was traced to displacement of the double exhaust core during pouring, which created thinner-than-required walls in localized regions. These thin sections were more vulnerable to crack initiation during machining or thermal cycling.

[illegible]

Figure 8: Rapid analyzer testing report from after out sourcing showing composition of hydrogen

When all results are considered together, a clear conclusion emerges: most of the fundamental parameters like chemical composition (excluding hydrogen), microstructure, hardness, and sand properties, were within specification and not responsible for leakage. The two primary culprits were identified as slightly elevated hydrogen content and dimensional inaccuracies caused by core displacement. Both factors acted in tandem: hydrogen porosity created subsurface pinholes, while thin walls created by displaced cores made the castings more susceptible to crack initiation during machining.

Thus, the overall discussion highlights that solving complex casting defects requires a holistic approach that integrates metallurgical characterization with process-level modifications. This case demonstrates how detailed investigation of each parameter, followed by targeted corrective measures, can reduce industrial losses and enhance product performance.

4.1. Modifications

After Detailed inspection, characterization, it was revealed that the major leakage issue could not be explained by composition, hardness, microstructure, or sand properties, since all of these were within the required standards. Instead, careful observation of the guide and bolt hole areas showed that the wall thickness was not uniform. One side appeared considerably thinner, and the hole had a drop-like shape as shown in Figure 7a, rather than the spherical profile defined in the CAD drawing. This pointed towards core displacement, most likely of the double exhaust core, during pouring and solidification which was then modified using CAD model like it is shown by Figure 6 just for reference, and implementing that redesigned core model to fabricate new core assembly as shown by figure 7b.

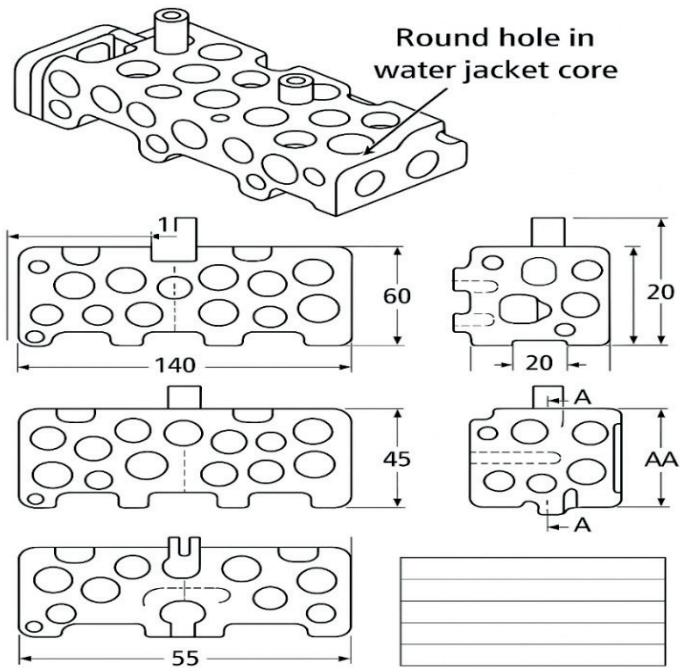


Figure 6: CAD model and detailed engineering drawing of a cylinder head showing orthographic views with standard dimensions

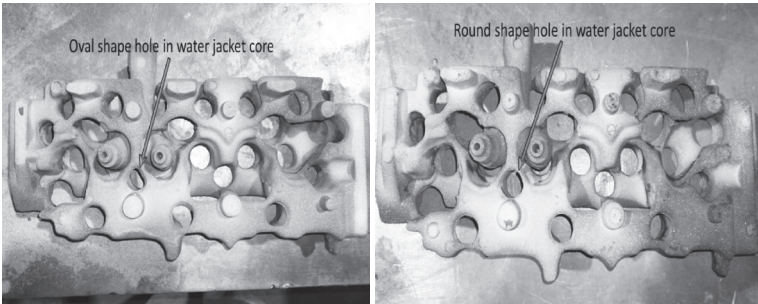


Figure 7: a) Shape of guide hole and its walls before modifications. b) Shape of guide hole and its walls after modification.

To address this issue, the core assembly was modified. The thickness of both the single and double exhaust cores was reduced slightly, while remaining within tolerance limits as shown by Figure 8 (a, b). This adjustment ensured that once

the molten metal was poured, the affected regions filled properly, producing a more uniform wall thickness. After the modification, the shape of the guide hole was restored to a near-spherical form, and the uneven thickness was eliminated.

The impact of this change was significant. Castings produced with the redesigned core no longer displayed visible thin sections in the critical areas. During machining, the walls maintained their integrity and resisted crack formation or pinhole exposure. Most importantly, the rejection rate at BCL dropped sharply from nearly 30-40% down to around 11-12% as shown in table 8. This improvement provided immediate benefits for production efficiency and customer reliability.

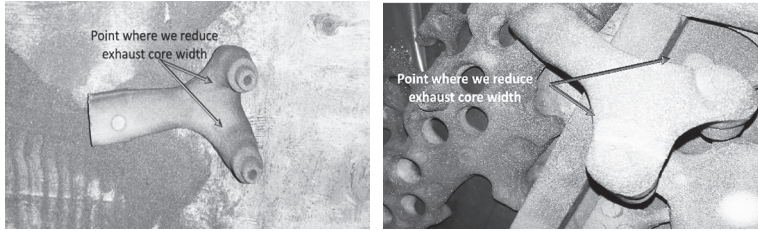


Figure 8: a) Double exhaust core whose thickness is reduced to increase the wall thickness of guide and bolt hole b) Double exhaust core whose thickness is reduced to increase the wall thickness of guide and bolt in core assembly.

04-05-2022

Bolan Castings Limited
Quality Management Department
Final Casting Control
MF Cylinder Head
For the Month of January-2022 to April-2022

**MACHINING
REJECTION**

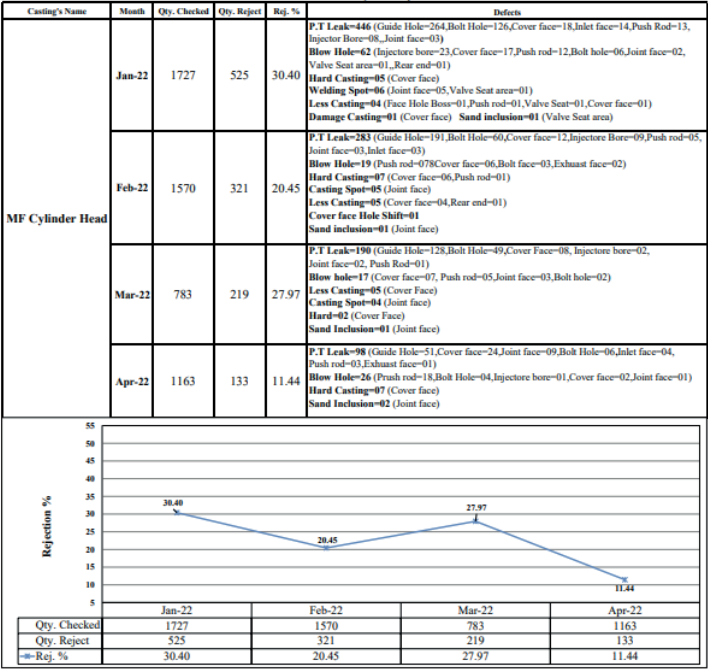


Table 8: Shows the results after modification.

These findings confirm that the leakage was not solely due to metallurgical factors such as hydrogen porosity (which exceeded the standard limit of 4 ppm) but was also strongly influenced by dimensional irregularities. By correcting the core design, one major cause of leakage was resolved.

In parallel, further measures to control hydrogen content such as regulating moisture in molding sand, using covered ladles during metal transfer, and stabilizing process parameters remain essential for long-term quality improvement in MF cylinder head production.

4.2. Future Recommendations

In the future, certain solutions can help minimize the impact of hydrogen gas and reduce the risk of leakage in the cy-

linder head. The goal is to keep any minor defects from affecting the product's structure or performance. One key step is to slightly reduce the dimensions of the double exhaust core, but still keep them within the allowed tolerance limits. This ensures that when metal is poured into the mold, any movement of the chaplets stays within those tolerances. As a result, the core will not shift enough to cause a reduction in wall thickness, preserving the integrity of the casting.

- 1- Carefully control the moisture level in silica sand before using it for core and mold making. If the sand holds excess moisture, the hydrogen it releases after the molten metal solidifies can cause porosity and lead to tiny pinholes in the casting.(Siafakas & Högskolan, n.d.).
- 2- Use a covered ladle when transferring metal from the induction furnace to the molding line. This prevents atmospheric gases from being absorbed, which would otherwise lead to gas porosity in the casting. (Siafakas & Högskolan, n.d.) (Chelladurai et al., 2020).
- 3- Strictly follow and control the standard operating procedures (SOPs) in the foundry process. Even small fluctuations in casting parameters can lead to major problems, which in turn can negatively impact both industrial performance and the wider economy. (Kassie & Assfaw, 2013).
- 4- Gas entrapment can be effectively eliminated by using vacuum chamber melting and transferring the metal from the furnace to the pouring area under vacuum. However, this method is highly expensive and challenging to implement (Chelladurai et al., 2020).

5. Conclusion

Through a plant-scale investigation, recurring leakage in grey cast-iron cylinder heads was resolved by separating non-contributors from true drivers: chemistry conformed to

the GCI standard, graphite morphologies (Type A/C) and hardness were in band, and green-sand health was stable, so these were ruled out, while two interacting causes emerged: core displacement that created thin, eccentric walls at valve-guide/bolt holes (primary) and slightly elevated hydrogen (~4.6 ppm) that enabled pinhole porosity (secondary). A targeted exhaust-core redesign restored wall thickness and concentricity within tolerance, producing a marked reduction in rejection rates up to 10% on subsequent runs, and a complementary hydrogen-control plan (tight moisture discipline, covered-ladle transfer, SPC tracking) added robustness across shifts and seasons. The solution eliminated through-leak pathways without costly recipe changes or tooling overhauls and delivered operational gains in scrap, cycle time, and delivery reliability. More broadly, the work provides a portable framework for complex cored castings: verify metallurgy and sand, interrogate geometry at drilled thin sections, quantify and control hydrogen, and validate fixes with production data; future CT/flow checks and drill-parameter optimization can further widen margins.

Kaynakça

- Chelladurai, C., Mohan, N. S., Hariharashayee, D., Manikandan, S., & Sivaperumal, P. (2020). Analyzing the casting defects in small scale casting industry. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.382>
- Doty, H. W., Samuel, E., Samuel, A. M., Songmene, V., & Samuel, F. H. (2025). Effect of melt treatment and heat treatment on the performance of aluminum cylinder heads. *Materials*, 18(5), 1024. <https://doi.org/10.3390/ma18051024>
- Fox, M. A. O., & Adams, R. D. (1973). Correlation of the damping capacity of cast iron with its mechanical properties and microstructure. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 15(2), 81–94. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1973_015_017_02

- Gyarmati, G., Budavári, I., Fegyverneki, G., & Varga, L. (2021). The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores. *Heliyon*, 7(7), e07624. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07624>
- Kassie, A. A., & Assfaw, S. B. (2013). Minimization of casting defects. *IOSR Journal of Engineering*, 3(5), 31–38.
- Li, Y., Liu, J., Zhong, G., Huang, W., & Zou, R. (2021). Analysis of a diesel engine cylinder head failure caused by casting porosity defects. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105498. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105498>
- Makowska, K., & Kowalewski, Z. L. (2024). Analysis of the microstructure and hardness of flake graphite cast iron using the Barkhausen noise method and conventional techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 43, Article 54. <https://doi.org/10.1007/s10921-024-01065-w>
- Nayyar, V., Kaminski, J., Kinnander, A., & Nyborg, L. (2012). An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades: Flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations. *Procedia CIRP*, 1(1), 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.087>
- Orlenius, J., Diószegi, A., & Diószegi, Z. (2008). Gas absorption in grey cast iron during mould filling. *International Journal of Cast Metals Research*, 21(6), 427–434. <https://doi.org/10.1179/136404608X373140>
- Özdemir, Ö., Ebrinç, A., & Ünüvar, B. (2009). *Casting porosity elimination in CGI cylinder head* (SAE Technical Paper No. 2009-01-0219). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0219>
- Parsana, T. S., & Desai, D. A. (2016). Six Sigma methodology. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 17(4), 465–498.
- Radchenko, A. K. (2004). Mechanical properties of green compacts. II. Effect of powder relative bulk density on the strength of compacts with different forming temperature conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 43, 552–563. <https://doi.org/10.1007/s11106-005-0021-6>

- Rosa, S. N., Diniz, A. E., Andrade, C. L. F., & Guesser, W. L. (2010). Analysis of tool wear, surface roughness and cutting power in the turning process of compact graphite irons with different titanium content. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 32(3), 234–240.
- Sackey, S. M., & Ngewana, T. Z. (2022). Concept of equivalent stress criterion for predicting failure of brittle materials. *African Journal of Applied Research*, 8(2), 332–343. <https://doi.org/10.26437/ajar.31.10.2022.23>
- Siafakas, D. (2013). *Investigation of hydrogen and nitrogen content in compacted graphite iron production* [Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology].
- Sivanantham, A., Devaraj, J., Sanduru, B., Hassan, M. M., Bhagyashree, B. K., Chandramauli, A., & Singh, S. (2024). Study on the failure effect analysis of IC engine cylinder head. *E3S Web of Conferences*, 563, 02010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456302010>
- Söderholm, A. (2021). *Variations in material properties of grey cast iron and its impact on tool wear* [Master's thesis, Lund University].
- Wang, W., Jing, T., Gao, Y., Qiao, G., & Zhao, X. (2007). Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3), 593–597. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.028>
- Wang, X., Wu, Q., Huang, Y., Li, N., Wu, X., Chen, X., Wang, J., Jing, T., Huang, T., & Kang, J. (2023). Study on the gas release of 3D-printed furan resin sand core during the casting process. *Materials*, 16(11), 4152. <https://doi.org/10.3390/ma16114152>
- Xu, X., & Yu, Z. (2006). Failure analysis of a diesel engine cylinder head. *Engineering Failure Analysis*, 13(7), 1101–1107. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.016>

Kent Yıkımının Anatomisi: Gazze'nin Kentsel Dokusunda Yapısal Hasar ve İşlevsel Kayıpların Dinamik Değerlendirmesi

Abdalrahman T. Y. ALASHİ*, Muhammed ADAN**

Özet: 7 Ekim 2023'ten bu yana Gazze Şeridi, yakın tarihte eşi benzeri görülmemiş ölçekte ve yoğunlukta bir kentsel yıkım sürecine maruz kalmıştır. Bu çalışma, devam eden çatışma süresince Gazze'nin yapılaşmış çevresinde meydana gelen yapısal ve işlevsel hasarı dinamik ve kapsamlı bir biçimde değerlendirmektedir. Statik betimlemelerin ötesine geçilerek, Birleşmiş Milletler Uydu Merkezi (UNOSAT) hasar verileri; insani yardım amaçlı idari sınırlar, uydu türevli kanıtlar ve mekânsal istatistiklerle bütünleştirilmiş, böylece yıkımın zaman içindeki evrimini yansıtan güncel ve sistematik bir okuma sunulmuştur.

Analizin merkezinde, tahrip edilmiş, ağır hasarlı ve orta derecede hasarlı olarak sınıflandırılan yaklaşık 198.273 yapının belgelenmesi yer almaktadır. Bu yapılar; konut, eğitim, sağlık, dini, endüstriyel ve ticari işlevlerine göre ayrıştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sınıflandırma, yalnızca konut stokunun değil; aynı zamanda hastaneler, okullar, camiler ve diğer kritik tesislerin de işlevsiz hale geldiği Gazze kentsel ekosistemindeki çöküşü ortaya koymaktadır. Örneğin, hasar görmüş yapılar arasında 1.170'ten fazla okul, 250'nin üzerinde sağlık tesisi ve 450 dini yapı tespit edilmiştir; bu durum, kentsel yaşamın hem fiziksel hem de kurumsal boyutlarında yaşanan kesintinin boyutunu açıkça göstermektedir.

Yöntemsel çerçeve, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak çekirdek yoğunluk tahmini (kernel density estimation , KDE) ile ilçe ve belediye düzeyinde zonal toplulaştırma tekniklerini bir araya getirmektedir. Ardışık KDE analizleri, Ekim 2023 ile Ekim 2025 arasındaki yıkımın zamansal seyrini yeniden inşa etmekte; başlangıçta kuzeyde yoğunlaşan hotspotların zamanla merkezi belediyelere yayıldığını ve nihayetinde Han Yunus ile Refah'ın geç aşama odak noktaları haline

* Doktora Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Programı, alashi17@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2636-3013.

** Yüksek Lisans Mezunu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği, mohammed4ayed@gmail.com, 0000-0002-4400-974X.

geldiği, tüm Şerit genelinde doaygunluğa ulaşan bir yıkım sürecine evrildiğini ortaya koymaktadır. Tamamlayıcı hotspot istatistikleri, yüksek ve çok yüksek yoğunluklu kümelerin çoğalmasını ve sürekliliğini nicel olarak belgelemektedir. Buna ek olarak, işlevsel kentsel kayıp analizi; Gazze kenti, Cibaliya, Han Yunus ve Refah'ın, temel hizmetlerin çöküşü bakımından orantısız yükler taşıdığını göstermektedir.

Bu çalışmanın temel katkısı, kentsel yıkımın mekânsal ve zamansal örüntülerini belgelemek üzere doğrulanabilir kanıtları bir araya getirmesi ve yorumlamasında yatmaktadır. Yapısal hasar sınıflandırmalarının, işlevsel tesis kayıpları ve dinamik mekânsal modelleme ile ilişkilendirilmesi sayesinde, Gazze'deki kentsel yıkıma ilişkin çok katmanlı bir perspektif sunulmaktadır. Üretilen haritalar, frekans tabloları ve belediye ölçeğindeki dökümler; insani müdahale, hukuki incelemeler ve uzun vadeli iyileştirme planlamaları için yol gösterici olmayı amaçlamakta, aynı zamanda yıkımın ölçeği ve niteliğine ilişkin erişilebilir bir mekânsal kayıt sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gazze, kentsel yıkım, UNOSAT, CBS, çekirdek yoğunluk tahmini, işlevsel kentsel kayıp, mekânsal analiz, bina hasarı.

Anatomy of Urban Devastation: A Dynamic Assessment of Structural Damage and Functional Loss in Gaza's Urban Fabric

Abstract: Since October 7, 2023, the Gaza Strip has experienced one of the most extensive and concentrated episodes of urban devastation in recent history. This study presents a dynamic and comprehensive assessment of both structural and functional damage to Gaza's built environment over the course of the conflict between October 2023 and October 2025. Moving beyond static depictions, the analysis integrates United Nations Satellite Centre (UNOSAT) damage datasets with humanitarian administrative boundaries, satellite-derived evidence, and spatial statistics, producing an updated and systematic reading of the evolving destruction.

At the core of the assessment is the documentation of around 198,273 affected structures, classified by severity (destroyed, severely damaged, moderately damaged) and by functional type, including residential, educational, healthcare, religious, industrial, and commercial buildings. This classification provides a robust basis for evaluating the collapse of Gaza's urban ecosystem, in which not only the housing stock but also hospitals, schools, mosques, and other critical facilities were rendered inoperative. For instance, nearly 1,170 schools, over 250 healthcare facilities, and 450 religious sites were identified among the affected structures, underscoring the combined structural and institutional disruption of urban life.

The methodological framework employs geographic information systems (GIS) to combine kernel density estimation with zonal aggregation at the governorate and municipal levels. Sequential KDE analyses reconstruct the temporal progression of destruction from October 2023 to October 2025, revealing a trajectory that began with concentrated northern hotspots, expanded into central municipalities, and culminated in Strip-wide saturation with Khan Yunis and Rafah emerging as late-stage epicenters. Complementary hotspot statistics quantify this transition, tracing the multiplication and persistence of high- and very high-intensity clusters. Functional urban loss analysis, in turn, demonstrates how particular municipalities experienced disproportionate collapse of essential ser-

vices, with Gaza City, Jabalia, Khan Yunis, and Rafah consistently registering the heaviest burdens.

The primary contribution of this study lies in assembling and interpreting verifiable evidence to document the spatiotemporal patterns of urban destruction. By bridging structural severity classifications with functional facility loss and dynamic spatial modeling, the research offers a layered perspective on Gaza's urban devastation. The outputs—maps, frequency tables, and municipal breakdowns—are designed to inform humanitarian response, legal investigations, and long-term recovery planning, while providing an accessible spatial record of the scale and nature of the destruction.

Keywords: Gaza, building damage, UNOSAT, GIS, kernel density estimation, functional urban loss, spatial analysis, urban destruction

Introduction

The Gaza Strip has been a conflict zone for many years, but the current escalation since October 2023 has resulted in unprecedented levels of urban destruction. Remote sensing reports, humanitarian field assessments, and media documentation consistently reveal vast damage to housing, infrastructure, and critical facilities across the territory (Holail et al., 2024; UNITAR & UNOSAT, 2024; Haddad & Hussein, 2025). Entire neighborhoods have been rendered uninhabitable, while the disruption of schools, hospitals, and utilities has undermined not only the urban fabric but also the very conditions of civilian life. The magnitude and pace of destruction are of a sort that demands new analytical techniques beyond the static mapping of destruction and represent its dynamic and functional qualities.

Conventional assessments of war-related urban damage typically rely on one-off satellite imagery analyses or aggregate counts of affected buildings (UNOSAT, 2025). While these methods are valuable for emergency reporting, they often fail to illustrate the temporal unfolding of destruction or the differentiated impact on functional building types. Accordingly, they cannot fully inform longer-term recovery planning or provide insights into how destruction evolves across spatial and administrative boundaries. This gap is particularly acute

in Gaza, where rapid and repeated bombardments have altered the urban landscape in waves rather than discrete episodes, producing complex patterns of cumulative and shifting damage.

The present study addresses this limitation through a spatial analysis that integrates two dimensions. First, a Dynamic Assessment traces the temporal progression of building destruction, comparing successive time intervals to reveal how hotspots of damage expanded and intensified. Second, a Functional Urban Loss analysis quantifies the destruction of different facility types—residential, educational, healthcare, religious, industrial, and commercial—across governorates and municipalities, thereby linking physical damage to the erosion of urban services.

By combining temporal and functional perspectives, this research seeks to generate an accessible and evidence-based account of urban loss in Gaza. The contribution lies not only in documenting the magnitude of destruction but also in providing a structured framework that can inform humanitarian response strategies, guide urban recovery planning, and enrich comparative studies of conflict-related urban transformation.

2. Data and Methods

The primary dataset used in this study is the Comprehensive Building Damage Assessment, Gaza (October 2025) produced by the United Nations Satellite Centre (United Nations Satellite Centre [UNOSAT], 2025). This geospatial dataset documents the condition of built structures in the Gaza Strip, updated iteratively across fourteen-time intervals between October 2023 and October 2025. The October 2025 dataset captures damage conditions immediately preceding the declared on October 2025, providing a near-terminal

snapshot of cumulative urban destruction through the two years of the bombing. For each building footprint, attributes include the survey date, observed damage class, and site identification (SiteID), which specifies the function of the structure (e.g., mosque, hospital, school, industrial facility, commercial site, or residential building). Damage classes are categorized in accordance with UNOSAT standards, distinguishing destroyed, severely damaged, moderately damaged, and possibly damaged structures. While the dataset also includes sensor identifiers and confidence measures, these fields were excluded from analysis in order to focus on temporal progression and functional loss. Administrative boundaries for governorates and municipalities were incorporated from official vector layers (OCHA, 2019). These boundaries enabled spatial aggregation of building-level data to higher administrative units, ensuring comparability across regions. However, certain administrative polygons in the dataset did not contain assigned names or codes. In such cases, the polygons were retained in the analysis as spatial units, but their results could not be directly attributed to a specific named governorate or municipality.

The methodological design combined two complementary strands: dynamic assessment of destruction through time and functional assessment of urban loss. All analyses were conducted in ArcGIS Pro. First, to capture the dynamic progression of destruction, point features representing affected buildings were extracted for three representative survey dates: 15 October 2023, 6 September 2024, and 11 October 2025. These intervals were selected because they represent roughly equal temporal spacing and mark distinct phases of the conflict. For each date, Kernel Density Estimation (KDE) was applied to visualize the spatial concentration of destruction (Silverman, 2018). Unified classification breaks were employed across all three maps to enable direct comparison of ho-

tpspot intensity. Quantitative summaries were then derived, including the total number of hotspots, the cumulative area covered by medium, high, and very high destruction densities, and the percentage increase relative to previous dates.

Second, the analysis of functional urban loss relied on the SiteID attribute to distinguish structural functions. The “Summarize Within” tool was used to count the number of affected facilities within each governorate and municipality. This yielded a matrix of functional losses, including the number of mosques, hospitals, schools, industrial sites, and residential buildings affected per administrative unit. These results were mapped using both graduated color symbology for total destruction and proportional charts to visualize the relative distribution of functional facility losses.

Results and Discussions

Dynamic Assessment

The temporal sequence of kernel density estimation (KDE) analyses provides a structured account of the escalation of structural destruction across the Gaza Strip between October 2023 and October 2025. By visualizing the density of affected buildings across successive observation periods, the maps capture both the magnitude of devastation and its shifting spatial focus. This enables the reconstruction of distinct phases in the trajectory of urban damage, from early concentration in the north to widespread saturation across the Strip.

The initial wave of destruction, visible in Figures 1 (15 October 2023) and 2 (26 November 2023), was concentrated in the northern municipalities, particularly Gaza City, Beit Lahia, and Jabalia. Dense clusters appear in Gaza City’s central districts and extend into Jabalia, while the southern governorates exhibit only scattered hotspots. By November 2023, these northern concentrations had intensified, reflec-

ting early targeting of Gaza City as the primary epicenter of bombardment.

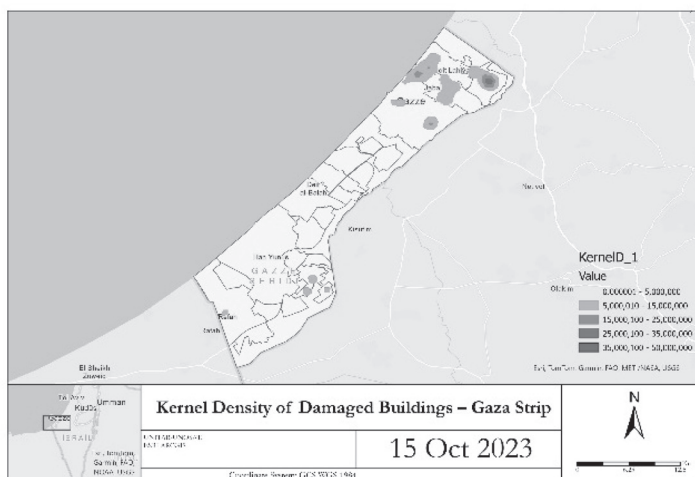


Figure 1. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 15 October 2023.

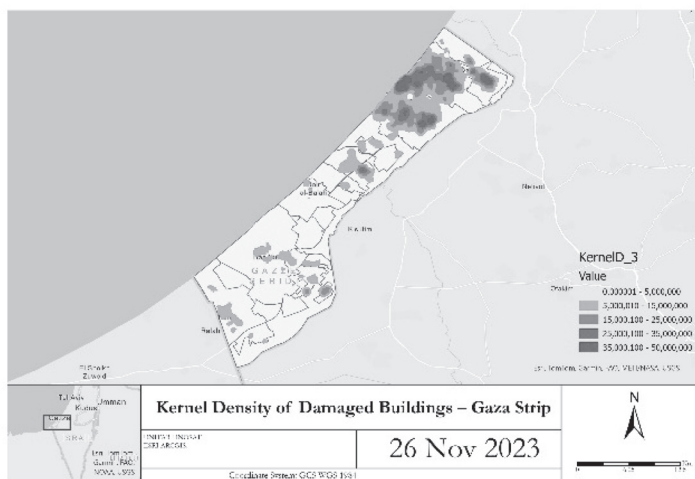


Figure 2. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 26 November 2023.

By early 2024, destruction intensified within the north and spread southward toward Deir al-Balah and Khan Yunis

(Figure 3 & 4). The April 2024 dataset underscores this expansion, with Khan Yunis emerging as a new hotspot while Rafah remained relatively less affected. This stage marks a transition from localized concentration to an arc of devastation extending into central municipalities.

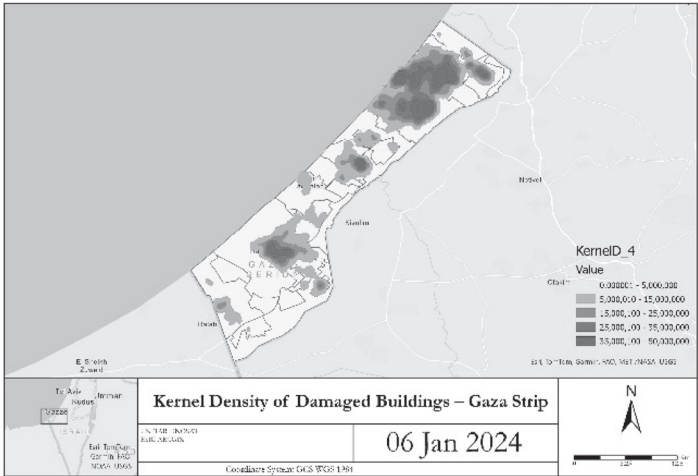


Figure 3. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 06 January 2024.

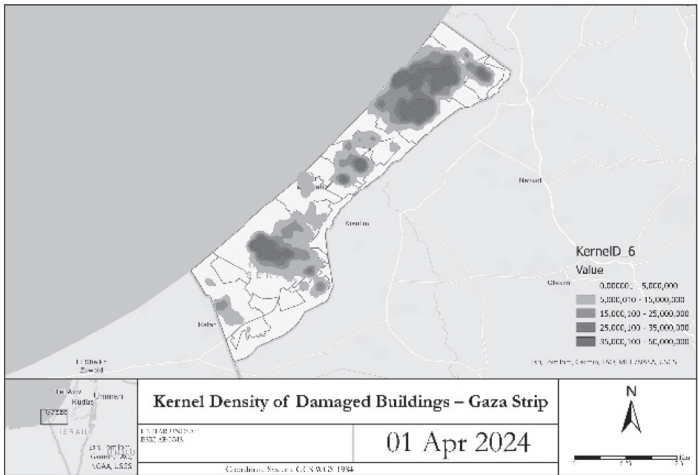


Figure 4. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 01 April 2024.

The mid-2024 analyses (Figure 5 & 6) highlight a decisive spatial shift. Rafah, initially peripheral, began registering significant hotspots, while Khan Yunis recorded red zones surpassing 25,000 counts. By September 2024, Rafah had become a major epicenter of destruction, reflecting both the relocation of displaced populations to the area and subsequent concentrated bombardments.

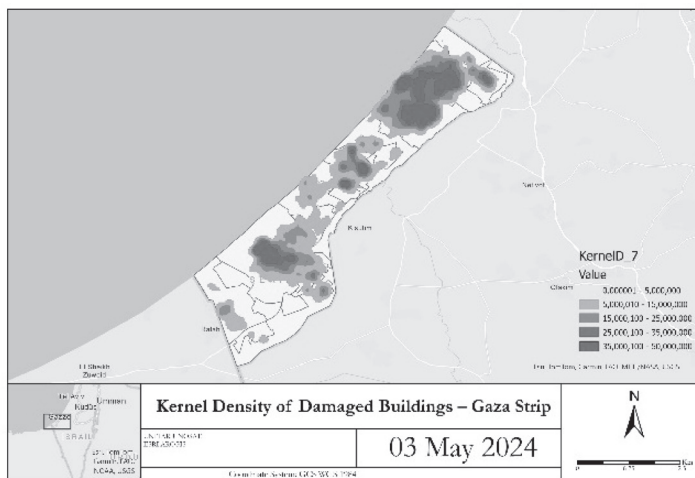


Figure 5. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 03 May 2024.

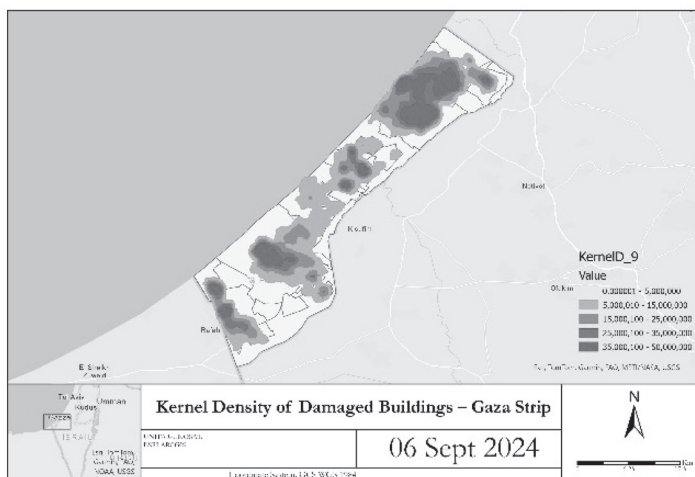


Figure 6. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 06 September 2024.

Between December 2024 and April 2025, KDE results show widespread saturation across nearly all municipalities (Figure 7 & 8). Northern zones such as Gaza City and Jabalia, already heavily impacted, retained peak densities, while Rafah and Khan Yunis expanded in scale and intensity. The February 2025 dataset confirmed Rafah’s rise as a major site of devastation, consistent with municipal-level frequency tables.

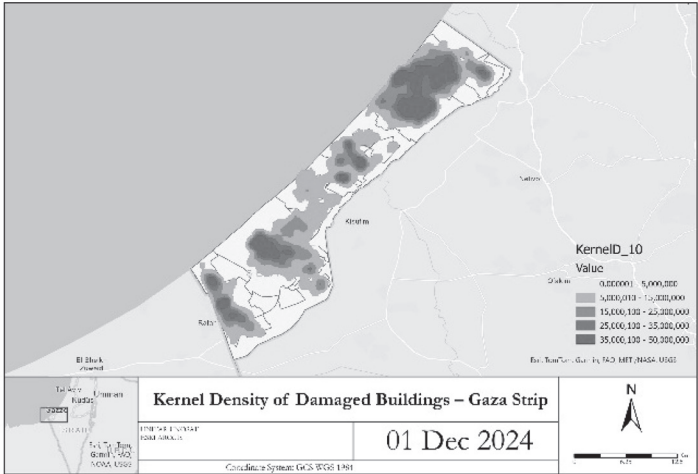


Figure 7. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 01 December 2024.

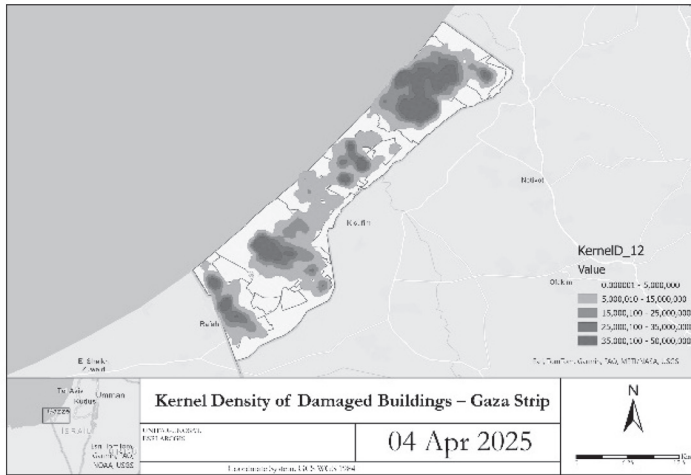


Figure 8. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 04 April 2025.

The July and October 2025 kernel density maps (Figures 9 and 10) illustrate the culmination of cumulative urban destruction across the Gaza Strip. By this stage, large and contiguous high-density zones extend across the northern, central, and southern governorates, with Gaza City, Khan Yunis, and Rafah consistently registering critical levels of damage concentration. Unlike earlier phases characterized by spatial expansion and the emergence of new hotspots, the late-2025 assessment reveals a pattern of consolidation and persistence, whereby already devastated areas maintain extreme density values rather than exhibiting significant outward spread. Updated UNOSAT assessments corroborate this interpretation, estimating a total of 198,273 affected structures by 11 October 2025, thereby confirming that urban devastation had reached a near-saturation threshold across much of the Strip.

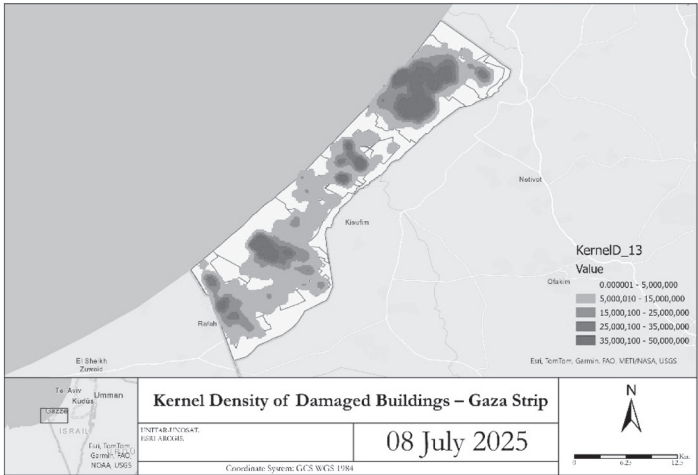


Figure 9. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 08 July 2025.

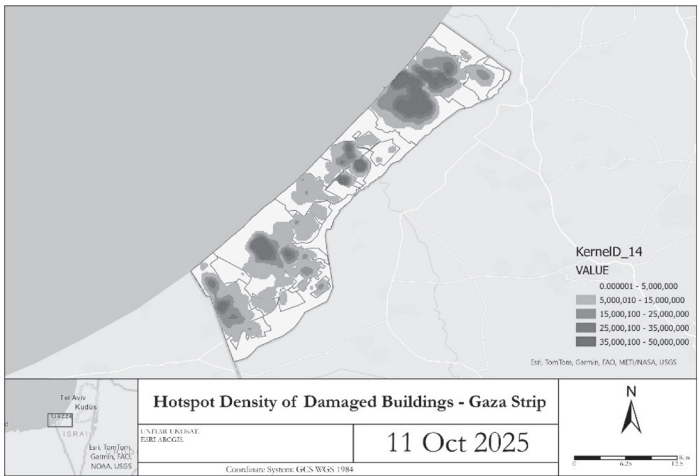


Figure 10. Kernel density of damaged buildings, Gaza Strip, 11 October 2025.

The dynamic assessment indicates a three-phase trajectory: (i) early concentration in the northern municipalities, particularly Gaza City and Jabalia; (ii) mid-phase expansion into Deir al-Balah and Khan Yunis; and (iii) late-phase satu-

ration, with Rafah emerging as a critical epicenter. The KDE methodology provides a robust means of translating building-level point data into spatially continuous surfaces, offering both temporal depth and geographic clarity.

Hotspot Analysis of Destruction

Hotspot analysis provides a complementary perspective to kernel density estimation by identifying statistically significant clusters of destruction rather than continuous density surfaces. Whereas kernel density estimation emphasizes gradients of intensity, hotspot analysis isolates discrete zones where building damage is spatially concentrated beyond random distribution. Accordingly, the method enables a comparative assessment of both the frequency and areal extent of destruction clusters across successive observation periods, distinguishing between very low, low, medium, high, and very high intensity zones.

The earliest hotspot detection, corresponding to mid-October 2023, highlights the highly localized nature of destruction at the onset of the conflict. A single high-intensity hotspot, covering approximately 0.45 km², was identified within Gaza City, while four medium-intensity clusters, with a combined area of about 1.77 km², were detected primarily around Beit Lahia and Jabalia (Figure 11). The restricted number and limited spatial extent of hotspots during this phase underscore the initial concentration of hostilities in the northern municipalities, corroborating early satellite-based damage assessments that identified Gaza City as the primary epicenter of destruction.

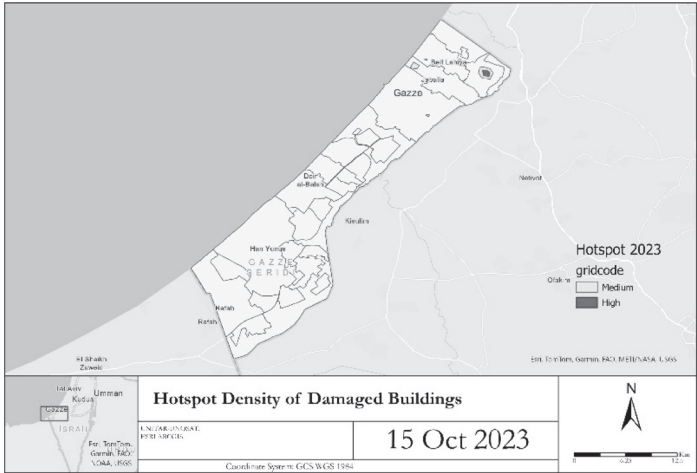


Figure 11. Hotspot density of damaged buildings, Gaza Strip, 15 October 2023.

By September 2024, the spatial structure of hotspots had transformed substantially, reflecting both the expansion and intensification of urban destruction. The number of medium-intensity hotspots increased to 25, accompanied by 32 high-intensity and 8 very high-intensity clusters, while additional very low- and low-intensity zones appeared for the first time. Collectively, hotspot areas exceeded 197 km², with low- and medium-intensity zones accounting for the largest spatial coverage, and very high-intensity clusters alone occupying more than 34 km² (Figure 12). New hotspots emerged prominently in Khan Yunis and Rafah, indicating a pronounced southward shift in destruction, while northern municipalities continued to exhibit persistent and overlapping high-intensity clusters. This configuration marks a transition from localized urban damage to Strip-wide saturation, consistent with the escalation phase identified in kernel density analyses.

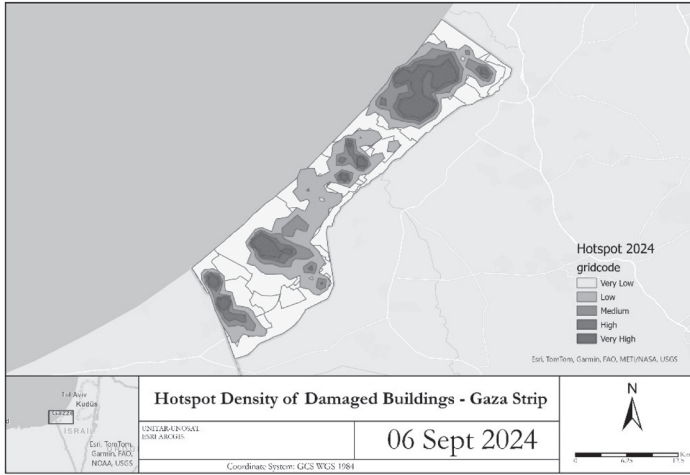


Figure 12. Hotspot density of damaged buildings, Gaza Strip, 06 Sept 2024.

The October 2025 hotspot analysis reveals a partial spatial contraction but continued intensity of destruction. While the total hotspot area declined relative to 2024—particularly for high- and very high-intensity zones—the number of hotspots increased across most intensity classes. Medium-intensity clusters rose to 34, and very high-intensity zones persisted across 9 distinct clusters, covering approximately 20.75 km² (Figure 13). Low-intensity hotspots expanded in area, exceeding 106 km², suggesting widespread residual damage patterns rather than renewed spatial expansion. This configuration indicates that by late 2025, destruction had become entrenched: fewer new epicenters emerged, yet existing hotspots remained active and structurally degraded, particularly in Gaza City, Khan Yunis, and Rafah.

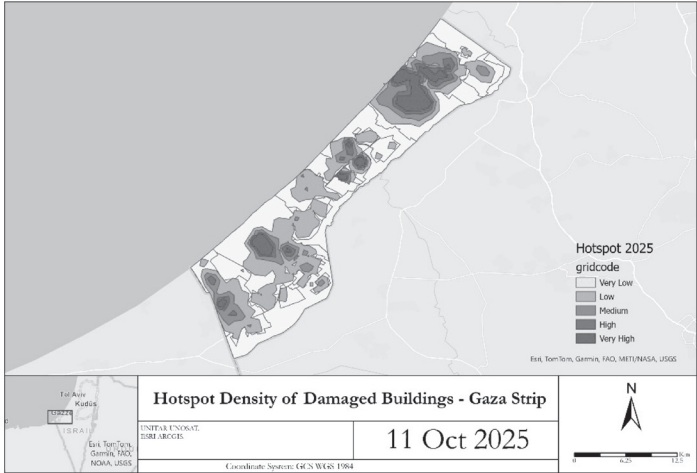


Figure 13. Hotspot density of damaged buildings, Gaza Strip, 11 October 2025.

The hotspot analysis shows a clear temporal progression: narrowly confined clusters in late 2023 expanded rapidly into numerous high- and very high-intensity zones by September 2024, followed by consolidation and persistence of extreme hotspots in 2025. Whereas the largest cumulative hotspot area was observed in 2024, the continued presence and numerical stability of very high-intensity clusters in 2025 indicate that urban destruction had shifted from spatial expansion to systemic entrenchment. Overall, the results confirm a transition from early northern concentration to Strip-wide devastation, with Gaza City, Khan Yunis, and Rafah consistently emerging as the municipalities most affected by statistically significant clusters of destruction, see Table 1.

Table 1. Evolution of Hotspot Areas and Counts (2023–2025)

Date	Intensity Level	Hotspot Count	Hotspot Area (km ²)
15 Oct 2023	Medium	4	1.77
	High	1	0.45
6 Sep 2024	Very Low	3	0.43
	Low	4	96.36
	Medium	25	41.27
	High	32	25.23
	Very High	8	34.09
11 Oct 2025	Very Low	21	0.73
	Low	30	106.28
	Medium	34	35.39
	High	26	17.09
	Very High	9	20.75

Functional Urban Loss

The functional urban loss assessment shows both the scale of destruction and its impact on essential services. In total, about 198,273 structures were classified as affected—encompassing destroyed, severely damaged, moderately damaged, and possibly damaged buildings—by October 2025. Damage was overwhelmingly concentrated in major urban centers, with Gaza City registering the highest number of affected structures (41,664), followed by Rafah City (25,151) and Khan Yunis City (25,020). Substantial losses were also recorded in Jabalya (16,708), Beit Lahiya (11,537), and Beit Hanoun (6,573), underscoring the severe impact on the northern governorates.

While most losses were residential buildings, the data also reveal extensive damage to essential urban services. Educational infrastructure was severely impacted, with 1,171 schools and universities classified as affected, particularly concentrated in Gaza City, Khan Yunis, and Rafah. Healthcare services experienced major disruption, as 253 hospitals and medical facilities were recorded as affected, notably in Gaza City, Khan Yunis, Beit Hanoun, and Rafah. Religious and cultural sites were also widely affected, including 455 mosques

and two churches, reflecting the broad spatial reach of destruction. Industrial facilities, numbering 377 affected sites and largely concentrated in Gaza City, Beit Hanoun, and Khan Yunis, sustained substantial losses, contributing to significant economic disruption. In addition, damage to 35 sewage treatment facilities and 121 water and sanitation installations highlights escalating risks to public health and urban environmental conditions.

The functional classification of affected sites further shows that, beyond residential and mixed-use buildings, a total of 2,599 functionally identified structures were affected across the Gaza Strip (Figure 14). Within this category:

1. educational facilities (1,171 cases) represent the largest share of functional losses, underscoring the severe disruption to learning and academic infrastructure.
2. Mosques (455 cases) and hospitals (253 cases) constitute the next largest groups, illustrating the substantial impact on religious life and healthcare provision.
3. Industrial facilities (377 cases) and commercial and tourism-related sites (77 and 107 cases, respectively) reflect broader damage to economic activity and livelihoods, while water, sanitation, and sewage-related facilities (156 cases combined) signal critical stress on urban services essential for public health.
4. These patterns demonstrate that the destruction extended well beyond housing, systematically undermining Gaza's social, economic, and institutional foundations.

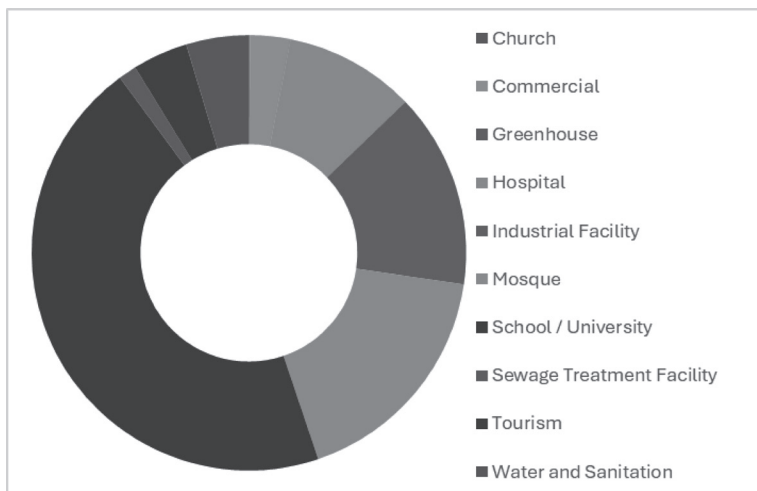


Figure 14. Distribution of functional losses across affected urban facilities.

Functional losses were most severe in Gaza City, which emerges as the dominant locus of damage across nearly all critical service categories. The city accounted for 36% of all hospital damage (91 out of 253), 44% of damaged industrial facilities (167 out of 377), and over 60% of commercial losses (47 out of 77), underscoring the profound collapse of both healthcare capacity and economic infrastructure (see Figure 15). Educational losses were similarly concentrated: Gaza City alone registered 413 damaged schools and universities, representing more than one-third of all educational damage recorded across the Strip.

Khan Yunis City constituted the second major epicenter of functional loss, absorbing 155 damaged schools and universities, 42 hospitals, and 44 mosques, confirming its role as a principal southern node of destruction. Jabalia, including both the city and camp, experienced particularly severe impacts on social infrastructure, accounting for 64 schools in Jabalia City and 52 in Jabalia Camp, alongside 51 mosques, highlighting major disruptions to education and community life in the northern Strip.

Rafah City reflects a later but significant escalation in functional damage, with 100 schools, 53 mosques, 23 hospitals, and 12 water and sanitation facilities affected, indicating the transformation of Rafah into a critical zone of infrastructural collapse during the later stages of the conflict. Smaller municipalities such as Beit Lahiya and Beit Hanoun also recorded notable losses, particularly in industrial facilities, schools, and mosques, pointing to localized but substantial service disruption. Sewage treatment facilities were damaged primarily in Al Fukhkhari (14 sites) and Gaza City (12 sites), while water and sanitation infrastructure losses were widely distributed across Gaza City, Khan Yunis, Rafah, and Bani Suheila.

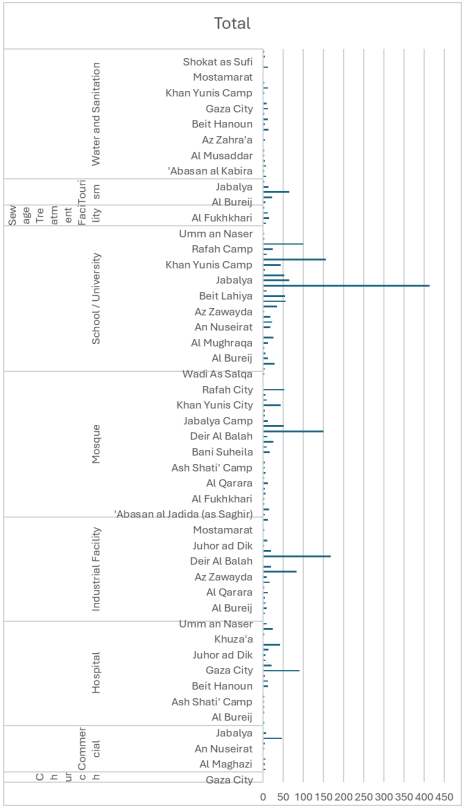


Figure 15. Functional urban losses across municipalities of the Gaza Strip, categorized by site type (schools, hospitals, mosques, industrial facilities, commercial, tourism, and sewage treatment).

Conclusion and Limitations

This study has examined the anatomy of urban devastation in the Gaza Strip through a dynamic and functional assessment of building destruction between October 2023 and October 2025. By integrating building damage datasets with spatial analysis in ArcGIS Pro, it was possible to reconstruct both the temporal progression and the functional consequences of destruction across the Strip. The dynamic assessment revealed a three-phase trajectory of devastation: an early concentration of destruction in the northern municipalities, particularly Gaza City and Jabalia; a mid-phase expansion into central areas such as Deir al-Balah and Khan Yunis; and a late-phase saturation, with Rafah emerging as a new epicenter of destruction. Kernel density estimations illustrated how localized bombardments evolved into widespread saturation, culminating in systemic urban devastation by immediately preceding the period of ceasefire announcement.

Functional analysis underscored the collapse of the urban fabric beyond physical structures. Gaza City, Jabalia, and Khan Yunis consistently emerged as the municipalities most affected, accounting for the majority of affected hospitals, schools, mosques, and industrial facilities. The loss of these functions signifies more than structural collapse; it represents the erosion of essential services such as education, healthcare, and community life, alongside the dismantling of economic and productive capacity.

The analysis is limited by its reliance on satellite-based damage assessments, which may under- or over-estimate destruction in dense urban areas. Furthermore, the absence of field validation and unnamed polygons in administrative datasets restricts full attribution of losses to specific municipalities.

References

- Haddad, M., & Hussein, M. A. (2025, September 12). *What remains of Gaza City?* Al Jazeera. <https://www.aljazeera.com/news/long-form/2025/9/12/before-and-after-satellite-images-show-how-israel-has-destroyed-gaza-city>
- Holail, S., Saleh, T., Xiao, X., Xiao, J., Xia, G.-S., Shao, Z., ... Li, D. (2024). Time-series satellite remote sensing reveals gradually increasing war damage in the Gaza Strip. *National Science Review*, 11(9), nwae304.
- Silverman, B. W. (2018). *Density estimation for statistics and data analysis*. Routledge.
- United Nations Institute for Training and Research, & United Nations Satellite Centre. (2024, September 29). *Gaza Strip comprehensive damage assessment* [Map]. UNOSAT. <https://unosat.org/products/3984>
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. (2019, July 18). *State of Palestine: Gaza Strip municipal boundaries* [Data set]. Humanitarian Data Exchange. <https://data.humdata.org/dataset/gaza-stripmunicipal-boundaries>
- United Nations Satellite Centre. (2025, October 31). *Comprehensive building damage assessment, Gaza (October 2025)* [Data set]. UNITAR–UNOSAT. <https://gaza-unosat.hub.arcgis.com/pages/data>
- United Nations Satellite Centre. (2025, October 31). *Gaza comprehensive damage assessment dashboard*. UNITAR–UNOSAT. <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/11816edccdc24205990a33b1b3afd259>