

# TÜRK MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA VE EĞİTİMİ DERGİSİ

2026 - Cilt: 5 Sayı: 1

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

Turkish Journal of Engineering  
Research and Education

2026 - Vol: 5 No: 1

Bu dergi Türk Eğitim-Sen tarafından yayınlanmaktadır.

This journal is published by Türk Eğitim-Sen.



İmtiyaz Sahibi/ Owner	Talip GEYLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKANI
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü /Director	Prof. Dr. Fatih İŞCAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKAN YARDIMCISI
Yazışma Adresi / Correspondence Address	Erzurum Mahallesi Talatpaşa Bulvarı No:160 Kat:6 Cebeci/ANKARA
İnternet Adresi / Web Address	<a href="https://www.tmaed.org">https://www.tmaed.org</a>
Yayın Türü /Publication Type	Sürelî / Periodical Yılda iki sayı yayımlanır: Mayıs, Kasım Published two issues per year: May, November
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Murat Erhan BALCI – Balıkesir Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Prof. Dr. İlker TEKİN – Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Osman ÖZKARACA – Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Ali Hakan IŞIK – Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Prof. Dr. Baybars Ali FİL- Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU - İstanbul Ticaret Üniversitesi Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Osman KOLA - Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Prof. Dr. Şenol GÜRİSOY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ – Düzce Üniversitesi Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ - Karadeniz Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Mustafa Selman AYDOĞAN - Balıkesir Üniversitesi Doç. Dr. Nihat DÖNGEL- Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Tuba GÖZEL - Gebze Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Tülay Çivici – Balıkesir Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN -Gebze Teknik Üniversitesi
Editör Kurulu / Editorial Board	Prof. Dr. Abid ABU-TAIR - British University in Dubai Prof. Dr. Adil EL-KORDI - Beirut Arab University Prof. Dr. Ahmed F. ZOBAA-Brunel University Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Ali Fuat BOZ – Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Behnam MOHAMMADI-IVATLOO - University of Tabriz Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU– Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Çetin ELMAS - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Engin Cemal Mengüç – Kayseri Üniversitesi Prof. Dr. F. P. Garcia MARQUEZ - University of Castilla-La Mancha Prof. Dr. Feray KÖÇKAR - Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN – İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. İgbal BABAYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. İsmail ŞAHİN - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Jamal KHATIB - Beirut Arab University Prof. Dr. John KINUTHIA - University of South Wales Prof. Dr. Maksud BOBOJANOV - Tashkent State Technical University Prof. Dr. Mehmet Fatih IŞIK – Hitit Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa GÜNAY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Mürsel ERDAL - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nurali YUSUFBEYLİ - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Nuray GEDİK – Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU - Gaziantep Üniversitesi Prof. Dr. Recep BİRGÜL – Carroll College Prof. Dr. Sergey BUSHİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Seyhan FIRAT - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Tuncay YİĞİT – Süleyman Demirel Üniversitesi Prof. Dr. Vilayet VELİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Yakup KAYA- Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Z. ABDUL-MALEK - Universiti Teknologi Malaysia Assoc. Prof. Dr. S. H. E. Abdel ALEEM- Valley High Institute of Eng. and Tech. Doç. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. Zeynep HASIRCI TUĞCU - Karadeniz Teknik Üniversitesi Dr. Abbas RABİEE - University of Zanjan Dr. Ali AHMADIAN - University of Bonab Dr. Amin Mohammadpour SHOTORBANI - University of British Columbia Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ÇİVİCİ -Balıkesir Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serkan YILDIRIM – Gazi Üniversitesi Dr. Morteza Zare OSKOU EI - Qatar University Dr. Pouya IFAEİ - Kyung Hee University

Editör Kurulu / Editorial Board	Dr. D. R. ALMALYK - The Islam Karimov Tashkent State Technical University Dr. Saeed PEYGHAMI - Aalborg University Dr. Vahid VAHIDINASAB - Nottingham Trent University
---------------------------------	---

Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Dr. Öğr. Üyesi Oktay KARAKAYA – Balıkesir Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Şevket CANTÜRK – Balıkesir Üniversitesi Dr. Erva PARILDI – Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Dil Editörleri / Language Editors	Türkçe: Prof. Dr. Ünsal Yılmaz YEŞİLDAL-Akdeniz Üniversitesi İngilizce: Doç. Dr. Erkan YÜCE – Aksaray Üniversitesi
Teknik Editörler / Technical Editors	Dr. Öğr. Üyesi Mert Bekir ATSEVER -Milli Savunma Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Öğr. Gör. Dr. Mehmet GÜLSÜN – Gazi Üniversitesi

Bu Sayının Hakemleri/ Reviewers for the Current Issue	Prof. Dr. Murat Osman ÜNALIR- Ege Üniv. / Bilgisayar Müh. Bölümü Prof. Dr. Afşın Alper CERİT- Erciyes Üniv. / Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü Prof. Dr. A. Paşa HEKİMOĞLU- Recep Tayyip Erdoğan Üniv. / Makine Müh. Bölümü Doç. Dr. Ahmet Emre DİNÇER- Ankara Yıldırım Beyazıt Üniv. / Mimarlık Bölümü Doç. Dr. Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA-Erciyes Üniv. / Mekatronik Müh. Bölümü Doç. Dr. Oğuz TUNÇEL- Siirt Üniv. / Makine Müh. Bölümü Dr. Öğr. Üyesi B. Buluz KÖMEÇOĞLU- İstanbul Gedik Üniv. / Bilgisayar Müh. Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt BİRCAN- Balıkesir Üniv. / Jeoloji Müh. Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ÇAMBAY- Bitlis Eren Üniv. / İnşaat Müh. Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin AYDİLEK- Kırıkkale Üniv. / Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü Dr. Öğr. Üyesi M. Bekir ATSEVER- Milli Savunma Üniv. / Elektr.-Elektro. Müh. Böl. Dr. Öğr. Üyesi Selim KARTAL- Iğdır Üniv. / Iğdır Tek. Bil. MYO / Tasarım Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Süleyman TUNÇEL – Milli Savunma Üniv. / Elektronik. Hab. Müh. Dr. Öğr. Üyesi Şevket CANTÜRK- Balıkesir Üniv. / Sındırğı MYO/ Elektr. ve Enerji Böl. Öğr. Gör. Dr. Tümay GÜNEŞ- Sinop Üniv. / Boyabat MYO/Mim. ve Şehir Pln. Böl.
--	--

## **HAKKINDA**

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

## **ABOUT**

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

## **AMAÇ ve KAPSAM**

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

## **AIMS and SCOPE**

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

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- IEEE 14-Baralı Sistemde Fotovoltaik-Hibrit Batarya ve Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Entegrasyonuna Dayalı Enerji Yönetimi**  
*Energy Management Based on PV-Hybrid Battery and EV Charging Station Integration in the IEEE 14-Bus System* 1-7  
Hakan Özer\*, Zeynep Tüfek, Emrah Çetin
- Doğrusal Ters Sarkaç Kontrolünde Derin Q-Ağı Yaklaşımı: Simülasyon Başarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulama Kısıtları**  
*Deep Q-Network Approach in Linear Inverted Pendulum Control: Simulation Performance and Real-Time Application Constraints* 8-16  
Erman Köybaşı\*, Sabri Bıçakçı
- Rayleigh Dalgası Dispersiyon Eğrisinin Elde Edilmesinde Özilişki Hesaplama Yöntemlerinin Farklı Geometrik Dizilimlerle Karşılaştırılması**  
*Comparison of Spatial Autocorrelation Calculation Methods with Different Geometric Arrangements for Rayleigh Wave Dispersion Curve Estimation* 17-29  
Aydın Büyüksaraç\*, Onur Eysisüren, Özcan Bektaş, Eren Pamuk
- Effect of Material Selection on Warp and Shrinkage Behavior in an Automotive Fuse Box Housing: A Numerical Flow Analysis**  
*Otomotiv Sigorta Kutusu Muhafazasında Malzeme Seçiminin Çarpılma ve Büzülme Davranışı Üzerindeki Etkisi: Sayısal Akış Analizi* 30-45  
Asiye Esra Çelik, Alp Eren Dede, Fuat Tan\*
- Borsa Operasyonları için Ölçeklenebilir Gerçek Zamanlı Endeks Yönetim Sistemi: BEYS Mimarisi ve Sistem Modeli**  
*A Scalable Real-Time Index Management System for Stock Exchange Operations: Architecture and System Model of BEYS* 46-60  
Murat Can Altun, Ahmet Başgöze, Özyavuz Topçu, Altan Arı, Ahmet Can Ramazanoğlu, Mehmet Göktürk\*
- İlkokul Yapılarının İklimsel Konfor Tasarım Parametreleri Açısından İncelenmesi: Düzce Örneği**  
*An Evaluation of Primary School Buildings in Terms of Climatic Comfort Design Parameters: The Case of Düzce* 61-75  
Beyza Bayrak\*, Alper Bideci, Ünal Sever

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# IEEE 14-Baralı Sistemde Fotovoltaik-Hibrit Batarya ve Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Entegrasyonuna Dayalı Enerji Yönetimi

## *Energy Management Based on PV-Hybrid Battery and EV Charging Station Integration in the IEEE 14-Bus System*

Hakan Özer<sup>1,\*</sup>, Zeynep Tüfek<sup>2</sup>, Emrah Çetin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mersin, Türkiye.

<sup>2</sup>Kapadokya Üniversitesi, Kapadokya Meslek Yüksek Okulu, Nevşehir, Türkiye.

Geliş / Received: 10.10.2025

Kabul / Accepted: 12.11.2025

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Hakan Özer [230929002@tarsus.edu.tr](mailto:230929002@tarsus.edu.tr)

**ÖZ:** Bu çalışma, dağıtık enerji sistemlerine yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu bağlamında elektrikli araçlar (EV) için hibrit şarj altyapısının tasarım ve analizini sunmaktadır. Model, IEEE 14-baralı standart güç sistemi üzerine kurulmuş olup fotovoltaik (PV) paneller, lityum-iyon batarya ve süperkapasitör (SC) içeren çok kaynaklı bir enerji sistemi olarak yapılandırılmıştır. Simülasyonlar MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve sistemin dinamik davranışları ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. PV sistemi, gündüz saatlerinde birincil enerji üretim birimi olarak görev yaparken; SC, ani yük değişimlerine hızlı tepki kabiliyeti sayesinde gerilim düzenlemesini destekler; lityum-iyon batarya ise enerji sürekliliğini sağlamak için devreye girer. Sonuçlar, sistemin hem enerji üretimi hem de yük dengeleme açısından yüksek performans sergilediğini ve şebeke üzerindeki olumsuz etkileri azalttığını göstermektedir. Ayrıca, batarya şarj durumu (SOC), akım, gerilim ve güç gibi ana parametrelerin zamanla değişimleri incelenerek sistem kararlılığı ve tepki özellikleri değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, sistemin IEEE 14-baralı ağdaki tüm baralar üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimize edilmiş enerji akışı dağılımı, azalmış gerilim dalgalanmaları ve artırılmış şebeke kararlılığı gibi önemli faydalar sağlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model sürdürülebilir ve esnek şarj altyapılarının tasarımı için önemli bir örnek teşkil etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Şarj istasyonu, lityum-iyon batarya, süper kondansatör, IEEE 14-baralı sistem, hibrit enerji depolama.

**ABSTRACT:** This study presents the design and analysis of a hybrid charging infrastructure for electric vehicles in the context of integrating renewable energy sources into distributed energy systems. The model is established on the IEEE 14-bus standard power system and is configured as a multi-source energy structure, comprising photovoltaic (PV) panels, a lithium-ion battery, and a supercapacitor (SC). Simulations were conducted in the MATLAB/Simulink environment, and the dynamic behaviors of the system were analyzed in detail. The PV system serves as the primary energy generation unit during daytime hours; the supercapacitor supports voltage regulation through its fast-response capability to sudden load variations; and the lithium-ion battery is activated to ensure energy continuity. The results demonstrate that the system exhibits high performance in both energy generation and load balancing, while mitigating adverse effects on the grid. Moreover, the time-dependent variations of key parameters, including battery state of charge (SOC), current, voltage, and power, were analyzed to evaluate system stability and response characteristics. Within this framework, the impact of the system on all buses in the IEEE 14-bus network was examined, providing significant benefits such as optimized energy flow distribution, reduced voltage fluctuations, and enhanced grid stability. Consequently, the developed model constitutes an important example for the design of sustainable and flexible charging infrastructures.

**Keywords:** Charging station, lithium-ion battery, super capacitor, IEEE 14-bus system, hybrid energy storage.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya genelinde EV sayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. IEA'nın 2024 raporuna göre, küresel EV filosu 45 milyon adedi aşmış ve toplam araç satışlarının yaklaşık %18'ini oluşturmuştur [1]. Bu artış, temiz enerji kaynaklarına olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik politikalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekelere entegrasyonunu zorunlu hale getirmiştir [2]. EV'lerin verimli ve güvenli biçimde şarj edilmesi, güç sistemlerinin kararlılığı için kritik öneme sahiptir. Şarj altyapısının kararlı ve sürdürülebilir bir yapıda olması sistem güvenliği ve kesintisiz enerji için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen EV şarj istasyonları, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji güvenliğinin sağlanması açısından etkili bir çözüm sunmaktadır [3]. PV sistemler, sıfır emisyonlu çalışma, düşük bakım gereksinimi ve modüler kurulum avantajlarıyla öne çıkmaktadır [4]. Ancak elektrik enerjisinin PV temelli üretimi atmosferik koşullara bağlı olduğundan, ışınım değişimleri güç sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum, EV şarj uygulamalarında arz-talep dengesizliklerine neden olmaktadır [5]. Bu dengesizlikleri azaltmak amacıyla hibrit enerji depolama sistemi (HESS) yapıları etkin bir çözüm olarak önerilmektedir.

HESS, farklı teknik özelliklere sahip birden fazla depolama teknolojisini bir araya getiren yapılardır. Bu sistemler, hem yüksek enerji hem de güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda daha dengeli ve verimli enerji yönetimi sağlar.

Literatürde, batarya ve SC tabanlı HESS'lerin yüksek enerji ve güç yoğunluklarını birleştirerek güç kalitesini iyileştirdiği belirtilmektedir [6].

Lityum-iyon bataryalar, uzun süreli enerji depolama kapasitesiyle öne çıkarken, SC birimleri yüksek güç çıkışı ve hızlı tepki kabiliyetiyle ani yük değişimlerini dengelemektedir. Bu iki teknolojinin birlikte kullanımı, EV şarj istasyonlarında oluşan güç dalgalanmalarının etkin şekilde yönetilmesini sağlamaktadır [7]. Bu bağlamda, PV sistemlerin farklı çalışma konfigürasyonları da enerji sürekliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Teknolojik

gelişmelerle birlikte bu sistemlerin uygulanabilirliği önemli ölçüde artmıştır. PV uygulamaları genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız (off-grid) sistemler. Şebekeden bağımsız konfigürasyonlarda, güneş ışınımının kesintili doğası enerji üretiminde istikrarsızlığa yol açabilir. Bu nedenle, üretim ve tüketim arasındaki dengeyi korumak için batarya tabanlı enerji depolama çözümleri sıklıkla entegre edilir [8].

Referans [9] ve [10]'da, elektrikli araçların şarj altyapısında güneş enerjisinden yararlanarak hem elektrik üretiminin çevreye olumsuz etkilerinin azaltılması hem de enerji sürdürülebilirliğinin artırılmasını amaçlamaktadır. Geliştirilen PV destekli yapı, fosil kaynaklara olan bağımlılığı en aza indirerek karbon emisyonlarını düşürür ve enerji depolama sistemiyle üretim-tüketim dengesini optimize eder. Bu sayede şebeke üzerindeki yük azalırken, şarj süreci daha ekonomik ve verimli hale gelir. Ayrıca araştırma, fotovoltaiik tabanlı şarj istasyonlarının teknik gereksinimlerini ve uygulanabilirlik koşullarını tanımlayarak, yenilenebilir enerjiyle bütünleşmiş kentsel ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi hususunda literatüre katkı sunmaktadır.

Bu çalışmada, PV tabanlı enerji üretimiyle entegre edilen SC ve batarya tabanlı bir HES'in önerilmesi ve önerilen sistemin IEEE 14-baralılık dağıtım sisteminde performansının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen sistem, ayrıca EV şarj istasyonu olarak görev yapmaktadır. Önerilen yapı, şebeke dalgalanmalarını azaltmayı, enerji verimliliğini artırmayı ve ani yük değişimlerinde sistem kararlılığını korumayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda, sistem performansı, farklı ışınım seviyeleri ve değişken yük koşulları altında MATLAB/Simulink ortamında ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

## 2. SİSTEM MODELİ

### 2.1 PV Sistemi

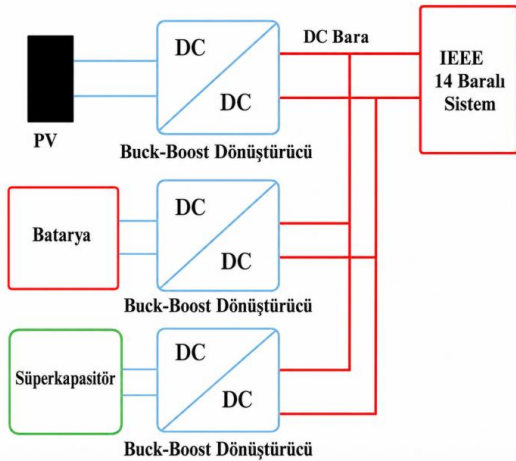
PV paneller, güneş ışığını doğrudan doğru akım (DC) elektrik enerjisine dönüştürür. PV hücre üzerine düşen ışınım, yarı iletken yapıda elektron hareketi oluşturarak elektrik üretimini sağlar. Ancak elde edilen gerilim ve akım değerleri, ışınım

ve sıcaklık gibi çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Bu nedenle PV sistemi, Şekil 1’de görüldüğü gibi bir DC-DC (buck-boost) dönüştürücü üzerinden sisteme bağlanır. Bu dönüştürücü, PV’nin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlar. Böylece üretilen enerji en verimli şekilde kullanılır. Ayrıca gerilim seviyesi sistem gereksinimlerine uygun hâle getirilir [7].

## 2.2 Hibrit Enerji Depolama Sistemi (HESS)

Tasarlanan modelde üretilen enerji, yükü beslemek amacıyla HESS sisteminde depolanmaktadır. Bu yapıda enerji, lityum-iyon batarya ve süperkapasitör birimleri üzerinden tutulur. Bu iki depolama elemanı paralel olarak bağlanır. Bu bağlantının amacı, yük akımının dinamik olarak paylaşılmasını sağlamaktır. Böylece ani ve yüksek frekanslı güç talepleri süperkapasitör tarafından karşılanır. Daha yavaş değişen ve sürekli güç gereksinimleri ise batarya tarafından sağlanır. Sonuç olarak batarya üzerindeki ani akım yükleri azalır. Sistem kararlılığı artar ve depolama elemanlarının ömrü uzatılır [7]. Çalışmada kullanılan süperkapasitör ve lityum-iyon bataryanın temel parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur. PV’ye ait tasarım parametreleri Tablo 2’de yer almaktadır.



Şekil 1: Hibrit enerji tabanlı şarj altyapısı modeli.

Tablo 1: Sc ve lityum iyon batarya parametreleri.

Parametre	Süperkapasitör (SC)	Batarya (Li-ion)
Nominal Gerilim (V)	300	240
Kapasite	1.56 F	48 Ah
Maksimum Akım (A)	100	41.7
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	4.9	115.2
Güç Yoğunluğu (W/kg)	2.53 106	100

Tablo 2: PV tasarım parametreleri.

Parametre Adı	Sembol / Birim	Değer
Paralel bağlı dizi sayısı	–	1
Seri bağlı modül sayısı	–	8
Modül maksimum gücü	Pmax (W)	250.205
Modül hücre sayısı	Ncell	60
Açık devre gerilimi	Voc (V)	37.3
Kısa devre akımı	Isc (A)	8.66
Maksimum güç noktası gerilimi	Vmp (V)	30.7
Maksimum güç noktası akımı	Imp (A)	8.15

## 2.3 Elektrikli Araç Şarj İstasyonu

Bu çalışmada, EV şarj ünitesi hem IEEE 14-baralığı yapıya hem de PV dizisi destekli batarya sistemine entegre edilmiştir. Bu entegrasyonun genel yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Entegre konfigürasyon, enerji yönetimi verimliliğini artırmayı, ağ üzerindeki yükleri dengelemeyi ve genel sistem kararlılığını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi, 14-baralığı modelin 4. barası bir PV kaynağı ve SC’ye bağlıdır; EV şarj istasyonu ise 14. baraya entegre edilmiştir.

Bu yapı, farklı işletim koşulları altında şarj altyapısı performansının değerlendirilmesini sağlar. Ayrıca PV destekli batarya sistemi, talebin yoğun olduğu dönemlerde şebekeye bağımlılığı azaltarak ekonomik faydalar sağlar. Önerilen tasarım ayrıca enerji sürekliliğine katkıda bulunur ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunar.

Şekil 2’de tasarlanan EV şarj istasyonu modelinde PV paneller tarafından üretilen enerji, DC-DC dönüştürücüler ile uygun gerilim seviyesine dönüştürülür. Enerji, lityum-iyon batarya ve SC’den oluşan hibrit enerji depolama sistemine yönlendirilir. Sistem, şarj istasyonunun farklı yük koşullarında çalışmasını simüle edecek şekilde tasarlanmıştır. Modelin alt kısmında PWM sinyal üretimi, ölçüm birimleri ve geri besleme kontrolörleri gibi kontrol alt sistemleri uygulanmıştır. Bu yapı, enerji akışının etkin yönetimini sağlar ve değişen işletim koşulları altında kararlı performansı garanti eder. Bu doğrultuda, modelin performansını optimize etmek amacıyla oluşturulan matematiksel ifade denklem (1) de amaç fonksiyonu biçiminde sunulmuştur.

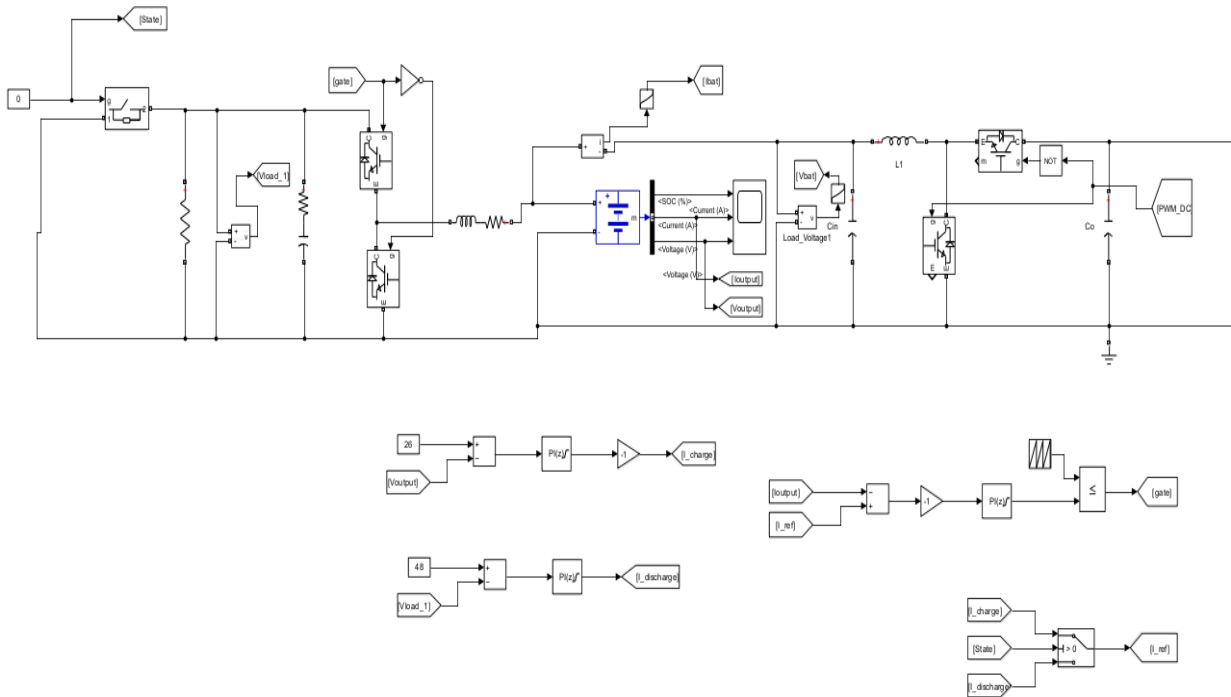
$$\min J = w_1(\Delta V_{grid})^2 + w_2(P_{loss}) + w_3(\Delta f)^2 \quad (1)$$

Bu amaç fonksiyonunda  $\Delta V_{grid}$  şebeke gerilimindeki dalgalanmayı,  $P_{loss}$  sistemde oluşan güç kayıplarını ve  $\Delta f$  frekans sapmasını temsil etmektedir. Bu amaç fonksiyonunda yer alan  $w_1, w_2$

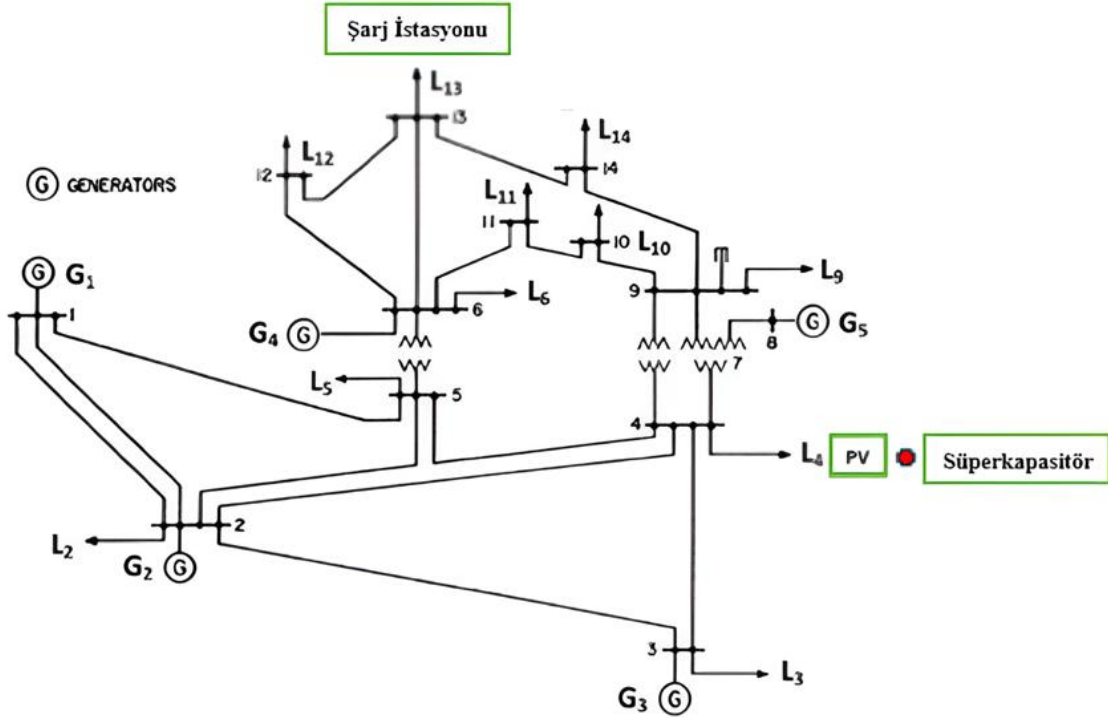
ve  $w_3$  katsayıları ise sırasıyla gerilim dalgalanması, güç kaybı ve frekans sapması terimlerinin modele olan etkisini belirleyen ağırlık değerleridir. Bu amaç fonksiyonu, sistemin genel performansını değerlendirmede temel ölçüt olarak kullanılmıştır.

#### 2.4 IEEE 14-Baralı Test Sistemi

Şekil 3’te şematığı verilen IEEE 14 baralı test sistemi literatürde yenilenebilir enerji temelli üretim birimlerinin entegrasyon ve performans analizlerinde sıklıkla tercih edilen bir sistemdir. Bu çalışmada, bir PV üretim birimi, HESS ve EV şarj istasyonu IEEE 14-baralı test sistemine entegre edilmiştir. Temel amaç, bu bileşenlerin koordineli çalışması sırasında güç şebekesinin davranışını incelemektir. PV üretiminin kesintili doğası ve şarj istasyonlarından kaynaklanan ani güç talepleri, sistem kararlılığını etkileyebilir. HESS, bu dalgalanmaları azaltarak sistemin dinamik güvenilirliğini ve dengesini artırır. Bu çerçevede gerilim anlık değeri, gerilim ve akım rms değeri ve SOC analiz edilmiştir.



Şekil 2: MATLAB/Simulink’te uygulanan şarj istasyonunu modeli.



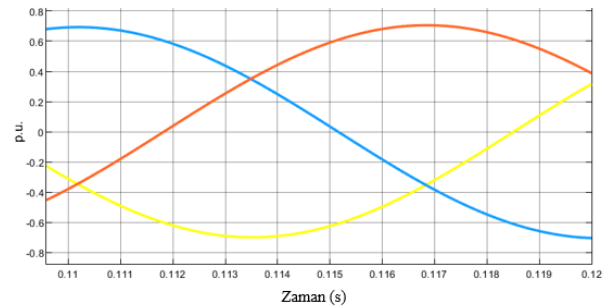
Şekil 3: 14-baralı IEEE sisteminde PV ve hibrit depolama ile EV şarj istasyonu modeli.

### 3. ANALİZ SONUÇLARI

Güneş enerjisine dayalı üretim sistemi, konfigürasyonun başlangıç noktasıdır. Başlangıç aşamasında, bu enerji ani güç dalgalanmalarını azaltmak için ara depolama birimi olarak görev yapan SC'ye aktarılmıştır. Orta kısımda yer alan 14-baralı yapı, enerji akışının kontrollü dağıtımını mümkün kılarak her baranın geçici ve kararlı durum davranışlarının detaylı şekilde gözlemlenmesini sağlar. Sistemin genel operasyonel özelliklerini ortaya koymak amacıyla, 14-baralı yapıdan elde edilen dalga formları analiz edilmiştir.

Şekil 4'te verilen 12. baraya ait üç fazlı anlık gerilim dalga şekilleri incelendiğinde, fazların düzenli ve sinüzoidal yapısını koruduğu görülmektedir. Fazlar arasındaki dengeli kayma, sistemin kararlı bir üç fazlı çalışma karakteristiği sergilediğini göstermektedir. Gerilim dalga şekillerinin yaklaşık  $\pm 0.7$  p.u. aralığında değişmesi, pozitif ve negatif tepe değerlerinin mutlak değer olarak yaklaşık eşit olduğunu göstermektedir. Bu durum, dalga şekillerinin sıfır eksenine göre simetrik olduğunu ve sistemde dengeli bir gerilim davranışı oluştuğunu ifade etmektedir. Bu genlik seviyesi,

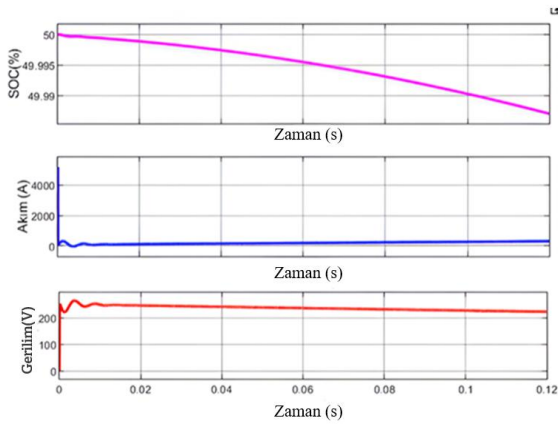
kullanılan p.u. baz değeri ve gerilimin anlık faz değeri olarak gösterilmesi ile ilişkilidir. PV, süperkapasitör ve lityum-iyon bataryadan oluşan hibrit enerji depolama sistemi, enerjinin 14 baralı sisteme düzenli şekilde aktarılmasına katkı sağlamakta ve elektrikli araç şarj istasyonunun daha dengeli bir enerji akışıyla beslenmesini desteklemektedir.



Şekil 4: 12. Baraya ait faz-nötr gerilim dalga şekilleri (p.u.).

Şekil 5'te yer alan ilk grafikte, Batarya Şarj Durumu (SOC) yaklaşık %50'den başlamış ve simülasyon süresince yalnızca hafif bir azalma göstermiştir (yaklaşık 49,995'ten 49,985'e). Bu eğilim, bataryanın şarj modunda olmadığını; aksine yükü

besleyerek deşarj süreci yaşadığını göstermektedir. İkinci ve üçüncü grafikte, akım profili yaklaşık 291.08 A'de ve gerilim değeri ise 222 V sabit kalmıştır. Simülasyon boyunca ani geçişler veya kararsızlık gözlemlenmemiştir; bu, istasyon çıkışındaki yük talebinin sürekli ve kararlı şekilde sağlandığını doğrular. Ayrıca analiz yalnızca tek bir barayla sınırlı kalmamış; tüm IEEE 14-baralı sistemde yapılan incelemeler tutarlı davranışlar ortaya koymuştur. Tüm baralarda benzer sonuçların elde edilmesi, modelin güvenilirliğini ve sistemin genel kararlılığını doğrulamaktadır.



**Şekil 5:** Değişken yük koşulları altında hibrit enerji depolama sisteminin simülasyon sonuçları.

Şekil 5'te sunulan model temel alınarak yapılan istasyon çıkış simülasyonları, hibrit enerji depolama sisteminin değişken yük koşulları altında stabil, güvenilir ve verimli şekilde çalıştığını doğrulamaktadır. Bu bulgular, önerilen konfigürasyonun EV şarj istasyonu uygulamaları için uygulanabilirliğini ve sağlamlığını açıkça göstermektedir. Elde edilen sonuçlar hibrit sistemlerin EV şarj istasyonları nedeniyle oluşabilecek etkilere karşı elektrik şebekesini daha kararlı hale getirebileceğini göstermiştir.

Genel olarak, grafikler birlikte değerlendirildiğinde sistemin önce geçici yanıt verdiği ve kısa sürede kararlı durum (steady-state) rejime ulaştığı görülmektedir. Başlangıçta yüksek genlikli salınımlar SC'nin dengeleme kabiliyeti ile bastırılmakta ve baralar üzerinden şarj istasyonuna iletilen enerji sürekli bir sinüzoidal form alarak stabil hale gelmektedir. Bu davranış, 14-bara konfigürasyonunun etkin enerji yönetimi sağladığını ve PV kaynağından elde edilen gücün

depolama birimleri aracılığıyla şarj altyapısına verimli şekilde iletilebildiğini göstermektedir.

#### 4. SONUÇ

PV panellerden elde edilen elektrik enerjisi, SC ve lityum-iyon batarya içeren HESS yapısında dengeli bir şekilde depolanmaktadır. Depolanan bu enerji, sistem üzerinden IEEE 14 baralı şebekeye aktarılmakta ve son aşamada elektrikli araç şarj istasyonunun beslenmesinde kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde sistem çıkışında akımın yaklaşık 291 A ve gerilimin yaklaşık 222 V seviyesinde kararlı kaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu kararlı yapı, yük talebinin kesintisiz ve güvenilir şekilde karşılandığını doğrulamaktadır. IEEE 14 baralı sistem genelinde benzer davranışların gözlemlenmesi, önerilen yapının sistem kararlılığı açısından güvenilir olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, uzun vadeli işletme koşullarında batarya yaşlanması ve sıcaklık etkileri modele dâhil edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda bu etkilerin dikkate alınması, sistem performansının daha gerçekçi ve kapsamlı şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, adaptif veya yapay zekâ temelli kontrol yöntemlerinin uygulanması, sistemin dinamik tepkisini iyileştirerek genel verimliliği artırabilir.

#### Yazar Katkıları:

Hakan Özer, sorumlu yazar olarak makale sürecinin yürütülmesine ve çalışmanın hazırlanmasına katkı sağlamıştır. Zeynep Tüfek, çalışmanın simülasyon kısmına katkıda bulunmuştur. Emrah Çetin, projenin genel kontrolü, makalenin düzenlenmesi ve son değerlendirme süreçlerinde görev almıştır. Tüm yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

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

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency, Global EV Outlook 2024, IEA, Paris, France, 2024. [Online]. Available:

<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>, Paris, 2024.

- [2] Z. Tüfek, Yenilenebilir enerji santralleri dahil olan güç sistemlerinde depolama teknolojilerinin kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Yozgat, Türkiye, Aralık 2024.
- [3] A. Aljumah, A. Darwish, D. Csala, and P. Twigg, "A review on the allocation of sustainable distributed generators with electric vehicle charging stations," *Sustainability*, 16(15), 6353, 2024.
- [4] A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 275–291, 2018.
- [5] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate," *Energy Conversion and Management*, 69, 163–173, 2013.
- [6] M. S. Elnozahy and M. M. Salama, "Technical impacts of grid-connected photovoltaic systems on electrical networks—A review," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3), 032732, 2013.
- [7] Z. Tüfek and E. Çetin, "Investigation of the power system including PV, super capacitor and lithium-ion storage technologies under BLDC motor load," *Battery Energy*, 4(6), e70034, 2025.
- [8] S. Kotra and M. K. Mishra, "A supervisory power management system for a hybrid microgrid with HESS," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), 3640–3649, 2017.
- [9] S. Cheikh-Mohamad, M. Sechilariu, F. Locment, and Y. Krim, "PV-powered electric vehicle charging stations: Preliminary requirements and feasibility conditions," *Applied Sciences*, 11(4), 1770, 2021.
- [10] F. F. Ahmad, O. Rejeb, A. K. Hamid, M. Bettayeb, and C. Ghenai, "Performance analysis and planning of self-sufficient solar PV-powered electric vehicle charging station in dusty conditions for sustainable transport," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 27, 101214, 2024.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Doğrusal Ters Sarkaç Kontrolünde Derin Q-Ağı Yaklaşımı: Simülasyon Başarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulama Kısıtları

## *Deep Q-Network Approach in Linear Inverted Pendulum Control: Simulation Performance and Real-Time Application Constraints*

Erman Köybaşı\*, Sabri Bıçakçı

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir, Türkiye.

Geliş / Received: 16.12.2025

Kabul / Accepted: 19.02.2026

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Erman Köybaşı [koybasi@balikesir.edu.tr](mailto:koybasi@balikesir.edu.tr)

**ÖZ:** Doğrusal ters sarkaç (LIP) sistemleri, doğal kararsızlıkları ve doğrusal olmayan hızlı dinamikleri nedeniyle kontrol algoritmalarının performansının değerlendirilmesinde temel bir kıyaslama problemi olarak kabul edilir. Bu çalışmada, sistemin dinamik modelini lineerize etmeye gerek duymayan, modelden bağımsız bir Derin Pekıştirmeli Öğrenme (Deep Reinforcement Learning - DRL) yöntemi olan Derin Q-Ağı (DQN) algoritması kullanılarak bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında, donanım kısıtlarına uygun ayrıklaştırılmış bir eylem uzayı ve enerji verimliliğini hedefleyen karesel bir ödül fonksiyonu ile eğitilen ajan, simülasyon testlerinde sarkacı düşey konumundan kaldırmış ve dikey denge konumunda başarıyla stabilize etmiştir. Çalışmanın özgün yanı, simülasyonda doğrulanan ajanın fiziksel deney düzeneğine entegrasyonu sırasında karşılaşılan "Simülasyondan Gerçeğe Geçiş" (Sim-to-Real Gap) probleminin deneysel olarak analiz edilmesidir. Simülasyon ortamında 20 ms örnekleme zamanı varsayımıyla mükemmel sonuç veren kontrolcü, gerçek donanım üzerinde Derin Sinir Ağı'nın hesaplama maliyeti ve veri iletim gecikmeleri nedeniyle kontrol döngüsünü ancak 80 ms sürede tamamlayabilmiştir. Bu gecikme, hızlı dinamiklere sahip sarkaç sisteminin kararsızlığa sürüklenmesine ve denge kaybına yol açmıştır. Elde edilen bulgular, DRL algoritmalarının gömülü sistemlerde uygulanabilirliği için hesaplama verimliliğinin ve donanım kısıtlarının eğitim sürecine dahil edilmesinin kritik önemini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Derin pekıştirmeli öğrenme, ters sarkaç, DQN, sim-to-real, gerçek zamanlı kontrol.

**ABSTRACT:** Linear inverted pendulum (LIP) systems, due to their inherent instabilities and fast nonlinear dynamics, are considered a fundamental benchmarking problem in evaluating the performance of control algorithms. In this study, a controller design was implemented using the Deep Q-Network (DQN) algorithm, a model-independent Deep Reinforcement Learning (DRL) method that does not require linearization of the system's dynamic model. The agent, trained in the MATLAB/Simulink environment with a discretized action space suitable for hardware constraints and a quadratic reward function aimed at energy efficiency, lifted the pendulum from its vertical position and successfully stabilized it in the vertical equilibrium position in simulation tests. The novel aspect of the study is the experimental analysis of the "Sim-to-Real Gap" problem encountered during the integration of the simulated agent into the physical experimental setup. While the controller provided excellent results in a simulation environment assuming a 20 ms sampling time, on real hardware, it only completed the control loop in 80 ms due to the computational cost and data transmission delays of the Deep Neural Network. This delay caused the fast-dynamic pendulum system to become unstable and lose its balance. The findings highlight the critical importance of computational efficiency and incorporating hardware constraints into the training process for the applicability of DRL algorithms in embedded systems.

**Keywords:** Deep reinforcement learning, inverted pendulum, DQN, sim-to-real, real-time control.

## 1. GİRİŞ

Ters sarkaç (Inverted Pendulum, IP) sistemleri, kontrol mühendisliği, dinamik sistemler ve robotik alanlarında temel bir araştırma platformu olarak evrensel bir kabul görmüştür. Özellikle tek kademeli doğrusal ters sarkaç (Linear Inverted Pendulum - LIP) sistemi, hem hareket serbestlik derecesinden daha az kontrol girişine sahip olması (underactuated) hem de yukarı denge noktasında kararsız dinamikler sergilemesi nedeniyle klasik kontrolcü tasarımının içsel zorluklarını temsil eder[1]. Bu zorluklar, sistemin dinamik dengeleme ve yörüngenin takip yeteneğini gerektiren otonom araçlar, iki ayaklı robotlar[2] ve hatta füze yönlendirme sistemleri gibi geniş bir yelpazedeki karmaşık dinamiklerin modellenmesi ve kontrolü için kritik bir ön basamak teşkil etmektedir[3]. Ters sarkaç problemini çözmek, kontrol teorisindeki ilerlemelerin gerçek dünya uygulamalarına aktarılabilirliğini göstermenin ilk adımıdır[4].

Ters sarkaç sisteminin tam kontrolü, geleneksel olarak birbirinden ayrılmış, ancak birbirini bütünleyen iki temel görevin başarıyla yerine getirilmesini gerektirir: Kaldırma (Swing-Up) ve Dengeleme (Stabilization). Kaldırma görevi, sistemin düşük enerjili ve kararlı olan sarkıt konumundan, yüksek enerjili ve kararsız olan dikey denge konumuna getirilmesini içerir[5]. Dengeleme ise, sarkaç dikey konuma ulaştıktan sonra kararsız denge noktası etrafında tutulmasıdır.

Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL), Pekiştirmeli Öğrenme (RL) çerçevesini derin sinir ağları (DNN) ile birleştirerek, ajanın karmaşık duyuşal verilerden (örneğin, yüksek boyutlu robotik sensör verileri) doğrudan eylemleri öğrenebilmesini sağlamıştır [6]. Bu entegrasyon, ajanın değer fonksiyonları, politika optimizasyonu ve zamansal fark yöntemleri gibi temel RL prensiplerini kullanarak Go ve Satranç gibi oyunlardan robotik kontrol sistemlerine kadar geniş bir alanda başarılı olmasını mümkün kılmıştır[7].

Erken dönem DRL uygulamaları, özellikle ayrık aksiyon uzaylarında etkili olan Değer Fonksiyonu temelli yaklaşımlara (Deep Q Network - DQN) odaklanmıştır. DQN, 2013 sonrasında RL alanında önemli bir dönüm noktası olmuş ve IP kontrolü gibi robotik uygulamalara uygulanmıştır[8]. DQN, IP sistemlerinde ayrık kuvvet sinyalleri

(pozitif/negatif) üreterek dengeleme kontrolcüsü olarak kullanılmıştır.

DRL, IP kontrolünde tek bir kontrolcü ile kaldırma ve dengeleme görevlerini bütünleşik olarak çözebilme yeteneğini, erken dönem çalışmalarda dahi kanıtlamıştır. [9]'daki çalışma Q-learning ve DQN gibi temel RL algoritmalarının, gerçek bir sarkaç sistemini dengeleme görevlerinde başarılı bir şekilde kullandığını göstermiştir.

Yaptığımız bu çalışmada temel amacımız derin öğrenme temelli sarkaç kaldırma ve dengeleme kontrol algoritmasının, sarkacın matematik modeli kullanılarak simülasyonda eğitilmesi ve test edilmesinden sonra bu algoritmanın gerçek sistem üzerinde de denenmesi ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. Bu çalışma laboratuvarımızda hali hazırda yer alan doğrusal ters sarkaç sistemimiz üzerinde yapılacak olan derin öğrenme temelli kontrol algoritmalarının deneylerinin ilk adımlarını ve altyapısını oluşturmaktadır.

## 2. DERİN Q-AĞI (DEEP Q-NETWORK - DQN)

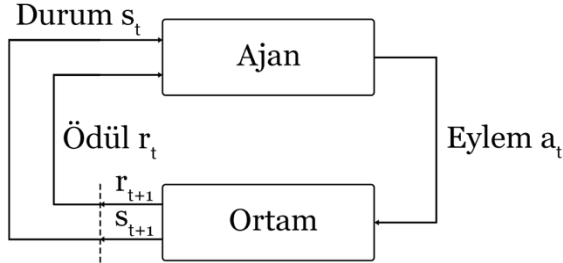
Çalışmamızda, doğrusal ters sarkacın kaldırma ve dengeleme görevlerini gerçekleştirmesi için bir derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı olan Derin Q-Ağı (DQN) kullanılmıştır.

### 2.1 Pekiştirmeli Öğrenme ve Q-Öğrenme Temelleri

Çalışmamızın teorik temeli, kontrol problemini matematiksel olarak modelleyen Markov Karar Süreçlerine (Markov Decision Processes - MDPs) dayanmaktadır. Bir MDP, ajan, durumlar ( $S$ ), eylemler ( $A$ ), durum geçiş olasılıkları ( $P$ ) ve ödüller ( $R$ ) dördünlüsü ile tanımlanan, gelecekteki durumun yalnızca mevcut duruma bağlı olduğu (Markov özelliği) bir çerçevedir[10]. RL algoritmaları, ortamla etkileşimi ve optimal davranış politikasını öğrenmeyi bu matematiksel sürece dayandırır; ajanın amacı, MDP'nin durumlarında ardışık eylemler sergileyerek uzun vadeli indirgenmiş ödülleri maksimize eden optimal  $Q$ -değer fonksiyonunu bulmaktır.

RL, bir ajanın (agent) bir ortam (environment) ile etkileşime girerek, aldığı ödülleri (reward) maksimize edecek optimal bir davranış politikası ( $\pi$ ) öğrenmesine dayanır. Bu süreç, MDP çerçevesinde modellenir.

Şekil 1’de gösterilen pekiştirmeli öğrenme döngüsünde; ajan her bir  $t$  zaman adımında ortamdan aldığı durum ( $s_t$ ) bilgisine göre bir eylem ( $a_t$ ) gerçekleştirmekte, ortam ise bu eyleme karşılık yeni bir durum ( $s_{t+1}$ ) ve ödül ( $r_{t+1}$ ) sinyalini ajana geri beslemektedir.



Şekil 1: Pekiştirmeli öğrenmede MDP çerçevesi.

DQN'in temelini oluşturan Q-Öğrenme (Q-Learning) algoritması, bir durum-eylem değer fonksiyonu  $Q(s, a)$ 'yı öğrenmeyi amaçlar.  $Q(s, a)$  fonksiyonu, ajan  $s$  durumundayken  $a$  eylemini seçerse beklenen toplam indirgenmiş ödülü (expected discounted cumulative reward) tahmin eder[11]. Optimal  $Q^*$  fonksiyonu, Bellman Optimalite Denklemi ile ilişkilidir:

$$Q(s, a) = \mathbb{E} \left[ R_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') | (s, a) \right] \quad (1)$$

Burada:

- $s$ : Mevcut durum (aracın konumu, hızı, sarkacın açısı ve açılma hızı).
- $a$ : Ajanın uyguladığı eylem (araba kuvveti).
- $R_{t+1}$ :  $a$  eyleminin uygulanması sonucu alınan anlık ödül.
- $s'$ : Yeni durum.
- $\gamma \in (0, 1)$ : İndirgeme faktörü (discount factor), gelecekteki ödüllerin ne kadar önemli olduğunu belirler.

Geleneksel Q-Öğrenme,  $Q(s, a)$  değerlerini bir Q-Tablosunda saklar. Ancak, LIP gibi durum uzayının sürekli olduğu veya çok büyük olduğu problemler için bu tablo yöntemi yetersiz kalır.

## 2.2 Derin Q-Ağı (DQN)

DQN, büyük ve sürekli durum uzaylarının üstesinden gelmek için Q-Tablosunu,  $\theta$  ağırlıklarına sahip bir derin yapay sinir ağı (Deep Neural Network - DNN) ile değiştirir. Bu sinir ağı, Q-ağı olarak adlandırılır ve  $Q(s, a; \theta)$  tahmini yapar. Ağa girdi olarak durum  $s$  verilir ve çıktı

olarak mümkün olan her ayırık eylem  $a$  için bir  $Q$ -değeri üretir.

Ağın eğitimi, Bellman Optimalite Denklemi'nin hedef değer ( $y$ ) ile mevcut  $Q$ -tahmini arasındaki farkı (Temporal Difference - TD hatası) minimize eden bir kayıp fonksiyonuyla ( $L$ ) yapılır. Her bir geçiş ( $s, a, r, s'$ ) için hedef  $y$  değeri, hedef ağ ( $\theta^-$  ağırlıklarına sahip) kullanılarak hesaplanır:

$$y = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta^-) \quad (2)$$

Kayıp fonksiyonu genellikle Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error - MSE) olarak tanımlanır ve Stokastik Gradyan İnişi (Stochastic Gradient Descent) ile minimize edilir:

$$L(\theta) = \mathbb{E}_{(s, a, r, s') \sim D} \left[ (y - Q(s, a; \theta))^2 \right] \quad (3)$$

Burada:

- $Q(s, a; \theta)$ : Ana Q-ağının tahmini.
- $Q(s', a'; \theta^-)$ : Hedef Q-ağının tahmini.
- $D$ : Deneyim Tekrarı (Experience Replay arabelleği).

## 2.3 DQN'in Stabilizasyon Mekanizmaları

DQN, öğrenme sürecini stabilize etmek için Q-Öğrenme'ye ek olarak iki temel mekanizma kullanır:

1. Deneyim Tekrarı (Experience Replay): Ajanın ortamdan topladığı geçişler ( $s, a, r, s'$ ) bir bellek arabelleği ( $D$ ) içinde depolanır. Eğitim sırasında bu arabellekten rastgele mini-gruplar (mini-batches) çekilerek ağ güncellenir. Bu, ardışık geçişler arasındaki korelasyonu azaltır ve verimliliği artırır.

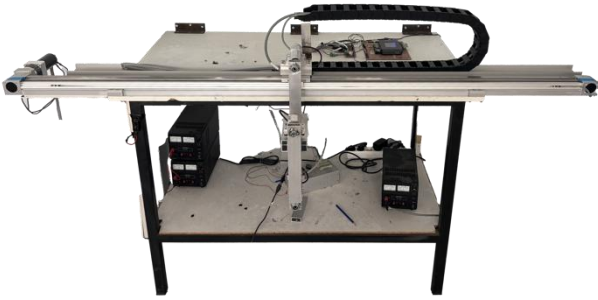
2. Sabit Hedef Ağlar (Fixed Q-Targets): Hedef değer  $y$ 'yi hesaplamak için kullanılan  $Q(s', a'; \theta^-)$  tahmininde, ayrı bir Hedef Ağ  $\theta^-$  kullanılır. Bu ağ, ana  $Q$ -ağının kopyasıdır, ancak ağırlıkları ( $\theta$ ) çok daha yavaş güncellenir (örneğin, belirli bir adım sayısından sonra veya her adımda çok küçük bir katsayıyla çarpılarak). Hedefin sabit tutulması, Bellman denkleminin sol ve sağ tarafındaki tahmin ediciler arasındaki sürekli dalgalanmayı önleyerek öğrenmeyi stabilize eder.

Bu yapının uygulanmasıyla, ajanımız başlangıçta rasgele bir politika izlerken (epsilon-greedy stratejisi ile keşfetme ve kullanma dengesi),

zamanla sarkaç için optimal salınım ve dengeleme eylemlerini öğrenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmamızda geliştirilen DRL temelli kontrolcünün performansı, Balıkesir Üniversitesi İleri Robotik Laboratuvarı'nda yer almakta olan doğrusal ters sarkacın modellenmesiyle elde edilen simülasyon ortamı ve adı geçen sarkaç üzerinde test edilmiştir. Deney düzeneği olarak kullanılan, doğrusal bir kızak üzerinde bir araba ve arabaya bağlı bir sarkaçtan oluşan tasarlanmış ve üretilmiş ters sarkaç mekanizması Şekil 2'de gösterilmiştir. Mekanizma üç dönme ve bir doğrusal eksene sahiptir. Bu çalışmada yalnızca bir dönme ekseninin kaldırma ve dengelenmesi hedeflediğinden iki dönme eksenini mekanik olarak sabitlenmiştir.



Şekil 2: Doğrusal ters sarkaç sistemi.

Doğrusal eksen olarak 1800 mm stroklu Festo EGC-TB-KF serisi doğrusal kızak kullanılmıştır. Kızak üzerindeki araba, dişli kayış ve kasnak mekanizması yoluyla redüktörlü 200 Watt, 24V DC'lik bir Maxon RE50 motor kullanılarak eksen boyunca hareket ettirilir. Araba konumu ve sarkaç açısı sırasıyla 0,025 mm çözünürlüğe sahip doğrusal artımlı kodlayıcı ve 3,142e-4 radyan (0,018 derece) çözünürlüğe sahip döner artımlı kodlayıcı kullanılarak ölçülmüştür.

Gömülü kontrolcü olarak ARM Cortex A9 işlemci ve Xilinx Zynq 7 Serisi FPGA'ya sahip myRIO platformu kullanılmıştır. Kodlayıcı sinyalleri, arabanın ve sarkacın konumlarını ölçmek için hat sürücü devresi aracılığıyla myRIO platformunun kodlayıcı arayüz modülüne beslenir. Kontrolcünün amacı, sarkacı aşağıya denge noktasından yukarıya denge noktasına getirmek ve orada dengelemektir. Derin Pekiştirmeli Öğrenme kullanılarak eğitilmiş sinir ağının çıktısı hesaplanarak alınan kontrol sinyalleri, PWM üretici tarafından PWM

sinyallerine dönüştürülür ve Pololu 24v23 CS PWM motor sürücüsü (24V, 500W) aracılığıyla motora uygulanır. myRIO(Reconfigurable Input/Output) gömülü platformu LabVIEW grafiksel programlama yazılımı kullanılarak programlanmıştır. Bilgisayar yalnızca sistem parametrelerini gerçek zamanlı olarak izlemek ve kaydetmek için kullanılmıştır.

#### 3.1 Simülasyon Ortamı

Derin Pekiştirmeli Öğrenme temelli uygulamalar son yıllarda birçok alanda başarılı sonuçlar elde etmesinin yanı sıra robot kontrolünde kullanımı giderek artmaktadır. Bunun yanında eğitimin gerçek sistem üzerinde yapılması durumunda sistemin çalışma limitlerini aşması gibi güvenlik sorunları oluşturma ihtimali taşımaktadır. Bu sorunu aşmak için genel olarak kullanılan bir yol, eğitimin simülasyon ortamında gerçekleştirilip kontrolcünün gerçek sisteme aktarılmasıdır[12].

Önceki bölümde tanıtılan ters sarkaç sisteminin matematik modeli Euler-Lagrange denklemleri kullanılarak çıkarılmış ve simülasyon ortamında kontrolcü eğitimi için kullanılmıştır. Elde edilen matematik modeli Denklem 4 ve 5'te görülebilir.

$$F_{motor} = A \cdot V - B \cdot \dot{X} - C \cdot \ddot{X} \quad (4)$$

$$A = \frac{N \cdot \eta \cdot K_t}{R_a \cdot r^2} \quad (5)$$

$$B = \frac{N^2 \cdot \eta \cdot K_t \cdot K_b}{R_a \cdot r^2}$$

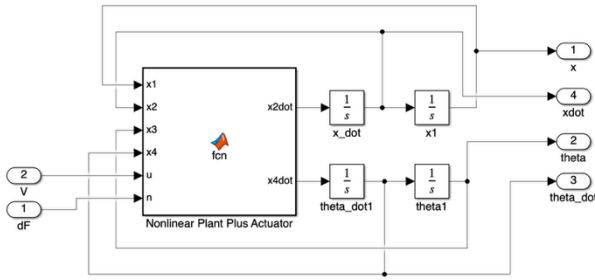
$$C = \frac{N^2 \cdot \eta \cdot J_m}{r^2}$$

Eşitliklerin çıkarılmasında kullanılan, deney sisteminin fiziksel parametreleri Tablo 1'de yer almaktadır.

Elde edilen matematik modeli MATLAB Simulink ortamında oluşturulan sanal deney düzeneğine konularak simülasyon ortamı tamamlanmıştır. Sarkacın giriş-çıkış bağlantıları Şekil 3'te görülmektedir.

**Tablo 1:** Sarkacın fiziksel parametreleri

Simge	Açıklama	Değer
<b>m</b>	Sarkacın kütlesi	2.09838 kg
<b>l</b>	Ağırlık merkezi uzaklığı	0.25535 m
<b>I</b>	Sarkacın eylemsizlik momenti	0.05052 kg.m <sup>2</sup>
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi	9.81 m/s <sup>2</sup>
<b>M</b>	Aracın kütlesi	1.70411 kg
<b>r</b>	Kasnak yarıçapı	0.012415 m
<b>N</b>	Dişli oranı	8
<b>η</b>	DC motor verimliliği	0.90
<b>K<sub>t</sub></b>	Tork sabiti	0.0385 N.m/A
<b>K<sub>b</sub></b>	Ters elektromotor motor kuvveti	0.0385 V.s/rad
<b>R<sub>a</sub></b>	Armatür direnci	0.103 ohm
<b>J<sub>m</sub></b>	Motorun eylemsizlik momenti	6.03e-5 kg.m <sup>2</sup>
<b>F<sub>fp</sub></b>	Sarkacın viskoz sürtünme sabiti	0
<b>F<sub>fc</sub></b>	Aracın viskoz sürtünme sabiti	72.49 N.s/m

**Şekil 3:** Ters sarkacın simülasyon modeli.

### 3.2 Markov Karar Süreci (MDP) Formülasyonu

Kontrol problemi, bir Markov Karar Süreci (MDP) olarak modellenmiştir. Bu yapı; durum uzayı ( $\mathcal{S}$ ), eylem uzayı ( $\mathcal{A}$ ) ve ödül fonksiyonu ( $\mathcal{R}$ ) bileşenlerinden oluşmaktadır.

Gözlem Uzayı (Observation Space): Ajan, her zaman adımında ( $t$ ), sistemin dinamiklerini karakterize eden 5 boyutlu bir durum vektörünü ( $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \sin(\boldsymbol{\theta}), \cos \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}$ ) gözlemlemektedir.

Eylem Uzayı (Action Space): Kontrolcü, sürekli voltaj sinyali yerine donanım kısıtlarına uygun olarak ayrıklaştırılmış bir eylem uzayında çalışmaktadır:

$$\mathcal{A} = \{-24V, 0V, +24V\}$$

Ödül Fonksiyonu (Reward Function): Sistemin dikey denge konumunu koruması ve enerji verimliliğini sağlama amacıyla, karesel maliyet

fonksiyonuna dayalı bir ödül yapısı kurgulanmıştır. Her zaman adımında elde edilen anlık ödül  $r_t$ , Denklem (6)'da tanımlanmıştır:

$$r_t = -(\theta_t^2 + 0.1\dot{\theta}_t^2 + 0.001u_{t-1}^2) \quad (6)$$

Burada  $\theta_t$  sarkacın dikey ekseninden sapma açısını (radyan),  $\dot{\theta}_t$  açısal hızı (radyan/saniye) ve  $u_{t-1}$  bir önceki adımda uygulanan kontrol eylemini (voltaj) temsil etmektedir.

Denklem (1)'deki katsayılar, optimizasyon hedeflerinin önceliklerini belirlemektedir:

$\theta_t^2$  terimi, sarkacın dik konumdan ( $0$  radyan) sapmasını en aza indirmeyi hedefler.

$0.1\dot{\theta}_t^2$  terimi, hızlı salınımları engelleyerek sistemin kararlı (smooth) bir şekilde dengeye gelmesini sağlar.

$0.001u_{t-1}^2$  terimi ise kontrol eforunu cezalandırarak enerji tüketimini sınırlar ve aktüatör üzerindeki elektriksel stresi azaltır.

### 3.3 Derin Q-Ağı (DQN) Mimarisi ve Ajan Tasarımı

Sistemde ayrık eylem uzayı tercih edilmesi nedeniyle, değer tabanlı (value-based) bir yöntem olan Derin Q-Ağı (DQN) algoritması tercih edilmiştir. DQN ajanı, durum-eylem değer fonksiyonunu ( $Q(s, a)$ ) tahmin etmek için yapay sinir ağlarını kullanır.

Kullanılan derin sinir ağı (Critic Network) mimarisi aşağıdaki katmanlardan oluşmaktadır:

Giriş Katmanı: 5 boyutlu durum vektörünü (Feature Input Layer) alır.

Gizli Katmanlar: Her biri 256 nöron içeren ve Doğrultulmuş Lineer Birim (ReLU) aktivasyon fonksiyonuna sahip iki tam bağlantılı (fully connected) katman kullanılmıştır. Bu derinlik, sistemin karmaşık dinamiklerinin öğrenilmesi için yeterli kapasiteyi sağlamaktadır.

Çıkış Katmanı: Eylem uzayındaki eleman sayısı kadar (3 adet) çıkış nöronu bulunmaktadır. Bu nöronlar, her bir eylem (voltaj seviyesi) için tahmin edilen Q değerlerini üretir.

### 3.4 Eğitim Parametreleri ve Süreci

Eğitim süreci, gerçek sistemin örnekleme zamanına ( $T_s = 0.02$  saniye) sadık kalınarak simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Ajanın keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) dengesini sağlamak amacıyla  $\epsilon$ -greedy stratejisi uygulanmıştır. Başlangıçta yüksek tutulan keşif oranı, eğitim boyunca EpsilonDecay katsayısı ( $5e-5$ ) ile azalarak EpsilonMin (0.1) değerine kadar düşürülmüştür.

Eğitim istikrarını artırmak ve yerel minimumlardan kaçınmak amacıyla Deneyim Tekrarı (Experience Replay) mekanizması kullanılmıştır. Kullanılan temel hiperparametreler Tablo 2'de özetlenmiştir.

**Tablo 2:** DQN ajanı eğitim hiperparametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
Örnekleme Zamanı ( $T_s$ )	0.02 s	Kontrol döngüsü süresi (50 Hz)
Öğrenme Oranı (Learning Rate)	$0.005$ ( $5 \times 10^{-3}$ )	Ağ ağırlıklarının güncelleme hızı
Mini-Batch Boyutu	256	Her eğitim adımında kullanılan örnek sayısı
Tampon Bellek (Buffer) Boyutu	$10^5$	Experience Replay hafıza kapasitesi
Hedef Yumuşatma Faktörü	0.005	Target Network güncelleme katsayısı
Maksimum Epizot Sayısı	1000	Eğitimin üst sınırı
Adım Sınırı (Epizot Başına)	500	Bir epizottaki maksimum adım sayısı

Eğitim süreci, ajanın performansının belirlenen bir eşik değere (Evaluation Statistic: -350) ulaşması durumunda otomatik olarak sonlandırılacak şekilde kurgulanmıştır. Ayrıca her 10 epizotta bir, keşif mekanizması kapatılarak (greedy policy) ajanın performansı değerlendirilmiştir.

## 4. BULGULAR

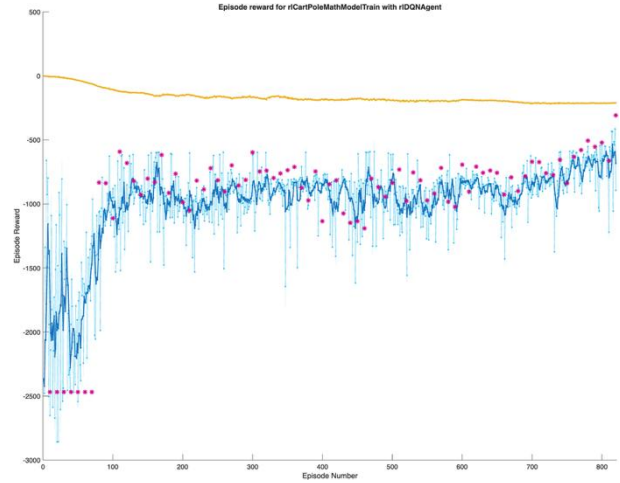
Bu bölümde, önerilen Derin Q-Ağı (DQN) tabanlı kontrolcünün eğitim performansı ve eğitilen ajanın simülasyon ortamındaki zaman düzlemi cevapları sunulmuştur.

### 4.1 Eğitim Performansı

Ajanın öğrenme süreci boyunca elde ettiği epizot başı ödül (episode reward) değişimi Şekil 4'te

gösterilmiştir. Eğitim başlangıcında (ilk 50 epizot), ajanın rastgele eylemler seçmesi (keşif evresi) nedeniyle kümülatif ödül ortalama -2500 seviyelerinde seyretmiştir. Ancak, deneyim tekrarı (experience replay) hafızasının dolması ve ağ ağırlıklarının güncellenmeye başlamasıyla birlikte, yaklaşık 80. epizottan itibaren performansta belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Ödül fonksiyonundaki artış trendi, ajanın sarkaç dengesini koruma stratejisini öğrendiğini göstermektedir. Yaklaşık 400. epizottan sonra ödül değeri -600 ile -500 bandında kararlı bir hal (steady-state) almıştır. Ortalama ödül eğrisindeki (sarı çizgi) istikrarlı yükseliş, eğitimin yakınsadığını (convergence) doğrulamaktadır.



**Şekil 4:** Eğitim sonuçları.

### 4.2 Zaman Cevabı ve Kontrolcü Başarımı

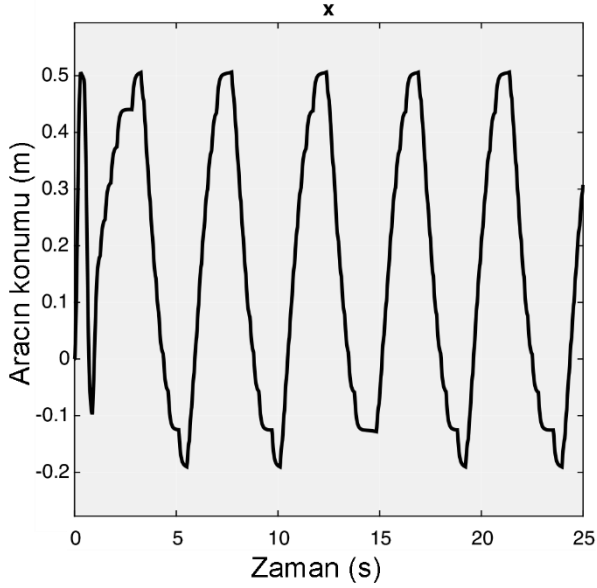
Eğitilmiş ajanın performansı, sistemin başlangıç koşullarından dikey denge noktasına ulaşma yeteneği ile test edilmiştir. Şekil 5'te aracın konumunun, Şekil 6'da sarkacın açısının ve Şekil 7'de kontrol sinyalinin zamanla değişimi verilmiştir.

Açısal Konum ( $\theta$ ): Sarkaç, simülasyonun başlamasıyla birlikte hızla yukarı kaldırılmış ve yaklaşık 2. saniyeden itibaren dikey denge noktası olan  $2\pi$  ( $\approx 6.28$  rad) konumuna kilitlemiştir. Denge noktasında çok küçük genlikli salınım görülse de sistem devrilmeden kararlılığını korumuştur.

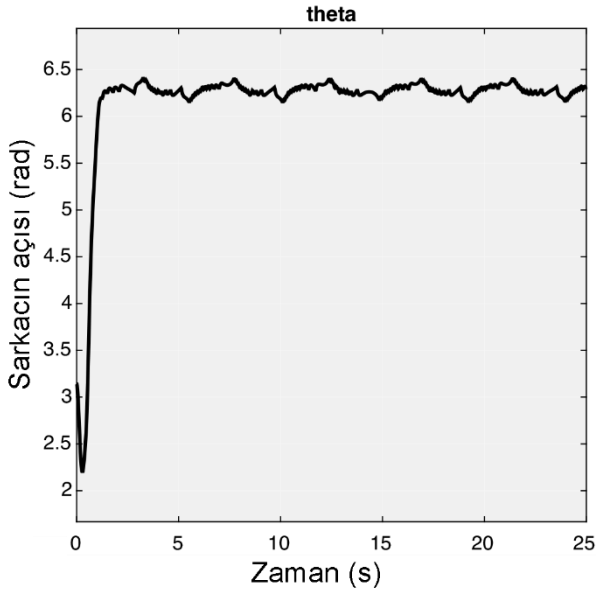
Araba Konumu ( $x$ ): Sarkaç dengede tutulurken, araba konumu  $x$ -ekseni üzerinde belirli bir aralıkta ( $-0.2m$  ile  $+0.5m$  arasında) salınım gerçekleştirmiştir. Bu durum, kısıtlı bir ray

uzunluğunda sarkacı dengede tutmak için ajanın sürekli olarak arabayı hareket ettirme gereksiniminden kaynaklanmaktadır.

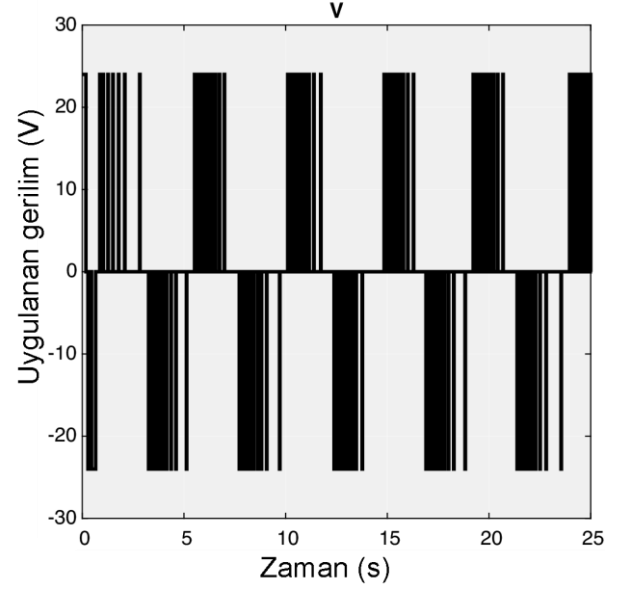
Kontrol Sinyali ( $V$ ): Sisteme uygulanan voltaj grafiği ( $V$ ) incelendiğinde, kontrolcünün beklendiği üzere ayırık eylem uzayını ( $\{-24V, 0V, +24V\}$ ) kullandığı görülmektedir. Kontrol sinyali, dengeyi korumak için yüksek frekanslı anahtarlamalar (bang-bang kontrol benzeri davranış) sergilemiştir.



Şekil 5: Aracın konumu.



Şekil 6: Sarkacın açısı.



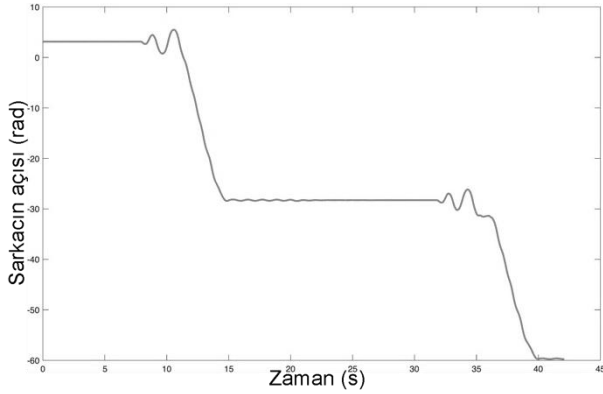
Şekil 7: Araca uygulanan gerilim.

#### 4.3 Gerçek Zamanlı Deney Sonuçları ve Donanım Kısıtları

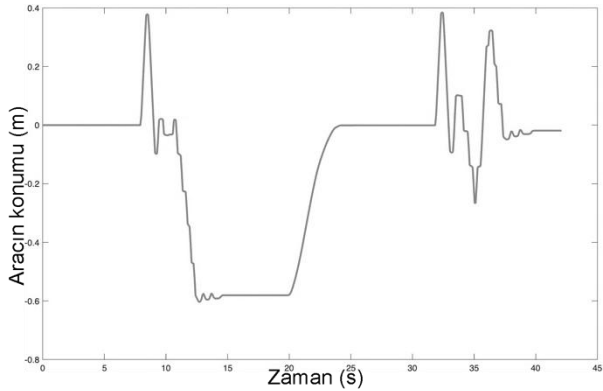
Simülasyon ortamında 5 boyutlu durum vektörü ve 256x256 nöronlu iki gizli katmana sahip DQN mimarisi, sarkacın doğrusal olmayan dinamiklerini öğrenmede yüksek başarı göstermiştir. Ancak bu mimari, gerçek deney düzeneğinde kullanılan myRIO gömülü işlemcisi (ARM Cortex A9) üzerinde ciddi bir hesaplama darboğazı yaratmıştır. 256 nöronlu tam bağlantılı (fully-connected) katmanların gerektirdiği matris çarpımları ve aktivasyon fonksiyonu hesaplamaları, donanımın işlem kapasitesini zorlayarak kontrol döngüsünün hedeflenen 20 ms yerine 80 ms'de tamamlanmasına neden olmuştur. Bu örnekleme gecikmesinin (latency) sistem üzerindeki etkileri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

Kontrol teorisi perspektifinden bakıldığında, örnekleme periyodunun 20 ms'den 80 ms'ye çıkması, sisteme yaklaşık 60 ms'lik ek bir ölü zaman (dead-time) girmesi anlamına gelmektedir. Doğrusal ters sarkaç gibi açık çevrim kutupları sağ yarı düzlemde olan (open-loop unstable) ve zaman sabiti küçük olan sistemlerde, bu ölü zaman kapalı çevrim sisteminin faz payını (phase margin) kritik seviyede azaltmaktadır. Şekil 8'de görülen kararsızlık; kontrolcünün ürettiği düzeltme eyleminin, sarkacın düşme ivmesine kıyasla fazla gecikmesinden (phase lag) ve sistemin bant genişliğinin 12.5 Hz'e düşerek sarkacın doğal frekansını bastıramamasından kaynaklanmaktadır.

Sarkaç başlangıç konumundan serbest bırakıldığında, kontrolcü gecikmeli tepki verdiği için sarkacı yakalamakta başarısız olmuştur. Grafik incelendiğinde, açının ( $\theta$ ) 5 ile 10. saniyeler arasında kontrolsüz bir şekilde değiştiği ve yaklaşık 12. saniyeden sonra sistemin kararsızlığa giderek -30 radyan seviyelerine kadar sürekli dönme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Simülasyondaki kararlı denge noktasına kilitlenme davranışı gerçekleşmemiştir.



Şekil 8: Gerçek sistemde sarkaç hareketi.



Şekil 9: Gerçek sistemde araç hareketi.

Kontrolcünün gecikmeli ürettiği yüksek genlikli eylemler, arabanın ray üzerinde savrulmasına neden olmuştur. Özellikle  $t = 12$  sn ile  $t = 20$  sn aralığında arabanın  $-0.6$  m konumunda satüre olduğu (kontrolcü eğitilirken koruma amaçlı olarak verilen ray sınırına takıldığı) gözlemlenmiştir. 80 ms'lik gecikme, sarkacın düşüşünü telafi etmek için gereken ani tepkiyi engellemiş, araba sarkaçtan daha yavaş hareket ettiği için sistem kontrolden çıkmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, doğrusal ters sarkaç probleminin çözümü için derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir

yaklaşım sunulmuş ve yöntem hem simülasyon hem de gerçek sistem üzerinde test edilmiştir.

Matematiksel model üzerinde eğitilen ayrık eylem uzayına sahip DQN ajanı, sürekli eylem uzayına sahip yöntemlere (örn. DDPG) kıyasla daha basit bir yapıda olmasına rağmen sarkacı dikey denge noktasına getirme ve orada tutma görevini başarıyla yerine getirmiştir. Ödül fonksiyonunda yapılan enerji cezalandırması ve kararlılık terimleri, ajanın optimuma yakın bir politika öğrenmesini sağlamıştır. Ancak, önerilen yöntemin gömülü sistemler veya sınırlı işlem gücüne sahip donanımlar üzerindeki uygulanabilirliği, hesaplama maliyeti nedeniyle sınırlıdır. Deneylerde görülen 80 ms'ye ulaşan kontrol döngüsü süresi, ters sarkaç sisteminin kontrolü için maksimum kabul edilebilir süre olarak varsayılan 20 ms'nin çok üzerindedir ve bu sistemin kararsızlığa sürüklenmesine neden olmuştur.

Gelecek çalışmalarda, mevcut donanım kısıtlarını aşmak ve kontrol döngüsü süresini 20 ms'nin altına çekmek için 256 nöronlu tam bağlantılı katmanların nöron sayısının hesaplama hızını en az dört katına çıkaracak şekilde azaltılması ve ağ mimarisinin eğitildikten sonra gereksiz bağlantılarının temizlendiği 'Model Budama' (Model Pruning) tekniklerinin kullanılması hedeflenmektedir. Nöron sayılarının her katmanda azaltılması gerçek sistem üzerindeki gömülü kontrol arayüzü platformunda yapılan hesaplamaları azaltarak döngü süresini kabul edilebilir seviyeye çekebilecektir. Bu çalışma, DRL algoritmalarının gerçek zamanlı kontrol sistemlerine entegrasyonunda donanım-yazılım uyumunun önemini vurgulayan bir örnek teşkil etmektedir.

**Yazar Katkıları:** Bu çalışma kapsamında; problemin tanımlanması, matematiksel modelleme ve ödül fonksiyonunun türetilmesi süreçleri her iki yazar tarafından ortaklaşa yürütülmüştür. Arş. Gör. Erman Köybaşı, derin pekiştirmeli öğrenme algoritmasının (DQN) kodlanması, simülasyon testlerinin gerçekleştirilmesi ve gerçek zamanlı deneylerin gömülü platform (myRIO) üzerinde uygulanması görevlerini üstlenmiştir. Prof. Dr. Sabri Bıçakçı, çalışmanın kavramsal çerçevesinin oluşturulması ve doktora tezi kapsamında yürütülen bu bilimsel araştırmanın akademik danışmanlığı ile denetlenmesi süreçlerini

yönetmiştir. Yazarlar, makalenin son halini birlikte gözden geçirmiş ve onaylamıştır.

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

## 6. KAYNAKLAR

- [1] R. Özalp, N. K. Varol, B. Taşci, and A. Uçar, "A Review of Deep Reinforcement Learning Algorithms and Comparative Results on Inverted Pendulum System," in *Machine Learning Paradigms: Advances in Deep Learning-based Technological Applications*, 1st ed., Springer, 2020, 237–256.
- [2] X. Bajrami, A. Pajaziti, R. Likaj, A. Shala, R. Berisha, and M. Bruqi, "Control theory application for swing up and stabilisation of rotating inverted pendulum," *Symmetry*, 13(8), p. 1491, 2021.
- [3] T. N. Ho and V.-D.-H. Nguyen, "Model-free swing-up and balance control of a rotary inverted pendulum using the TD3 algorithm: Simulation and experiments," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 15(1), 19316–19323, 2025.
- [4] D. Ju, J. Lee, and Y. S. Lee, "Sim-to-real reinforcement learning for a rotary double-inverted pendulum based on a mathematical model," *Mathematics*, 13(12), 1996, 2025.
- [5] T. Glück, A. Eder, and A. Kugi, "Swing-up control of a triple pendulum on a cart with experimental validation," *Automatica*, 49(3), 801–808, 2013.
- [6] R. Liu, F. Nageotte, P. Zanne, M. De Mathelin, and B. Dresp-Langley, "Deep reinforcement learning for the control of robotic manipulation: A focussed mini-review," *Robotics*, 10(1), 22, Jan. 2021.
- [7] J. Terven, "Deep reinforcement learning: A chronological overview and methods," *AI*, 6(3), 46, Feb. 2025.
- [8] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, and M. Riedmiller, "Playing Atari with deep reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:1312.5602*, 2013.
- [9] S. Israilov, L. Fu, J. Sánchez-Rodríguez, F. Fusco, G. Allibert, C. Raufaste, and M. Argentina, "Reinforcement learning approach to control an inverted pendulum: A general framework for educational purposes," *PLoS One*, 18(2), e0280071, 2023.
- [10] R. S. Sutton ve A. Barto, "Reinforcement learning: an introduction, Second edition. içinde Adaptive computation and machine learning", Cambridge, Massachusetts London, England: The MIT Press, 2020.
- [11] C. J. Watkins and P. Dayan, "Q-learning," *Mach. Learn.*, 8(3), 279–292, 1992.
- [12] H. Ju, R. Juan, R. Gomez, K. Nakamura, and G. Li, "Transferring policy of deep reinforcement learning from simulation to reality for robotics," *Nat. Mach. Intell.*, 4(12), 1077–1087, 2022.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Rayleigh Dalgası Dispersiyon Eğrisinin Elde Edilmesinde Özilişki Hesaplama Yöntemlerinin Farklı Geometrik Dizilimlerle Karşılaştırılması

## *Comparison of Spatial Autocorrelation Calculation Methods with Different Geometric Arrangements for Rayleigh Wave Dispersion Curve Estimation*

Aydın Büyüksaraç<sup>1,\*</sup>, Onur Eyisüren<sup>2</sup>, Özcan Bektaş<sup>3</sup>, Eren Pamuk<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, Çanakkale, Türkiye.

<sup>2</sup>Çanakkale Belediyesi, Çanakkale, Türkiye.

<sup>3</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Sivas, Türkiye.

<sup>4</sup>Maden Tetkik Arama, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 03.01.2026

Kabul / Accepted: 31.03.2026

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Aydın Büyüksaraç [absarac@comu.edu.tr](mailto:absarac@comu.edu.tr)

**ÖZ:** Geometrik dizimli ortam gürültüsü ölçümü, yüzeye yakın jeolojik birimlerin dinamik özelliklerini belirlemede etkili bir yöntem olup, istasyon kayıtlarının birleştirilmesi sayesinde sinyal-gürültü oranını artırarak kentsel alanlarda yapılacak çalışmalarda önemli avantajlar sağlar. Böylece tek istasyonla tespit edilemeyen dalga fazları da gözlemlenebilir. Mikrotremor dizilim ölçümleri, kesme dalgası hızının (Vs) derinlikle değişimini temsil eden bir boyutlu hız profillerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla farklı dizilim geometrileri ve çeşitli pasif yüzey dalgası yöntemleri giderek daha fazla tercih edilmektedir. Zemin tabakalarının yatay olduğu ve ortam gürültüsünün ağırlıklı olarak yüzey dalgalarından oluştuğu varsayımı altında, dizilim ölçümleri yüzey dalgalarına ait dispersiyon eğrilerinin çıkarılmasını sağlar. Çözünürlük ve aliasing sınırları dikkate alınarak seçilen otokorelasyon eğrisinden uygun dispersiyon eğrisi belirlenir ve bu eğri sığ kesme dalgası hızlarının ters çözümü için kullanılır. Yöntem temel olarak dispersiyon eğrilerinin ters çözümüne ve uzaysal özilişki yaklaşımına dayanmaktadır. Bu çalışmanın odak noktası, uygulamada kritik öneme sahip dizilim geometrisinin performansının değerlendirilmesidir. Aynı lokasyonda ve aynı açılım mesafelerinde kurulan beş farklı dizilim tipi karşılaştırılmış, etki derinliği, duyarlılık ve uygulama kolaylığı açısından ortaya çıkan farklar tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar genel olarak tutarlıdır. Eşkenar üçgen ve artı biçimli dizilimler düşük frekans bilgisini daha iyi yakalarken, daha uzun açılımlar derin birimlere karşılık gelen düşük frekans hız değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Uzaysal özilişki (SPAC), mikrotremor, s-dalgası, dizilim geometrisi, dispersiyon.

**ABSTRACT:** Geometrically arrayed ambient noise measurements are an effective method for determining the dynamic properties of near-surface geological units, and by combining station records, they increase the signal-to-noise ratio, providing significant advantages for studies conducted in urban areas. In this way, wave phases that cannot be detected with a single station can also be observed. Microtremor array measurements are widely used to obtain one-dimensional shear-wave velocity profiles (Vs) representing the variation of shear-wave velocity with depth. For this purpose, different array geometries and various passive surface-wave methods are increasingly preferred. Assuming that soil layers are horizontally stratified and ambient noise is predominantly composed of surface waves, array measurements enable the extraction of surface-wave dispersion curves. Taking into account resolution and aliasing limits, a suitable dispersion curve is selected from the autocorrelation curve, and this curve is used for inversion of shallow shear-wave

velocities. The method is essentially based on the inversion of dispersion curves and the spatial autocorrelation approach. The focus of this study is to evaluate the performance of array geometry, which is critically important in practice. Five different array types established at the same location and with the same aperture distances were compared, and the resulting differences in terms of investigation depth, sensitivity, and ease of application were discussed. The obtained results are generally consistent. Equilateral-triangle and cross-shaped arrays capture low-frequency information better, while longer apertures provide velocity values at low frequencies corresponding to deeper units.

**Keywords:** Spatial autocorrelation (SPAC), microtremor, s-wave, array geometry, dispersion.

## 1. GİRİŞ

Mikrotremor, trafik ve endüstriyel gürültüler ile deniz kıyısı ve meteorolojik etkiler nedeniyle oluşan doğal yer titreşimleridir. Dalga enerjisi ağırlıklı olarak yüzey dalgaları olarak yayılır. Rayleigh dalgaları düşey ve Love dalgaları yatay sismik algılayıcılarla kaydedilebilir. Ancak uygulamada çoğunlukla düşey algılayıcılarla kaydedilen Rayleigh dalgaları kullanılmaktadır [1]. Son yıllarda sismik ortam gürültüsünü veya mikrotremorları kullanan pasif yüzey dalgası yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Yöntemin tarihsel gelişimine bakıldığında ilk olarak Referans [2] ortam gürültüsünde kodlanan yüzey dalgalarını incelemiş ve "SPatial AutoCorelation" (SPAC) Türkçe karşılığı olarak Uzaysal Özilişki teorisini sunmuştur. Dairesel bir dizilime sahip uygulamaları içeren ve Referanslar [2], [3] tarafından geliştirilen bu yöntemde, farklı yönlerden gelen izotropik dalgaların mikrotremorları oluşturduğu ve mikrotremor kayıtlarından ortamın hız yapısının belirlenebileceği ortaya konulmuştur. Bundan sonra birden çok sismometrenin aynı anda kayıt almasına dayalı yöntemler, mikrotremor dizilim ölçümleri adı altında gruplandırılmıştır. Referans [4], kayma dalgası hızı ( $V_s$ -m/s) yapısının derinlikle değişimini tahmin etmek için uzaysal özilişki (SPAC) yöntemini temel alan geniş ölçekli bir mikrotremor dizilim ölçüm yöntemi geliştirmiştir. SPAC yöntemi, tutarlı sonuçları, uygulama kolaylığı ve hesaplama verimliliği nedeniyle ortam gürültüsünden yüzey dalgası faz hızlarını elde etmek için geliştirilen birçok farklı yöntem arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir. Birçok araştırmacı SPAC yönteminin farklı uygulamalarını açıklayan birçok çalışma yapmış, bu kapsamda, yeraltını birkaç metreden birkaç kilometreye kadar derinlik ölçeklerinde araştırmış ve değişik dizilim geometrileri de kullanmışlardır [5]-[14].

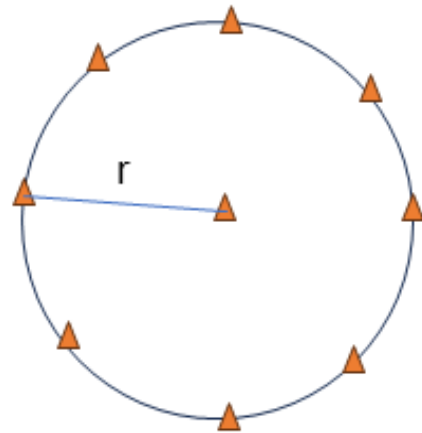
Ortam gürültüsünden  $V_s$  yapılarını tahmin etmek için birçok farklı veri toplama ve veri işlem yöntemi vardır. Ortam gürültüsünün kaydedilen düşey bileşeni çoğunlukla Rayleigh dalgalarından oluşurken, yatay bileşenler Rayleigh ve Love dalgalarından oluşur. Ölçümler sırasında çeşitli veri işlem yöntemlerinin uygulanabileceği dizilim konfigürasyonlarını seçmek önemlidir. Farklı yöntemler arasında, bu çalışmada da SPAC yöntemi tercih edilmiştir. Uzaysal özilişki (SPAC) terimi, eşlenen bir değişkende sistematik uzaysal değişimin varlığını ifade eder. Mikrotremorları oluşturan yüzey dalgalarının yayılma yönlerini ve dolayısıyla faz hızlarını kaynak belirli olmadığından belirlemek zordur. Bu nedenle Referans [2], bir dizi sensörle elde edilen mikrotremor verilerinin istatistiksel olarak analiz edildiği ve faz hızının elde edilmesini sağlayan SPAC yöntemini önermiştir. SPAC, çapraz korelasyonun frekans alanındaki otokorelasyona bölünmesinin gerçek kısmı olarak düşünülebilir [15]. Bitişik gözlemlerin benzer veri değerlerine sahip olduğu durumlar pozitif, bitişik gözlemlerin çok zıt değerlere sahip olma eğiliminde olduğu durumlarda, negatif uzaysal özilişki ortaya çıkar.

Uzaysal özilişki dizilim yöntemlerinde kullanılan ortam sismik gürültüsü veya mikrotremor gözlemleri, yaklaşık 0,1 Hz'den birkaç on Hz'e kadar geniş bir frekans aralığındaki yüzey dalgalarından oluşur. Dalga boyları ve dolayısıyla bu tür yüzey dalgalarının derinlik hassasiyeti, sahanın kesme dalga hız ( $V_s$ ) modelinin sığ derinliklerden birkaç kilometreye kadar belirlenmesine olanak tanır. Enerji kaynağı olarak yalnızca ortam gürültüsünü kullanan pasif bir sismik yöntemdir. SPAC ya çok yönlü gürültü yayılımını ya da alıcı dizilim geometrisinin izotropik olmasını gerektirir. Doğrusal dizilim gibi

asimetrik dizilimler, gürültü yayılımının güçlü yönlülüğe sahip olduğu yerlerde çalışmayabilir. Uygulamada genellikle faz hızı dağılım eğrisini ve dolayısıyla saha için kesme dalga hızı ( $V_s$ ) derinlik profilini tahmin etmek için az sayıda sismometre ile bir 2B sismik dizilim kullanılır. Bunun yanında dağılım eğrisini tahmin etmek için çok sayıda yöntem kullanılmaktadır. SPAC, çok yönlülüğü ve az sayıda cihaz gereksinimi nedeniyle yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir. Mevcut yöntem uygulamaları, iki istasyonlu diziler, L şeklinde çok istasyonlu diziler, üçgen ve dairesel diziler dahil olmak üzere dizilim tiplerini tanımlamıştır. Çapları birkaç metreden birkaç km'ye kadar olan dizi boyutları, şehir merkezindeki kentsel ortamlardan kırsal alanlara kadar çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmaktadır [11]. Yöntemin temel gerekliliklerinden biri, bir azimut aralığı boyunca dalga yayılımının ortalamasını alabilme yeteneğidir. Bu durum dalga kaynaklarından birinin veya her ikisinin azimutta geniş bir şekilde dağıtılmasıyla ve dalga alanını bir azimut aralığı üzerinden örnekleyen iki boyutlu bir dizilimin kullanılmasıyla başarılabilir. Yöntemin çeşitli tipleri, seyrek dizilimlerden az örneklenmiş verilere, enerjinin çoklu mod yayılımının karmaşıklığına ve dizilim geometrisinin ideal bir düzenli dizilimden saptığı hassas tahmin probleminde uygulanabilirliğini genişletir [14]. Seyrek iç içe geçmiş üçgen dizilimlerin genellikle yeterli olduğu ve yüksek yoğunluklu dairesel dizilimlerin kullanımının rutin uygulamalarda uygun maliyetli olduğu denenerken bulunmuştur. Pasif sismik dizilimler, ortalama kesme dalga hızını, 30 m ( $V_{s30}$ ) ve daha derine kadar karakterize ederken ilk tercih edilen yöntem olmasının yanı sıra yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW) gibi aktif sismik yöntemlerin tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılması oldukça yararlı sonuçlar doğurmaktadır. Ters çözüm metodolojisinin kullanılması, yalnızca S dalgası hız profilinin değil aynı zamanda katman kalınlığı ve hız açısından parametre belirsizliklerinin de tahmin edilmesine olanak tanır. SPAC yönteminin yatay/dikey parçacık hareketinin spektral oran analizi ile birleştirilmesi, genellikle daha düşük frekanslı verilerin kullanılmasına olanak tanır ve bunun sonucunda tek başına SPAC ile mümkün olandan daha derin katmanların çözünürlüğü sağlanır. Hasar vermeden uygulanabilirliği, kablo vb. gibi bağlantı gerektirmemesi, taşıma kolaylığı gibi

unsurlar göz önüne alındığında, SPAC yöntemi ve onun değiştirilmiş çeşitli tipleri, zemin araştırmaları kapsamında önemli bir rol oynamaktadır [1]. Son yıllarda Türkiye'de de yaygın olarak uygulanmaya başlanan SPAC yöntemi, özellikle derin  $V_s$  değişimini belirlemede oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Son yıllarda yapılan uygulamalar içinde örneğin Eskişehir Havzası'nda mikrotremor (HVSr ve SPAC), sondaj ve sismik yansıma verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle anakaya derinliği ve S-dalga hız yapısı belirlenmiş, maksimum ~1000 m havza derinliği ve düşük hızlı örtü ile sert birimler arasındaki güçlü hız kontrastının deprem büyütmeleri ve mikro-bölgeleme çalışmaları açısından kritik olduğu ortaya konmuştur [16]. Ayrıca Eskişehir havzasında kalın gevşek katman kalınlığının havza kaynaklı yerel zemin etkilerinin sismik risk ve deprem tehlikesi değerlendirmelerinde kritik rol oynadığı gösterilmiştir [17],[18]. Referans [19] tarafından Ankara Çayı havzasında 18 noktada uygulanan SPAC yöntemi, Kuvaterner çökel birimin beklenenden daha kalın ve değişken geometri olduğu ortaya koyarak, bu tür alanlarda sismik değerlendirmeler için  $V_{s30}$  parametresinin tek başına yeterli olmayabileceğini göstermiştir.

SPAC yönteminde temel olan, belirli bir yarıçap mesafesindeki iki sensörden gelen dikey bileşen sinyali için çapraz korelasyon veya çapraz spektrumun hesaplanması ve ardından çapraz spektrumların dairesel bir dizi etrafında ortalamasının alınmasıdır (Şekil 1).



Şekil 1: Dairesel SPAC ölçüm düzeni. r: Yarıçap, ▲: Sismometre.

Çapraz spektrumun, iki sinyalin güç spektrumlarının çarpımının kareköküne bölünmesi, karmaşık tutarlılığı ortaya koyar. Azimutta dağıtılan birden fazla istasyon çifti için karmaşık davranışların ortalaması, uzaysal olarak ortalama uyumluluğu yani uzaysal öz ilişkiyi verir. SPAC, yarıçap ( $r$ ) ayırımına sahip her bir sensör çifti arasındaki çapraz korelasyonları veya karmaşık uyumlulukları hesaplar ve bunları bir daire etrafında ortalamasını alır. Merkezde bir ve daire üzerinde üç sensörün kullanılması genellikle minimum olarak kabul edilir. Daha fazla sensör, bir sensörde veya sensörün yerleşiminde sorun olması durumunda yedeklilik sağlar. Mikrotremor yüzey dalgası enerjisi kaynaklarının yönlü olduğu durumlarda, azimut ortalama işlemi çevre üzerinde tek sayıda sensör (örneğin 5, 7 veya 9 sensör) kullanılarak geliştirilir [20]. Ölçüm dizilimi için algılayıcıları geometrik bir daire etrafında toplamak kesin bir gereklilik değildir. Bir çokgenin çevresi etrafındaki istasyon çiftleri için toplanan ortalama tutarlılıkları veya daha karmaşık sensör dağılımından seçilen çiftler eşit şekilde kullanılabilir. Burada tek şart, her istasyon çifti için benzer ayırma mesafeleri ve bir toplamada kullanılan istasyon çiftleri için azimut açılarının düzenli dağılımıdır [1]. İstasyon çiftlerinin sayısı dalga alanını azimut dağılımında yeterince örneklediğinde, SPAC'ın gerçek kısmı ( $SPAC(r, \omega)$ ) bir Bessel fonksiyonuna eşit olur [2] (Eşitlik 1).

$$Re(SPAC(r, \omega)) = J_0\left(\frac{w}{c(\omega)}r\right) \quad (1)$$

burada  $c(\omega)$ ,  $\omega$  açılal frekansındaki temel mod faz hızı,  $J_0$ , Bessel fonksiyonu (sıfır derece, birinci tür) ve  $r$  istasyonlar arası mesafedir. Dairesel dizilimle belirlenen titreşim verisi için uzaysal özilişki katsayısı, yüzey dalgaları gibi dispersif olan titreşimlerin oluşturduğu dalgalarla tanımlanabilir. Uzaysal özilişki katsayısı, faz hızı ve frekansın bir fonksiyonudur. Bu yöntem veri içerisinde yüzey dalgalarının belirlenmesinde oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir.

Bu çalışma, SPAC yönteminin dünyada ve ülkemizde birçok kez kanıtlanmış uygulama başarısını değil, yaygın şekilde kullanılan dizilimler ile farklı dizilimler uygulanması durumunda ortaya çıkan sonuçların irdelemesini kapsamaktadır. Bu durum özellikle şehir iç

uygulamalarda farklı geometrik dizilimlerle algılayıcıların konumlandırılmalarında yaşanan zorluklara çözüm üretmede katkı sağlayabilecektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

SPAC son yirmi yılda, yüzey dalgası analizi kesme dalgası ( $V_s$ ) hız profillerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu teknik, deneysel verilerin titizlikle işlenmesini ve ters çözümünün yapılmasını gerektirir. Ancak ters çözüm sürecinin doğrusal olmaması, elde edilen sonuçların tek ve kesin bir çözüme ulaşmamasına neden olabilir ve bu da tahmin edilen  $V_s$  modellerinde belirli yorum belirsizlikleri oluşturur. Bu aşamada araziden toplanan verinin oldukça güvenilir olması ve en verimli şekilde elde edilmesi gerekir. Genel anlamıyla yerin doğal titreşimlerinin kaydedilmesi esasıyla yürütülen veri toplama sırasında seçilen geometrik dizilim, kullanılacak veri toplama sistemi hem arazi çalışmasının uygulanabilirliğini hem de veri kalitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle, literatürde ve uygulamada iki temel veri toplama sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır:

1. Çok sayıda alıcının tipik olarak çok kanallı kablolar aracılığıyla bağlandığı çok kanallı bir sismograf sistemi
2. Tüm birimlerin herhangi bir mesafe üzerinden senkronize edilebilmesi için her bir sensörle birlikte bir GPS saati içeren kablosuz bir bağımsız sismograf dizilimi.

Çok kanallı sismograflarda genellikle doğal frekansı 1.0 – 4.5 Hz olan jeofonlar kullanılır. Kablosuz sismograf sistemlerindeyse çoğunlukla sismometreler kullanılır. Çok kanallı sismograflar daha küçük (<100 m) dizilimler için kullanılırken, kablosuz sismograflar daha büyük dizilimler (>100 m) için kullanılır. Kablosuz sismograflar düşük frekanslı faz hızları gerektiren daha büyük dizilimler için kullanıldığından, alıcı olarak geniş bant sensörler veya düşük rezonans frekansına sahip jeofonlar kullanılır. Bu çalışmada da kullanılan çok kanallı sismograflar sığ mühendislik sismolojisi çalışmalarında kullanılmaktadır ve ticari olarak birçok farklı türü mevcuttur. Teknolojinin her geçen gün ilerlemesiyle kablosuz sismograf sistemleri daha az iş gücü ve maliyet gerektirmesi sayesinde son yıllarda daha popüler hale gelmiştir. Geniş bant sensörlü kablosuz sismografların artan kullanılabilirliği SPAC ölçümlerinin büyük sismik dizilimlerle verimli bir şekilde yapılmasını

sağlamaktadır. Kullanılacak sistemin seçimi kültürel gürültü seviyesine, sahaların ölçü alınabilir durumuna, zemin koşullarına ve ilgilenilen araştırma derinliğine bağlıdır. Tablo 1, tipik veri toplama sistemlerini ve pekişmemiş veya zayıf birleşmiş sedimanlar üzerinde ulaşılabilir araştırma derinliklerini özetlemektedir. Veri toplamanın önemi kadar saha çalışması sırasında uygun ekipmanın seçilmesi ve uygun veri kalitesinin doğrulanması önemlidir.

**Tablo 1:** Zayıf çimentolu çökeller için tipik veri toplama sistemi ve araştırma derinliği [14].

Sismograf sistemi	Algılayıcı Tipi	Doğal Frekans (Hz)	Frekans Aralığı (Hz)	Nüfuz Derinliği (m)
Çok kanallı	Jeofon	> 4.5	> 1	100
Kablosuz	Jeofon	1 - 2	> 0.2	1000
Kablosuz	Geniş Bant	> 0.2	> 0.1	2000

Pasif yüzey dalgası yöntemleri için iki boyutlu dizilim türleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çünkü SPAC esas olarak dalga alanının yönsel ortalamasına bağlıdır. Dairesel dizilim, özellikle daire çevresinde tek sayıda istasyonun kullanıldığı durumlarda en etkili azimut ortalamasını verir [20]. Referans [21], Alpler'deki zorlu sert toprak alanlarına uygulanan birden fazla dairesele dizilimlere örnekler vermektedir. Daha genel uygulamalar için, seyrek iç içe geçmiş veya ortak tabanlı üçgenler çoğu durumda yeterli azimut ortalamasını verdiği için en verimli geometri olarak tanımlanmıştır. Referans [22], daha büyük istasyon dizilimlerinden çıkarılan kare alt dizilimlerin, SPAC yönteminin bir bölge üzerinde uygulanmasına nasıl izin verdiğine dair örnekler vermektedir. Bunun sonucunda, her bir alt dizilimden gelen bir dizilim bir boyutlu yorumdan yarı üç boyutlu bir jeolojik model oluşturulabilmektedir.

Erişimin kısıtlı olduğu alanlarda L şeklindeki dizilimler de faydalı olabilir. Bazı durumlarda faydalı SPAC verileri doğrusal ya da iki istasyonlu bir dizilimle elde edilebilir [23]. Bununla birlikte, doğrusal dizilimlerin ortam gürültüsünün yayılmasının 180° azimut üzerinde çok yönlü olması gerekir. Dizilim boyutu ve SPAC'tan elde edilen maksimum dalga boyu doğrudan ilişkilidir. Genel bir kural olarak, maksimum dalga boyu,

dizilim boyutu ve şekline bakılmaksızın genellikle dizilim boyutunun 2 - 4 katı arasındadır [7], [24]. Yüzey dalgası yöntemlerinin maksimum nüfuz derinliğinin kabaca maksimum dalga boyunun 1/2 ila 1/4'ü aralığında olduğu genel olarak kabul edilir [25]. Bu nedenle, SPAC kullanan pasif yüzey dalgası yöntemlerinin yaklaşık nüfuz derinliğinin belirli bir dizilim için maksimum alıcı ayırımının 1.0-1.5'i arasında olduğu sonucuna varılmıştır [1]. SPAC'ın nüfuz derinliği büyük ölçüde gürültü seviyesine ve saha zemin koşullarına, dizilim türü ve alıcılar arasındaki mesafeye bağlıdır. Penetrasyon derinliği, düşük gürültü seviyeli sahalardaki maksimum alıcı aralığıyla karşılaştırıldığında çok daha sığ olabilir. Düşük frekanslı verileri ve geniş bir nüfuz derinliğini sağlamak için geniş bant sensörlerinin ve daha uzun veri kayıtlarının kullanılması gereklidir.

SPAC ile elde edilebilecek minimum nüfuz derinliği, en kısa dalga boyuna ve bu da kullanılan SPAC yazılım işleme algoritmasının seçimine bağlıdır [12]. Minimum ve maksimum araştırma derinlikleri için  $D_{min}$ ,  $D_{max}$  hesaplamaları Eşitlik (2)'de verilmektedir [10].

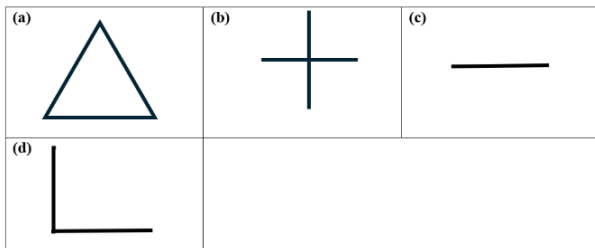
$$\begin{aligned} D_{min} &= \lambda_{min}/3 = V/(3 \cdot f_{max}), \\ D_{max} &= \lambda_{max}/2 = V/(2 \cdot f_{min}) \end{aligned} \quad (2)$$

burada  $\lambda_{min}$  ve  $\lambda_{max}$  minimum ve maksimum dalga boyları,  $f_{min}$  ve  $f_{max}$  sırasıyla SPAC analizi tarafından sağlanan minimum ve maksimum frekanslar ve  $V$ , belirli bir  $f_{min}$  veya  $f_{max}$ 'ta gözlemlenen faz hızlarıdır. Uygun olmayan dizilim boyutu veya alıcı aralığı, doğruluğu ve güvenilirliği azaltabilir. Yetersiz dizilim boyutu, özellikle düşük frekanslarda veya uzun dalga boylarında belirsiz faz hızı tahminleriyle sonuçlanır. Araştırma derinliğinden daha büyük bir alıcı aralığının kullanılması gereklidir. İlgilenilen frekans aralığında yeterli ortam gürültü seviyesi ve uygun sensörlerin kullanılması da önemlidir. SPAC, tüm mikrotremor kaynaklarının bir dizi ölçümden yeterince uzakta olduğunu ve böylece düzlem dalga yayılımının varsayılabilirliğini varsayar. Dizilimin içine veya yakınına yerleştirilen kaynaklar, faz hızı hesaplamalarında ciddi sorunlara neden olabilir. Kentsel alanlardaki trafik gürültüsü bu tür istenmeyen kaynakların tipik bir örneğidir. Kentsel alanlarda daha büyük dizilimlerden veri toplamanın gece saatlerinde yapılması daha iyi olabilir. Buna karşılık, gece

boyunca elde edilen veriler 0.2 Hz frekansına kadar kullanılabilir [14].

SPAC ölçümlerinde istatistiksel analiz için uzun kayıt süresi daha iyidir. Ancak uzun veri toplama sürelerine ihtiyaç duyulması, yöntemin saha verimliliğini düşürebilir. Bu nedenle mikrotremor verilerinin uygun veri uzunluğunda kaydedilmesi, pratik araştırma tasarımında çok önemli bir faktördür. Çeşitli deneysel çalışmalar, 100 m'den az aralıklı diziler için genellikle 10 ila 20 dakikalık verilerin yeterli olduğunu göstermektedir [23],[24], [26]. Veri kalitesi zemin yapısına göre farklılık gösterse de daha büyük dizilim boyutları için kayıt uzunluğunun artırılması gerekir. Tipik kayıt süreleri, birkaç yüz metrelik dizilim boyutu için 30-40 dakika, 1 km'den büyük dizilimler için ise birkaç saattir. Birkaç saatten daha uzun veriler, mikrotremor enerjisi kaynaklarının sabit olması nedeniyle veri kalitesini önemli ölçüde iyileştirmez. Ancak kentsel alanlardaki gibi bazı araştırmalar, bir dizilim içinde mevcut olan yerel sismik kaynaklarla önemli sorunlar yaşayabilir. Bunlar yakın alanda düzlemsel olmayan dalga yayılımına yol açarak istasyonlar arası tutarlılığın düşük olmasına neden olabilir. Uzun kayıtların yapılabileceği durumlar genellikle mikrotremor enerji kaynaklarının seyrek olduğu, düşük gürültülü uzak bölgelerdir.

Bu çalışma kapsamında 5 farklı geometrik dizilim uygulanarak SPAC ölçümleri alınmıştır (Şekil 2). Şekil 2'de 4 dizilim geometrisine yer verilmiş olup, merkeziz dairesel dizilim uygulaması da yapılmasına karşın sonuç alınmadığından şekillerde yer verilmemiştir.



**Şekil 2:** Çalışmada kullanılan geometrik dizilim türleri (a) Eşkenar üçgen, (b) Artı, (c) Doğru, (d) L şekli.

Ölçümler, üç bileşenli geniş band (0.2 Hz-150 Hz) Smartsolo marka (IGU-BD3C-5) sismometreler kullanılarak, 20 – 30 dakika aralığında alınmıştır. Bu sismometrelerde örnekleme aralığı 0.25 -20 ms aralığında değişmekte olup, çalışma sırasında 1 ms

örnekleme aralığı ile ölçüler alınmıştır. Smartsolo sismometreleri dahili batarya,  $\pm 10\mu s$  zaman hassasiyeti ve 1ppm zaman standardında dahili GPS sistemine sahip olduğundan oldukça pratik ve hassas şekilde ölçüm yapabilmektedir.

Ölçüm alanı olarak seçilen yer, oldukça kalın alüvyon zemin koşullarında, kumlu, siltli ve çakıllı birimlerden oluşmaktadır (Şekil 3). Çalışma alanı Çanakkale Boğazı'na yakın bir konumda (yaklaşık 150 m) bulunmakta olup, aşırı suya doygun bir zemin profili sunmaktadır. Yeraltı suyu derinliği yaklaşık 3m'dir. Tablo 2'de çalışma alanına ait zemin özellikleri sunulmuştur.

**Tablo 2:** Çalışma alanı zemin profili.

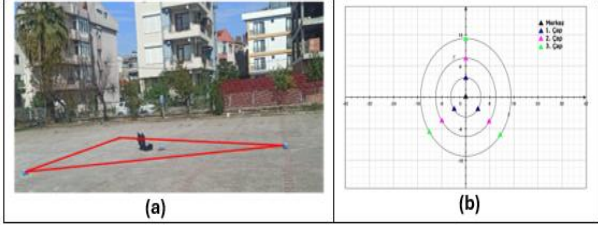
Zemin Türü	Yaklaşık Kalınlık (m)
Kumlu silt	12-13
Kum	~20
Çakıllı Kum	~40

Her bir dizilim için kayıt süreleri, dizilim boyutları ve arazi koşulları dikkate alınarak belirlenmiş, böylece hem veri kalitesinin korunması hem de arazi çalışmalarının zaman açısından verimli yürütülmesi hedeflenmiştir. SPAC ölçümlerinin arazi uygulamaları, çalışma alanının zemin özellikleri ve dizilim tasarımları göz önünde bulundurularak planlanmıştır.

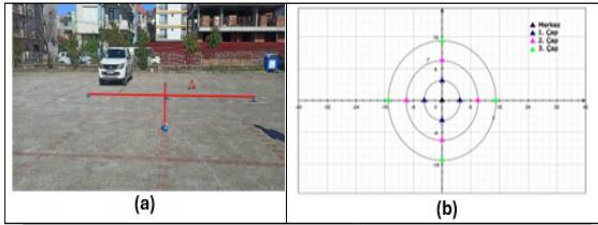


**Şekil 3:** SPAC ölçülerinin yapıldığı alan.

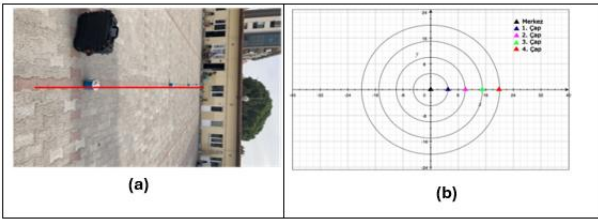
Bu kapsamda, arazide kullanılan cihazlar, kayıt süreleri ve dizilim aralıkları veri kalitesini maksimize edecek şekilde belirlenmiştir. Ölçümler sırasında kullanılan farklı geometrik şekillerin arazide uygulanması Şekil 4, 5, 6, 7 ve 8’de gösterilmektedir.



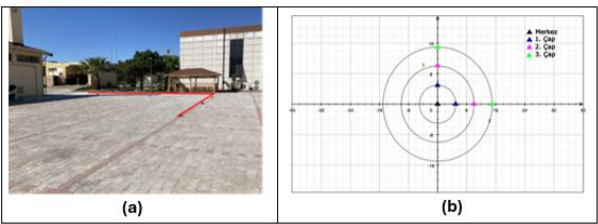
**Şekil 4:** Eşkenar üçgen dizilimi (a) Yapılan uygulama (b) Üç farklı mesafenin arazide uygulama şeması.



**Şekil 5:** Artı şekilli dizilim (a) Yapılan uygulama (b) Üç farklı mesafenin arazide uygulama şeması.



**Şekil 6:** Doğrusal hat şekilli dizilimi (a) Yapılan uygulama (b) Uygulama mesafesinin arazide uygulama şeması.



**Şekil 7:** L şekilli dizilim (a) Yapılan uygulama (b) Üç farklı mesafenin arazide uygulama şeması.

Referans [27] bir merkezsiz dairesel dizilim (CCA) yöntemi önermiş ve yöntemin, dairesel dizinin çapının 100 katına kadar olan dalga boyları için faz hızlarını tahmin edebildiğini iddia etmiştir. Ancak deneyde kullanılan sismometre sayısı dispersiyon oluşturmak için yeter sayıda sağlanamamıştır. Bu

nedenle bu dizilim türünden sonuç alınamamıştır (Şekil 8).



**Şekil 8:** Dairesel şekilli dizilim.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Mikrotremor Dalga Formlarından Faz Hızı Hesaplanması

Rayleigh dalgası dispersiyon özelliklerini belirlemek amacıyla ortam titreşimi kayıtlarına uzaysal otokorelasyon (SPAC) yöntemi uygulanmıştır. SPAC analizinde veri işlem adımları için iki yaklaşım kabul edilmektedir. İlk yaklaşımda, kaydedilen düşey bileşenli mikrotremor zaman serisi verileri, küçük bir zaman miktarıyla veya zaman bloğu uzunluğunun bir kısmıyla örtüşebilen birden fazla zaman bloğuna bölünür. Zaman bloklarını seçmeden önce tüm istasyonların zaman serileri ortak bir zaman kökenine hizalanmalıdır. Zaman alanı dalga biçimi verilerini frekans alanına dönüştürmek için her zaman bloğuna hızlı Fourier dönüşümü (FFT) uygulanır. Alıcı çiftleri arasındaki uyum ilk önce her bir zaman bloğu için hesaplanır ve daha sonra bir dizi sensör aralığı için tüm zaman bloklarının tutarlılıklarının ortalaması alınır. Tutarlılıkların birçok zaman bloğu üzerinden veya yeterince uzun bir süre boyunca ve birçok farklı azimut çifti üzerinden ortalaması alınırsa, Eşitlik 1 ile gösterildiği gibi bir Bessel fonksiyonuna yaklaştığı düşünülebilir. İkinci yaklaşımda, anlık ani artışlar gibi gürültü etkilerinin kaldırılmasıyla tek bir uzun veri bloğunun seçilmesinden sonra tek pencerede FFT uygulanır. İstasyon çiftleri için uyum spektrumları hesaplanır ve belirtilen frekans pencereleri üzerinden karmaşık tutarlılıkların ortalaması alınır [26].

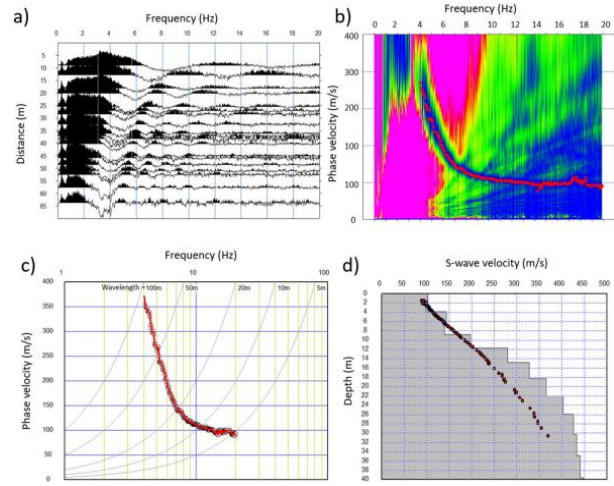
Bu çalışma, tekrarlanabilirliği sağlamak ve öznel yorumları en aza indirmek için dispersiyon eğrisi seçimi, dizilim geometrisi, sinyal koherensi ve belirsizlik analizine dayanan objektif kalite kontrol kriterleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, yüksek frekanslarda faz hızı yanlış yorumlarını önlemek amacıyla her bir dizilim yarıçapı için uzaysal aliasing sınırları değerlendirilmiştir. Yalnızca uzaysal örnekleme koşulunu sağlayan ( $\lambda \geq 2r$ ; burada  $r$ : dizilim yarıçapını ifade eder) frekans bileşenleri analizde tutulmuştur. Güvenilir frekans aralığı, en büyük ve en küçük istasyon aralıklarının kontrol ettiği minimum ve maksimum çözülebilir dalga boyları dikkate alınarak ayrıca tanımlanmıştır. Dizilim açıklığı ve istasyonlar arası mesafeye bağlı olarak belirlenen  $f_{min} < f < f_{max}$  aralığı dışında kalan frekanslar analizden çıkarılmıştır.

Sinyal kararlılığı, çapraz spektral analizden türetilen koherens fonksiyonu kullanılarak değerlendirilmiştir. SPAC'ın gerektirdiği yeterince dengelenmiş ve durağan dalga alanı varsayımını sağlamak amacıyla yalnızca koherens değerinin 0.7'den büyük olduğu dispersiyon noktaları kabul edilmiştir. Faz hızı kestirimlerindeki belirsizlik, bağımsız zaman segmentlerinin çoklu pencere ortalaması kullanılarak nicel olarak belirlenmiştir. Her frekans için faz hızı standart sapması hesaplanmış ve yalnızca bağıl hatası %10-15'ten küçük olan veri noktaları güvenilir kabul edilmiştir. Nihai dispersiyon eğrisi, ilişkili hata bantları içinde kalan ve SPAC teorisinin öngördüğü sıfıncı merteye Bessel fonksiyonu davranışıyla uyumlu ortalama faz hızı trendi olarak tanımlanmıştır. Bu objektif seçim kriterleri, operatör kaynaklı yanlılığı azaltmış ve kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) profillerinin ters çözümü için güvenilir bir dispersiyon veri seti sağlamıştır.

Şekil 9a, istasyonlar arası sensör mesafesinin bir fonksiyonu olarak tutarlılıkların bir örneğini göstermektedir. Şekil 9b, gözlemlenen tutarlılıklar ile teorik Bessel fonksiyonları arasındaki hatayı gösteren frekans alanındaki bir faz hızı

görüntüsüdür. Bu faz hızları serisi bir dağılım eğrisini tanımlar (Şekil 9c). Buradan ters çözüm dönüşümü yapılarak hız modeli elde edilir (Şekil 9d).



**Şekil 9:** SPAC'a dayalı işlemenin ana hatları. (a) Mesafeye karşı tutarlılıklar (alıcılar arasındaki ayırım). (b) Frekans alanındaki faz hızı görüntüsü.

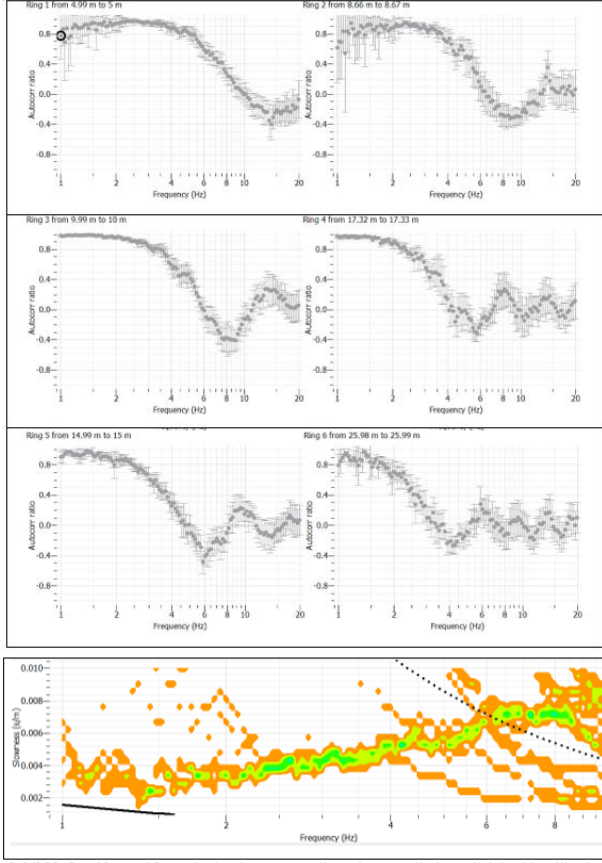
Renk farklılıkları, gözlenen tutarlılıklar ile Eşitlik 1'de gösterilen teorik Bessel fonksiyonları arasındaki hata farklılıklarını gösterir (1). Mavi renk küçük hatayı, kırmızı renk ise büyük hatayı belirtir. Kırmızı noktalar Denklem 2'nin her iki tarafı arasında minimum farkı veren faz hızlarını gösterir. (c) Dispersiyon eğrisi. (d) Gözlemlenen faz hızlarından dönüştürülen dalga boyunun 1/3'ü (kırmızı daireler) ile birlikte başlangıç hız modeli [14].

Ölçümler mesafe değişimleri şeklinde olup, geometrinin elverdiği ölçekte farklı mesafelerde açılımlar yapılmıştır (Tablo 3).

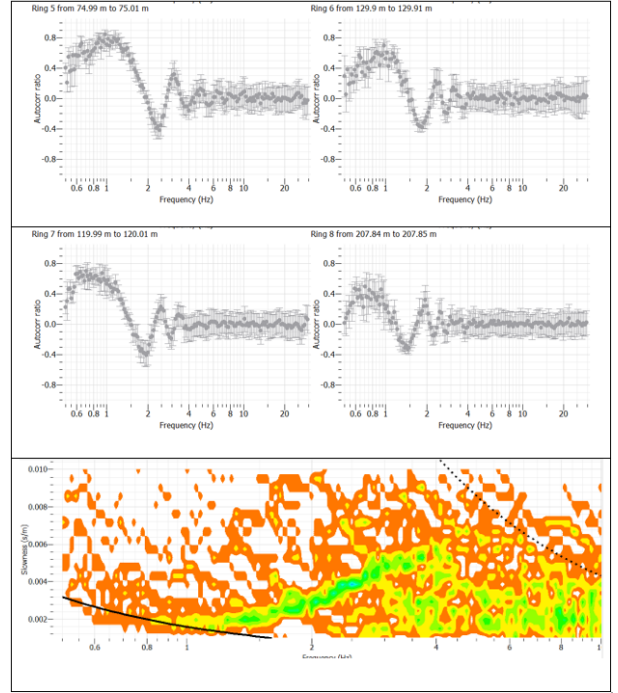
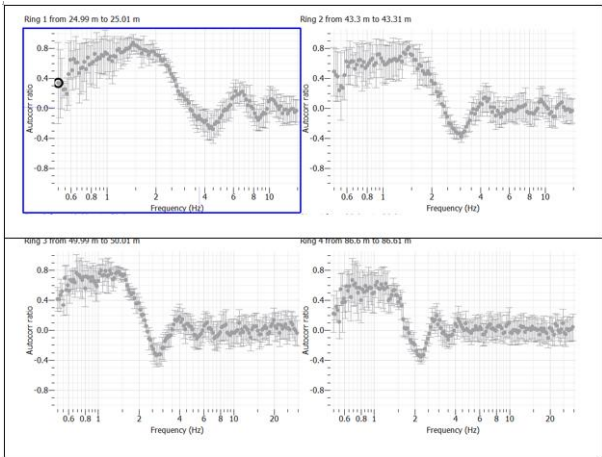
**Tablo 3:** Dizilim geometrisi ve açılım mesafeleri.

Dizilim Geometrisi	Açılım Mesafesi (m)	Sensör Sayısı	Kayıt Süresi (dk)	Şekil No
Eşkenar Üçgen	5-10-15	4	20	10
Eşkenar Üçgen	25-50-75-120	4	30	11
Artı	4-8-12	4	20	12
Düz Çizgi	5-10-15-20	4	20	13
L-Şekil	5-10-15	4	20	14

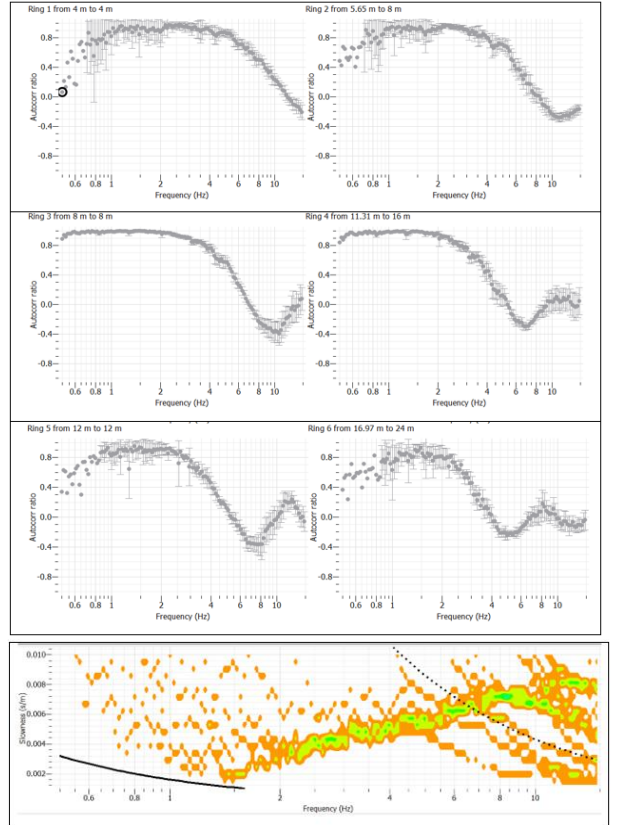
Yapılan SPAC ölçümlerinden elde edilen dispersiyon eğrileri ve buradan hesaplanan faz hızı grafikleri Şekil 10,11,12,13 ve 14’de verilmiştir. Özellikle Şekil 11’de eşkenar üçgen dizilimi tekrar oluşturulmuş ancak bu kez daha uzun mesafelerle ölçümler alınarak deneme yapılmıştır.



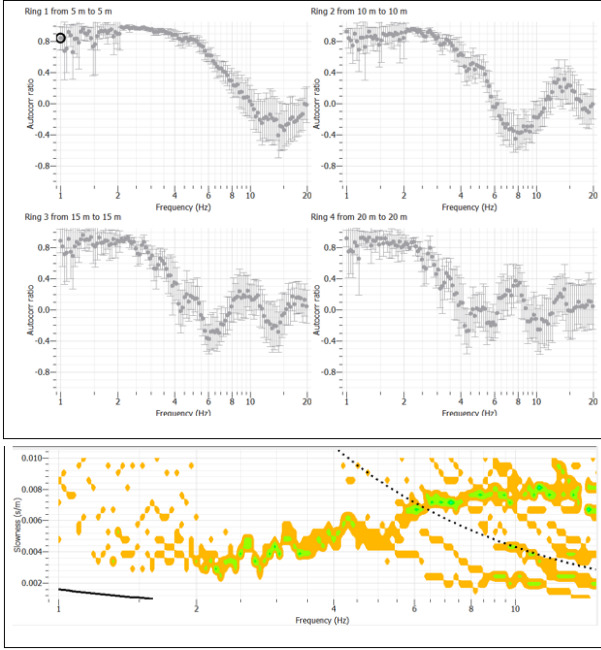
Şekil 10: 5m, 10m ve 15m açıklımlı eşkenar üçgen ile toplanan verilerin analiziyle elde edilen her bir alıcı çiftin özilişkisi katsayıları ve yavaşlık eğrisi.



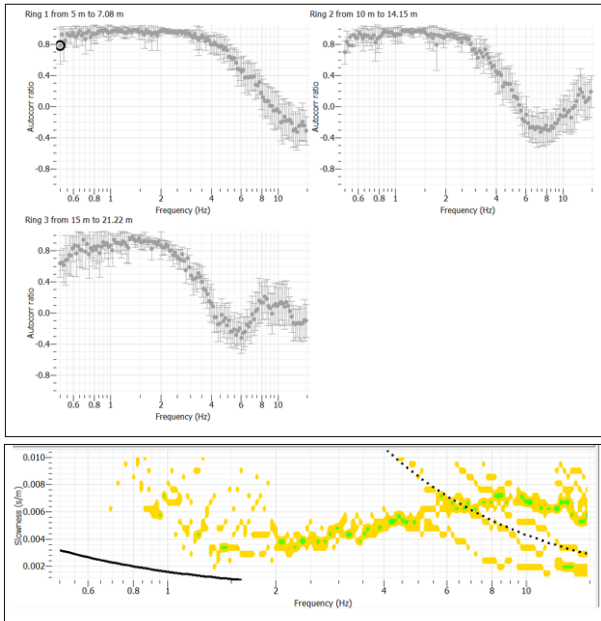
Şekil 11: 25m, 50m, 75m ve 120m açıklımlı eşkenar üçgen ile toplanan verilerin analiziyle elde edilen her bir alıcı çiftin özilişkisi katsayıları ve yavaşlık eğrisi.



Şekil 12: 4m, 8m ve 12m açıklımlı artı geometri ile toplanan verilerin analiziyle elde edilen her bir alıcı çiftin özilişkisi katsayıları ve yavaşlık eğrisi.



**Şekil 13:** 5m, 10m, 15m ve 20m açıklımlı düz çizgi geometrili dizilimi ile toplanan verilerin analiziyle elde edilen her bir alıcı çiftin özilişki katsayıları ve yavaşlık eğrisi.



**Şekil 14:** 5m, 10m ve 15m açıklımlı L geometrili dizilimi üçgen ile toplanan verilerin analiziyle elde edilen her bir alıcı çiftin özilişki katsayıları ve yavaşlık eğrisi.

### 3.2. Ters Çözüm

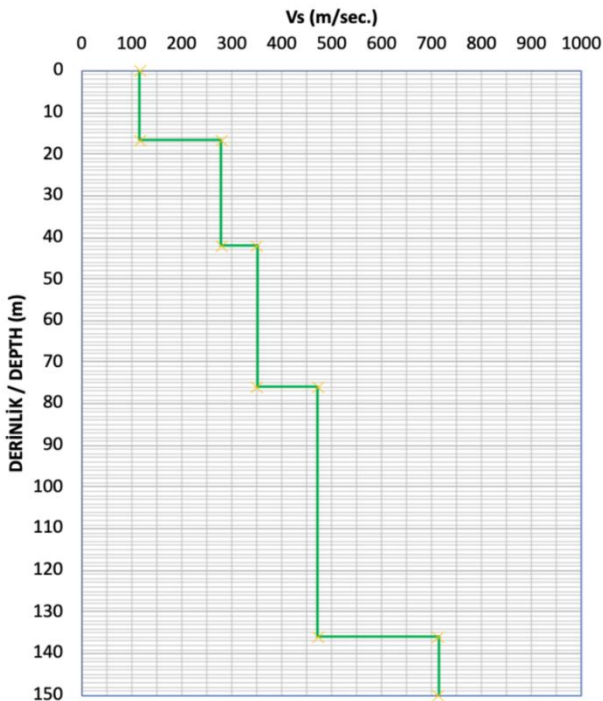
$V_s$  modeli genellikle dispersiyon eğrilerinden doğrusal olmayan bir ters çözüm yoluyla elde edilir. Çoğu ters çözüm, uygun modelleri tahmin etmek için bazı başlangıç modellerine veya arama alanlarına ihtiyaç duyar. Bu modeller ve arama alanları genellikle basit bir dalga boyu dönüşümü ile oluşturulur [25]. Burada dalga boyları faz hızı ve frekansın 3'e bölünmesiyle hesaplanır ve derinlik olarak çizilir. Tüm ters çözüm yöntemleri, gözlemlenen ve tahmin edilen faz hızları arasındaki hatayı azaltmaya çalışır (Eşitlik 3).

$$\sum_i^N (f_i^{obs} - f_i^{cal}(V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sM}))^2 = \sum_i^N (f_i^{obs} - f_i^{cal}(x))^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

burada  $V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sM}$  sırasıyla 1., 2. ve M. katmanlar için  $V_s$  değerleri, N, gözlemlenen faz hızı verilerinin sayısıdır,  $f_i^{obs}$ , gözlemlenen dalga biçimi verilerinden elde edilen faz hızlarını temsil eder ve  $f_i^{cal}$ ,  $V_s$  modeli için temel mod teorik faz hızlarının kümesidir. Doğrusal olmayan en küçük kareler yönteminde, yinelenmeli süreç, gözlemlenen ve hesaplanan faz hızları arasında iyi bir uyum elde edilene kadar hızları değiştirir. Teorik dispersiyon eğrileri genellikle bir matris yöntemiyle hesaplanır [28].

Teorik dispersiyon eğrilerinin hesaplanması,  $V_s$ 'ye ek olarak P-dalga hızı ( $V_p$ ) ve yoğunluğunu gerektirir. Dispersiyon hesaplamasında  $V_p$  ve yoğunluğun etkileri  $V_s$ 'ye kıyasla çok daha küçük olduğundan [25],  $V_p$  ve yoğunluk genellikle  $V_s$  ile otomatik olarak değiştirilir veya makul sabit değerlere ayarlanır.  $V_p$  ve yoğunluk için yöntemin seçimi kritik değildir. Çünkü dispersiyon eğrileri genellikle bu parametrelere karşı duyarsızdır. Yeraltı suyu seviyesinin üstündeki ve altındaki  $V_p$ , konsolide olmayan toprakta büyük bir değişiklik gösterdiğinden, su tablasının konumunun, yumuşak sedimanlardaki tahmini  $V_s$  modeli üzerinde büyük bir etkiye sahip olabileceği sonucu çıkar. Bu gibi durumlarda, güvenilir yeraltı suyu bilgilerinin elde edilmesi arzu edilir. Aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemlerinin çoğu, dağılım eğrilerinin temel modun ( $R_0$ ) hakimiyetinde olduğunu varsayar. Ancak yüksek modlar, yüksek hızlı bir katmanın düşük hızlı bir katman üzerinde yer aldığı veya yüksek hızlı katmanların düşük hızlı

katmanlar arasına gömülü olduğu durumlar gibi çeşitli hız yapılarında baskın olabilir. Bu nedenle, bu durumlarda dispersiyon eğrilerinin ters çözümünde daha yüksek modların hesaba katılması gereklidir. Çalışma alanında yapılan SPAC ölçümlerinden en yaygın dizilim olan eşkenar üçgen diziliminden elde edilen Vs hız değerlerinin derinlikle 1 boyutlu olarak gösterimi de Şekil 15'de verilmiştir. Bu değerler de ölçüm alanının çok gevşek zemin yapısına sahip olduğunu belirgin şekilde göstermekte ve yaklaşık 135 metrelerde Referans [29] tarafından önerilen ve sismik temel derinliğinin sınırı olarak kabul edilen Vs= 760 m/s hız değerine ulaşabilmektedir.



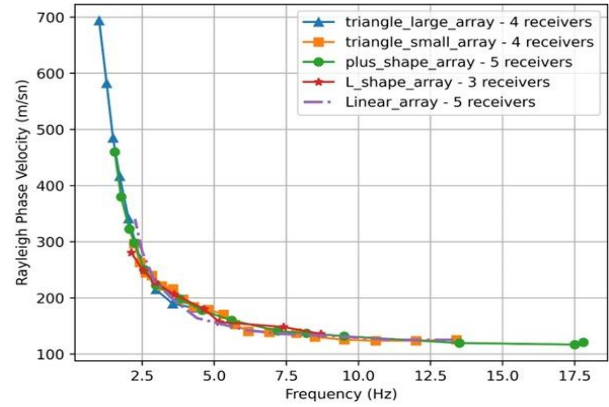
Şekil 15: 1 boyutlu derinlik-Vs hız modeli.

#### 4. SONUÇ

SPAC yöntemi bir boyutlu katmanlı bir yapıyı varsayar ve 2 boyutlu yapıya, 3 boyutlu yapıya veya karmaşık topografyaya uygulanabilirliği yeterince araştırılmamıştır. SPAC yöntemi, ortam sismik gürültüsünü kullanır ve verilerin kalitesi önemli ölçüde sahadaki ortam gürültüsü ile dalga alanının karakterine bağlıdır. Bağımsız olarak, dizilim merkezinden dizilim yarıçapının iki katı uzaklıktaki gürültü kaynaklarının, istenen sismik dalga alanına bir yaklaşım sağladığı bilinmektedir [28],[30],[31],[32]. SPAC veri işleme sırasında, alıcı

diziliminin veya ortam gürültüsünün yayılma yönünün izotropik olduğu varsayılır.

Saha, yalnızca doğrusal bir dizilimle kullanılabilir şekildeyse, birkaç farklı yönde, farklı zaman aralıklarında veya aktif yöntemlerle karşılaştırılarak ölçüm yapılması, araştırmanın güvenilirliğini artırabilir. Şekil 16'da aynı alanda dört farklı dizilim ve bir uzun mesafe açılımlı dizilimle elde edilen dispersiyon eğrilerinden faz hızı değişim grafiği görülmektedir. Grafikten de görüleceği gibi eşkenar üçgen ve artı şekilli dizilimler daha düşük frekanslı yapılardan bilgi alabilmiştir. Tüm dizilimler birbirleriyle oldukça tutarlılık göstermiştir. Uzun mesafe açılımı daha derin ve düşük frekanslı yapılara ait hız değerlerinin elde edilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 16: Proje çerçevesinde yapılan dizilim çalışmalarından elde edilen faz hızı-frekans değişiminin birlikte gösterimi.

**Yazar Katkıları:** Bu makalede arazi ölçümleri Aydın Büyüksaraç ve Onur Eyisüren tarafından gerçekleştirilmiştir. Tüm yazarlar, literatür taramasının yürütülmesi, çalışma metodolojisinin geliştirilmesi, bulguların elde edilmesi, makalenin yazımı ile gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi süreçlerine eşit düzeyde katkı sağlamıştır.

**Teşekkür:** Bu proje FHD-2023-4286 nolu hızlı destek projesi olarak Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ÇOMÜ-BAP) Birimi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, makalenin gelişimine katkı sağlayan hakemlere teşekkür eder.

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

## 5. KAYNAKLAR

- [1] S. Foti, S. Hollender, F. Garofalo, D. Albarello, M.Asten, P.Y. Bard, C. Comina, C. Cornou, B. Cox, G. Di Giulio, T. Forbriger, K. Hayashi, E. Lunedei, A. Martin, D. Mercerat, M. Ohrnberger, V. Poggi, F. Renalier, D. Sicilia, and L.V. Socco, "Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project", *Bull. Earthq. Eng.* 16, 2367–2420, 2017.
- [2] K. Aki, "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors" *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415–456, 1957.
- [3] K. Aki, "Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula  $\log_{10}N=a-bm$  and Its Confidence Limits", *Bull. Earthq. Res.*, 43, 237-239, 1965.
- [4] H. Okada and K. Suto, "The microtremor survey method", Society of Exploration Geophysicists Monograph Series 12: Tulsa, Oklahoma, 2003.
- [5] M.W. Asten and D.M. Boore, "Comparison of shear-velocity profiles of unconsolidated sediments near the Coyote borehole (CCOC) measured with fourteen invasive and non-invasive methods," In: Asten, MW, Boore DM (Eds.) Blind comparisons of shear-wave velocities at closely spaced sites in San Jose, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005–1169, 35 pp, 2005.
- [6] W.J. Stephenson, J.N. Louie, S., Pullam manappallil, R.A. Williams and J.K. Odum, "Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: implications for earthquake ground motion assessment," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(6), 2506–2516, 2005.
- [7] C. Cornou, M. Ohrnberger, D.M. Boore, K. Kudo and P.Y. Bard, "Derivation of structural models from ambient vibration array recordings: results from an international blind test," In: Bard P-Y, Chaljub E, Cornou C, Gueguen P (Eds.) Grenoble: Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion (ESG2006), p. 1127–1215, 2007.
- [8] D.M. Boore and M.W. Asten, "Comparisons of shear-wave slowness in the Santa Clara Valley, California, using blind interpretations of data from invasive and non-invasive methods," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(4), 1983–2003, 2008.
- [9] F. Garofalo, S. Foti, F. Hollender, P.Y. Bard, C. Cornou, B.R. Cox, M. Ohrnberger, D. Sicilia, M. Asten, G. Di Giulio, T. Forbriger, B. Guillier, K. Hayashi, A. Martin, S. Matsushima, D. Mercerat, V. Poggi and H. Yamanaka, "InterPACIFIC project: comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 82, 222–240, 2016.
- [10] M.W. Asten and K. Hayashi, "Application of the spatial autocorrelation method for shear-wave velocity studies using ambient noise," *Surv. Geophys.*, 39, 633–659, 2018.
- [11] M.W. Asten, A. Yong, S. Foti, K. Hayashi, A.J. Martin, W.J. Stephenson, J.F. Cassidy and J. Coleman, "A preliminary assessment of uncertainties attributed by analysts, array types and processing algorithms for microtremor observations, via the COSMOS Blind Trials," ASEG Extended Abstracts 2019: 1–4, 2019.
- [12] M.W. Asten, A. Yong, S. Foti, K. Hayashi, A.J. Martin, W.J. Stephenson, J.F. Cassidy, J. Coleman, R. Nigbor, S. Castellaro, K. Chimoto, C. Cornou, I. Cho, T. Hayashida, M. Hobiger, C.H. Kuo, A. Macau, E.D. Mercerat, S.Molnar, P. Pananont, M. Pilz, N. Poovarodom, E. Sáez, M. Wathelet, H. Yamanaka, T. Yokoi and D. Zhao, "An assessment of uncertainties in Vs profiles obtained from microtremor observations in the phased 2018 COSMOS Blind Trials," *Journal of Seismology*, 26, 757-780, 2021.
- [13] M.W. Asten, W.J. Stephenson, A. Yong, S. Foti, K. Hayashi, A.J. Martin and R. Nigbor, "Data release for: an assessment of uncertainties attributed by analysts, array types and processing algorithms for microtremor observations, using the phased 2018 COSMOS Blind Trials," U.S. Geological Survey data, 2021.
- [14] K. Hayashi, M.W. Asten, W.J. Stephenson, C. Cornou, M. Hobiger, M. Pilz and H. Yamanaka, "Microtremor array method using spatial autocorrelation analysis of Rayleigh-wave data", *J Seismol*, 26, 601–627, 2022.
- [15] K. Wapenaar, "Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation," *Phys. Rev. Lett.*, 93(254301), 1–3, 2004.
- [16] M. Tün, E. Pekkan, O. Özel and Y. Güney, "An investigation into the bedrock depth in the Eskisehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method", *Geophys. J. Int.*, 207, 589–607, 2016.
- [17] M. S. Araslan and A.O. Özel, "Eskişehir

- havasında H/V ve SPAC yöntemleriyle sismik analiz ve derinlik profili çalışmaları”, *GUJS* 14(3), 883-909, 2024.
- [18] M. Tün, E. Pekkan, and S. Mutlu, “The depth of alluvial sediments and subsurface profiling along the Eskişehir basin in Central Turkey using microtremor observations,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 81, 169, 2022.
- [19] T. Karabıyıkoglu, Ü. Dikmen, “Ankara Batı Kesimi Zeminlerin Dinamik Özellikleri”, *J Disast. Risk*, 5(1), 196-215, 2022.
- [20] H. Okada, “Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method,” *Explor. Geophys.*, 37(1), 73–85, 2006.
- [21] V. Poggi, B. Edwards, and D. Fäh, “Derivation of a reference shear-wave velocity model from empirical site amplification available to purchase,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(1), 258–274, 2017.
- [22] H. Zhang and K. L. Pankow, “High-resolution Bayesian spatial autocorrelation (SPAC) quasi-3-D Vs model of Utah FORGE site with a dense geophone array,” *Geophys. J. Int.*, 225, 1605–1615, 2021.
- [23] K. Hayashi, “Effect of array shape on the spatial autocorrelation analysis of micro-tremor array measurements,” *Proc. Symp. Appl. Geophys. Eng. Environ. Probl.*, 616–625, 2009.
- [24] K. Hayashi, “Near-surface engineering,” in *Seismic Ambient Noise*, N. Nakata, L. Gualtieri, and A. Fichtner, Eds. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2019, 302–337.
- [25] J. Xia, R. D. Miller, and C. B. Park, “Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves,” *Geophysics*, 64(3), 691–700, 1999.
- [26] M. W. Asten, “On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods,” *Geophysics*, 71(6), V153–V162, 2006.
- [27] I. Cho, S. Senna, and H. Fujiwara, “Miniature array analysis of microtremors,” *Geophysics*, 78(1), KS13–KS23, 2013.
- [28] N. R. A. Smith, A. M. Reading, M. W. Asten, and C. W. Funk, “Constraining depth to basement for mineral exploration using microtremor: A demonstration study from remote inland Australia,” *Geophysics*, 78(5), B227–B242, 2013.
- [29] Y. Nakamura, “Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”, Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan), 30, 25–33, 1989.
- [30] J. Roberts and M. Asten, “A study of near source effects in array based (SPAC) microtremor surveys,” *Geophys. J. Int.*, 174(1), 159–177, 2008.
- [31] S. Marano, M. Hobiger, P. Bergamo, and D. Fäh, “Analysis of Rayleigh waves with circular wavefront: A maximum likelihood approach,” *Geophys. J. Int.*, 210(3), 1570–1580, 2017.
- [32] E. Pamuk, S. Fırat, A. Büyüksaraç, K. Ö. Çetin, Ö. Bektaş, N. S. Işık, and H. E. Sarıtepe, “Three-dimensional shear wave velocity (Vs) structure and dynamic soil properties of Adıyaman-Gölbashi basin using HVSR and SPAC methods,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 200, 109744, 2026.

RESEARCH ARTICLE

## Effect of Material Selection on Warpage and Shrinkage Behavior in an Automotive Fuse Box Housing: A Numerical Flow Analysis

### *Otomotiv Sigorta Kutusu Muhafazasında Malzeme Seçiminin Çarpılma ve Büzülme Davranışı Üzerindeki Etkisi: Sayısal Akış Analizi*

Asiye Esra Çelik, Alp Eren Dede, Fuat Tan\*

Balikesir University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Balikesir, Türkiye

Received/Geliş: 02.04.2026

Accepted/Kabul: 30.04.2026

\*Corresponding Author (Sorumlu Yazar): Fuat Tan [fuattan@balikesir.edu.tr](mailto:fuattan@balikesir.edu.tr)

**ABSTRACT:** This paper presents the study of structural performance enhancement and validation of manufacturing methods of a car fuse box cover, through a series of numerical simulation at different levels. Four material alternatives: Ultradur B 4300 G6 (PBT-GF30), Ultramid A3HG6 HR (PA66-GF30), Cypcoloy CX7240 (PC/ABS), and ME212U (PP-TD20) were analyzed using Moldflow at important stages such as Filling, Packing, and Warpage. Along with the use accurate rheology and thermodynamics data, the methodology also considers Pressure, Volume, Temperature (PVT) and viscosity, shear rate relationships to help make predictions of flow behavior, pressure distribution, and the final deformation of the part. Comparative analysis of the simulation results established Cypcoloy CX7240 as the optimum material for this specific application, owing to its outstanding thermal and mechanical properties, superior dimensional stability, and reliable locking mechanism. Besides, the study makes available to engineers valuable information about material choice and processing variables for automotive parts with exquisite details, thus providing a solid platform for minimizing quality defects during manufacture and improving the sustainability of product performance under harsh conditions prevailing in engine compartments.

**Keywords:** Injection molding, moldflow analysis, warpage, volumetric shrinkage.

**ÖZ:** Bu makale, farklı seviyelerde gerçekleştirilen bir dizi sayısal simülasyon aracılığıyla, bir otomobil sigorta kutusu kapağının yapısal performansının iyileştirilmesi ve üretim yöntemlerinin doğrulanması üzerine yapılan bir çalışmayı sunmaktadır. Dört malzeme alternatifi: Ultradur B 4300 G6 (PBT-GF30), Ultramid A3HG6 HR (PA66-GF30), Cypcoloy CX7240 (PC/ABS) ve ME212U (PP-TD20), Doldurma, Paketleme ve Çarpılma gibi önemli aşamalarda Moldflow kullanılarak analiz edilmiştir. Doğru reoloji ve termodinamik verilerinin yanı sıra, metodoloji ayrıca akış davranışı, basınç dağılımı ve parçanın nihai deformasyonunun tahmin edilmesine yardımcı olmak için Basınç, Hacim, Sıcaklık (PVT) ve viskozite, kayma hızı ilişkilerini de dikkate almaktadır. Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, üstün termal ve mekanik özellikleri, geometrik doğruluğu ve güvenilir kilitlenme işlemi ile Cypcoloy CX7240'ın bu özel uygulama için optimum malzeme olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca, bu çalışma mühendislere otomotiv parçaları için malzeme seçimi ve işleme değişkenleri hakkında değerli bilgiler sunarak, üretim sırasında kalite kusurlarını en aza indirmek ve motor bölmelerinde hakim olan zorlu koşullar altında ürün performansının sürdürülebilirliğini artırmak için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Enjeksiyon kalıplama, kalıp akış analizi, çarpılma, hacimsel büzülme.

## 1. INTRODUCTION

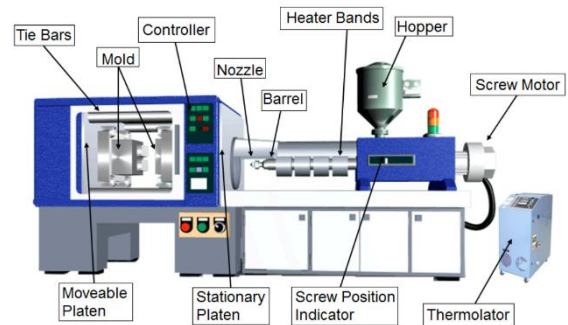
The methods to optimize the parameters of the injection molding process become one of the most demanding tasks in the automotive industry nowadays in order to secure the production of quality thin-walled plastic parts [1]. Against this backdrop, computer-aided engineering (CAE) tools have been extensively used for the design and production planning phases of automotive fuse box housings that ensure the safety of vehicle systems [2]. One of the major manufacturing issues of such electronic enclosures is warpage. Its reduction can be carried out beforehand through the use of high-level mold flow simulation like Moldflow [3].

For the shrinkage and warpage issues observed in automotive parts subsequent to molding, finite element analysis (FEA) has been cited in most studies as a standard and dependable method [4]. On the other hand, matching the simulation outcomes with actual production cannot be guaranteed if optimization of both material properties and process parameters is not performed together with the help of numerical techniques [5].

Automotive sector primarily relies on thermoplastics as raw materials for manufacturing plastic injection parts. Common plastic types include polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyethylene (PE), polyvinyl chloride (PVC), polycarbonate (PC), and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). These main raw materials can be transformed into a new product with specific properties by mixing together with different additives. For instance, glass fiber additive provides durability and hardness, whereas talc powder additive helps in making the product lighter and stronger. Therefore, the selection and properties of raw materials should be consistent with the design and function of the parts to be produced [6].

The comparison of structural variations in the shrinkage behavior of amorphous and semicrystalline polymers is very important for the dimensional stability of the final product especially when it comes to highly demanding automotive applications [7]. Experimentally it has been shown

that in glass fiber-reinforced polyamide derivatives, the orientation of the fiber during molding has a direct and negative effect on the anisotropic shrinkage and the geometric deformation [8]. So the only way to ensure the dimensional stability of glass fiber-reinforced polymeric electronic enclosures would be to tune the specific process parameters keeping the thermodynamic nature of the material in mind [9].



**Figure 1:** Injection Molding Machine.

Fuses, are one of the very important means that the flows and damage caused by short-circuits are protected in the circuits of electronics and power electronics [10]. Fuses, allow the current to flow up to a certain level and when this level is exceeded, the burn-out of the fuse element, which is the main component of the fuse, results in the interruption of the flow of current in order to protect the installation [11]. Many electrically operated devices contain fuses in their protection systems in order to prevent damage from short-circuit currents [12]. Vehicle fuse box is a major unit in an automobile to protect its electrical circuits; therefore its quality should certainly be ensured [13].

The fuse box is a component designed in passenger vehicles to protect the electrical system. This component not only protects the vehicle's fuse modules from external elements (dust, moisture and impact), but also ensures the fixing of the fuses. In addition, it has been optimized to make the installation and maintenance processes easier [6]. The assembly process is a process that has to be checked for the automotive sector in which fuse boxes contain many different components [14]. Since the assembly process is done manually rather than by automatic systems, there are many errors

and thus production efficiency decreases, costs increase and quality improvement is limited [15]. Quality and efficiency are very important for companies' future due to the competitive environment in the automotive sector [16]. Customers have short time expectations for the production of high-quality and innovative products meeting the needs from the companies [17]. Minimizing losses and improving the quality process is not only the main purpose of the user companies but also one of the most important targets of the companies that develop fuse boxes. In this line, the aim of the study [18] was to detect the incorrectly assembled fuses which were assembled wrongly due to operators' mistakes.

Curta et al. [19], figuring out that automating the feeding of fuse boxes in the automotive industry can reduce the number of damaged fuses and also the time of assembly process, carried out the design of an autonomous system based on Cartesian robots and also used the Six Sigma approach. Plesca [20] has studied threedimensional numerical modeling approach for the analysis of the thermal behavior of electrical fuses mounted in fuse holders. Wang, Luo, Yang and Shang [13] used a multi-angle sensing and assembly method based on machine vision with the purpose of rapidly and accurately identifying the type and position of a fuse in automotive fuse boxes and thus automating the assembly process. Cazacu et al. [2] studied the digital twin approach that combines IoT, CAD modeling, and machine vision to reduce human intervention and detect errors in real time during the assembly of industrial fuse boxes. Bujoreanu et al. [21] have adopted 3D thermal simulation by Ohm and Fourier laws physical models for charting thermal fatigue and melting risks occurring in fuse boxes under high current. Huang et al. [22] employed a knowledge-based parametric mold design methodology that uses past data instead of traditional trial-error method for designing the gating system that caters the complex geometrical shapes of automotive fuse boxes. Lin et al. [23] have investigated Transformer-based artificial intelligence approach for real-time detection of mechanical jamming and positioning errors in robotic fuse box assembly that may occur on small

batch production lines. The researchers [24] have exploited API technology that links physical and virtual environment and digital twin approach to make cable wiring and pin insertion for the fuse box autonomous and thus reduced production errors.

Kim et al. [25] designed a fully autonomous prototype assembly machine that would carry out the mounting of the car fuse-box receptacle and conductor connections at high speed and in a completely mechanical manner. Hiyane-Nashiro et al. [26], attempting to minimize the volumetric shrinkage and warpage deformations of plastic fuse boxes during injection molding, have resorted to Artificial Neural Networks and genetic algorithms (NSGA-II) approach. Kim et al. [27] have compared plastic flow and heat loss behaviors to determine the most suitable gate position that can prevent breakage and warpage to the production of self-hinged automotive fuse boxes. Öktem et al. [28] have adopted Taguchi optimization technique and Finite Element Analysis methods to prevent short shot defects often appeared in the injection molding of thin-wall fuse boxes.

The researchers at GoodTech [29] have investigated the effects of advanced cooling channels on mold to reduce the production cycle time and thermal residual stresses for automotive fuse boxes with complex supporting ribs. The SPE researchers [30] have evaluated the polymer titanate filler addition method to the polymer for fiberglass reinforced polycarbonate fuse box production at lower injection temperatures to prevent surface sink marks and save energy.

SABIC researchers [31] studied the injection behavior of material for halogen-free flame retardant chemicals in fuse boxes to optimize nonuniform thickness distribution due to viscosity increase and preserve dimensional stability. MIT researchers [32] measured instantaneous electricity consumption profiles of different production stages such as mold closing and pressing to test the conformity of an injection machine that produces plastic fuse box to green manufacturing standards. Cadrex researchers [33] compared the optimization of mold parting angles (draft angle) and homogeneous wall thickness to prevent surface

sink marks of outdoor fuse boxes converted from metal to plastic due to cooling.

In this study, the injection molding behavior of four engineering polymers (PBT-GF30, PA66-GF30, PC/ABS, and PP-TD20) used in automotive fuse box housings is systematically investigated through Moldflow simulations. The scope of the study focuses on evaluating the effects of material structure (amorphous vs. semi-crystalline and fiber/mineral reinforcement) and process parameters on key quality indicators such as fill time, injection pressure, temperature distribution, volumetric shrinkage, wall shear stress, and warpage. The primary objective is to identify the most suitable material–process combination that ensures optimal manufacturability and dimensional stability for complex fuse box geometries under realistic processing conditions.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Materials

The aim of this research was to investigate four different commercial grades of thermoplastic materials with various chemical compositions and types of reinforcements, in terms of their machinability as well as their structural performance in an automotive fuse box body. The selection of these resins was based on a comprehensive requirement profile including mechanical integrity, thermal stability, and dimensional accuracy. This paper intended to study the influence of macromolecular structures on the injection molding process. Somewhat crystalline Ultradur B 4300 G6, short glass fiber reinforced (30% by weight) polybutylene terephthalate (PBT) was selected primarily due to its superior dimensional stability and low moisture absorption; these characteristics are critical in maintaining tight tolerances in electrical connectors. By contrast, high heat resistant polyamide 66 (PA66) reinforced with 30% glass fiber (Ultramid A3HG6 HR) has been included to assess the performance of a high strength semi-crystalline matrix capable of withstanding the harsh thermal cycles that are a hallmark of under-hood automotive environments. To represent unreinforced and amorphous systems,

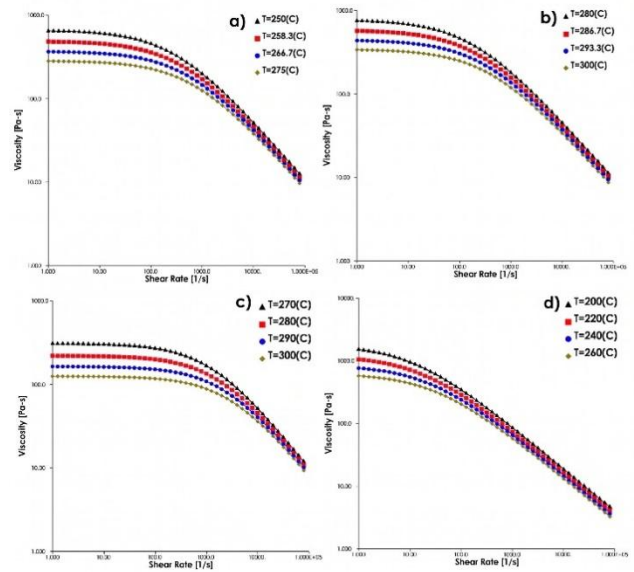
the polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene (PC/ABS) blend Cycology CX7240 which gives much higher impact resistance and significantly lower mold shrinkage as compared to semi-crystalline counterparts has been used; to analyze cost-effective balance between weight reduction and improved hardness afforded by mineral core, a 20% mineral filled (talc filled) polypropylene (PP) matrix, ME212U has been chosen. These PBT and PA66 grades were supplied by BASF SE, PC/ABS and PP-TD20 respectively from SABIC and special automotive suppliers. To ensure the accuracy of numerical simulations, all rheological, thermal and PVT (Pressure-Volume-Temperature) data were directly taken from the Autodesk Moldflow Insight material database and presented in Table 1.

PVT characterization provides a thermodynamic explanation for the shrinkage and distortion of the plastic box cover observed by the naked eye. Cycology CX7240 (PC/ABS), which has a stable, amorphous transition profile suitable for dimensional accuracy, while the semi-crystalline grades (PBT-GF30, PA66-GF30 and PP-TD20) exhibit significant specific volume discontinuities. In fact, PP-TD20 displays the most aggressive volumetric shrinkage at the transition point (~165°C), thus explaining its higher susceptibility to sink mark formation. These findings reveal that in terms of processing window, an amorphous PC/ABS offers a superior range for automotive housings where high sealing integrity is required, whereas the semi-crystalline candidates undoubtedly need precisely optimized packing profiles to reduce the thermodynamic volume collapse inherent in their molecular structures (Fig 2). The viscosity character identified ME212U (PP-TD20) and Ultramid A3HG6 HR (PA66-GF30) as the most processable candidates for complicated automotive housings due to their excellent shear thinning capabilities over a wide shear rate range. In contrast, Cycology CX7240 (PC/ABS) shows the highest melt resistance and most pronounced temperature sensitivity, which corresponds to the high injection pressures and shear stresses observed in the earlier simulation steps. For thin-walled snap-fit geometries, the high pseudo-plastic behavior of PP and PA66 types ensures complete filling of the mold with minimum mechanical stress

on polymer chains, while PC/ABS requires higher thermal energy to reach similar fluidity (Fig 3).

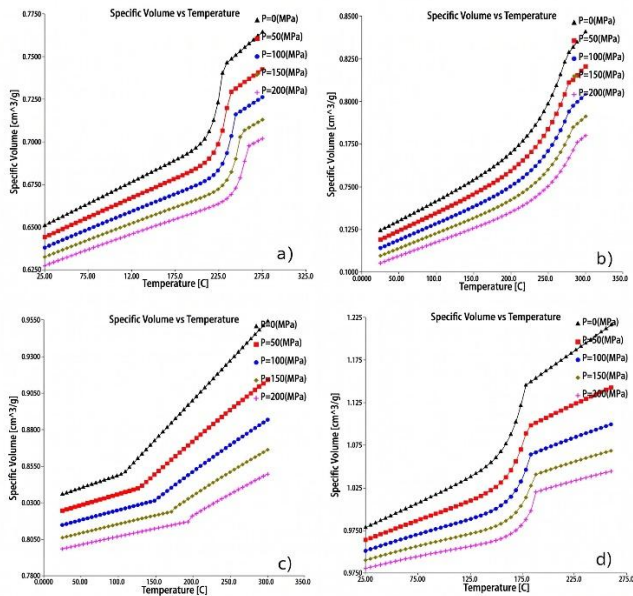
**Table 1.** Properties of materials.

Physical Properties	Ultradur B 4300 G6	Ultramid A3HG6 HR	Cycloyl CX7240	ME212U
Polymer Base	PBT-GF30	PA66-GF30	PC/ABS	PP-TD20
Filler Content	30% Glass Fiber	30% Glass Fiber	Unfilled	20% Talc
Mold SurfaceTemp (°C)	80	85	85	45
Melt Temperature (°C)	270	290	290	240
Melt Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.31	1.14	0.98	0.88
Solid Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.53	1.37	1.13	1.05
Elasticity Mod. (MPa)	9500	10000	2400	2800
Max Shear Stress (MPa)	0.26	0.30	0.20	1.05
Thermal Cond. (W/m·K)	0.24	0.26	0.19	0.21



**Figure 3:** Viscosity vs shear rate of a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

The chosen materials are a reflection of different polymer structures and reinforcement systems which are widely used in the automotive electrical sector. PBT-GF30 and PA66-GF30 were chosen as glass fiber, reinforced semi-crystalline engineering polymers because of their high stiffness, thermal resistance, and capability of being physically loaded fuse box housings [34-35]. PC/ABS was picked as an amorphous polymer blend for its dimensional stability, impact resistance, and relatively isotropic shrinkage behavior [37]. PP-TD20 was selected as a talc-filled semi-crystalline polyolefin for evaluating a lightweight and inexpensive mineral reinforcement alternative [36].

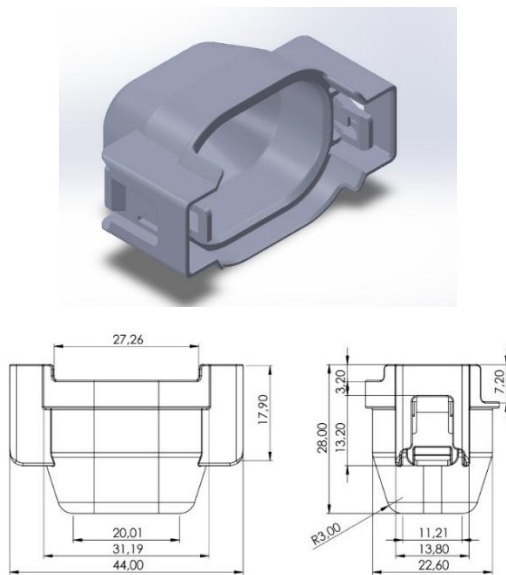


**Figure 2:** Specific volume vs temperature a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

Identifying amorphous and semi-crystalline structures is very important when dealing with injection molding results. Semi-crystalline polymers, in general, have a higher volumetric shrinkage as a result of crystallization during cooling, and orientation of fiber or filler may lead to further anisotropic deformation. On the other hand, amorphous PC/ABS does not experience crystallization; hence, its shrinkage behavior is primarily dominated by thermal contraction which results in more uniform dimensional stability and less warpage tendency [37].

## 2.2 Model and Mesh

The component analyzed in this study is the automotive fuse box housing which is a primary interface of the vehicle motor compartment for electric distribution and protection, a critical structural enclosure. As per the technical drawings, the part geometry is very compact and rugged design with maximum 44.00 mm width, 22.60 mm depth and overall 28.00 mm height dimensions. The housing is a sophisticated part with features like internal ribs for safe and secure mounting, ergonomic contours and functional snap-fit structures (e.g. 13.20 mm lateral locking mechanisms). The architectural structure comprises complicated thin-walled regions with critical internal sections that range between 11.21 mm to 20.01 mm and sharp geometric transitions that make the part very sensitive to differential warping and volumetric shrinkage during the injection molding cycle. The visuals of the 3-dimensional model of this part are illustrated in Figure 4.

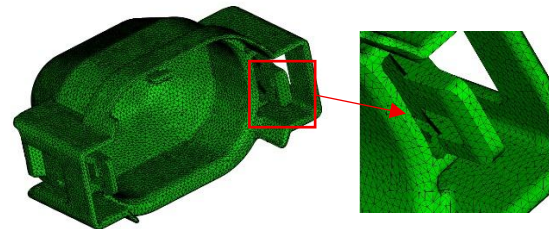


**Figure 4:** 3D model and technical drawing.

3D tetrahedral elements with very high accuracy were employed in all the models, since resolving this geometric complexity, especially curved surfaces and corner radii, required such high precision elements. Due to the intricate internal configuration of the fuse box housing featuring snap-fit connections and sharp geometric changes, an unstructured tetrahedral mesh was indispensable in this research. Mesh quality

parameters such as aspect ratio and element distortion were mainly controlled to their strictest level, and local mesh refinement was carried out in the critical thin-walled regions to reduce the related drawbacks.

The final mesh consisting of 470540 tetrahedral elements and 89769 connected nodes has ensured the resolution necessary to follow the local flow oscillations. When the volume of the total mesh is considered, excluding the cooling channels and mold inserts, the volume equivalent to the cavity was recorded to be 3,857 cm<sup>3</sup>. To assure numerical stability, the mesh quality criteria were rigorously monitored; also, the mean aspect ratio was optimized to 3.69, with the highest and lowest values being 22.56 and 1.06, respectively. Furthermore, the maximum recorded two-face angle was 171.1°, which is still within the acceptable limits for accurate finite element computation. This level of discretization highlights the local thinning in the very sensitive regions where the shrinkage effects and fiber induced stresses are expected to be the most prominent. The mesh view of the model is presented in Figure 5.



**Figure 5:** Mesh model.

## 2.3 Boundary Conditions and Process Parameters

Numerical simulations have been performed with advanced Filling + Packing + Warpage analysis sequence in Autodesk Moldflow Insight 2016 environment which is targeted to isolate thermo-mechanical effects of different polymer matrices and reinforcement types. To achieve high degree of correlation with real world industrial conditions, process parameters have been deliberately calibrated according to the rheological and thermodynamic requirements of each candidate material. An essential aspect of experimental design was to apply material-specific melt and mold surface temperatures reflecting the optimum

processing intervals; in particular, PBT-GF30 melting point was kept at 270°C, PA66-GF30 and PC/ABS at 290°C and mineral filled PP-TD20 at 240°C; conversely, mold temperatures were adjusted at 80°C, 85°C and 45°C, respectively, to provide controlled cooling rate and stable solidification front along the complex geometry of fuse box housing.

The filling stage was designed under the flow rate control regime to achieve a balanced filling pattern in complexly shaped cavity parts. Due to the natural differences in the melting viscosities and thermal conductivities between the semi-crystalline reinforced grades and amorphous blends, injection times have been dynamically optimized. This optimization results in a filling time of 0.29 s with the PBT and PC/ABS systems, while the highly fluid PA66-GF30 and PP-TD20 resins required accelerated filling profiles of 0.17 s and 0.16 s, respectively. To facilitate a smooth transition from speed-controlled filling to pressure-controlled packing, the speed-pressure (V/P) transition was decided by setting a solid injection pressure threshold of 250 MPa. This high pressure threshold has been strategically chosen to prevent early gate freezing and to ensure that the cavity is volumetrically saturated before the packing stage is initiated.

Heat transfer from the mold surface to the molten polymer was represented by using a constant interfacial heat transfer coefficient (HTC) at the mold, part interface. For this research, an HTC value of 7, 500 W/m<sup>2</sup>·K was used, which is within the typical range in injection molding simulation literature. This number stands for the effective heat transfer at high contact pressure during filling and packing stages and also factors in the average influence of local variations due to increased contact resistance during solidification.

Specifications for the mold walls were made with a constant temperature boundary condition (Dirichlet boundary condition), and the mold temperatures, as presented in Table 2, were used. Heat transfer in the part was addressed by the transient three-dimensional heat conduction equation, and characteristics such as thermal

conductivity, specific heat, and PVT data of the material were taken directly from the Moldflow database.

The chosen heat transfer model allows for the precise determination of cooling rates, advancement of solidification front, and temperature gradients inside the part, which in turn makes it possible to accurately predict residual stresses, volumetric shrinkage, and warpage that occurs in the final product.

To consider anisotropic shrinkage phenomenon, which by the way is the typical feature of fiber reinforced thermoplastics, an advanced fiber orientation analysis was integrated with simulation for the PBT-GF30 and PA66-GF30 configurations. This analysis was aimed at calculating the fiber orientation tensor which is key to predicting the direction dependent elastic modulus and ultimately warpage behavior through the Folgar-Tucker model. During the packing phase, a time-wise volumetric % fill pressure profile was applied which allowed to have a precise volumetric balancing mechanism that also reduces sink marks and dimensional instability. Lastly, the cooling time was set to be automatically calculated and the solver was allowed to determine the transient heat distribution needed for the part to reach ejection temperature based on the specific enthalpy and thermal diffusivity of each polymer system. This standardized but material-optimized boundary setup has provided a solid framework for a comparative evaluation of how macromolecular architecture and filler morphology can affect the final precision of automotive electrical enclosures.

Applying the same process parameters to different materials could produce results that do not reflect reality on a physical level this is especially true for the problems of incomplete filling, over-large shear stresses, or totally unrealistic pressure requirements with high-viscosity or semi-crystalline polymers.

Here the process parameters were not the same for all materials but each material got its process parameters based on its rheological and thermophysical properties. Describing in this way, each material will be treated as a real and

appropriate processing candidate during the injection molding process. The parameters are given in Table 2.

**Table 2:** Process parameters.

Parameter	PBT-GF30	PA66-GF30	PC/ABS	PP-TD20
Melt Temp. (°C)	270	290	290	240
Mold Surface Temp. (°C)	80	85	85	45
Filling Control	Flow rate	Flow rate	Flow rate	Flow rate
Injection Time (s)	0.29	0.17	0.29	0.16
Packing Control	%Fill Pres.	%Fill Pres.	%Fill Pres.	%Fill Pres.

### 2.4 Method

Despite the standard product requirements, complex geometries may come across production instabilities due to material mechanical and thermal characteristics; thus, finite element method (FEM) divides the component into 470, 540 tetrahedral elements and provide a solid frame to study the thermo-mechanical behaviors with very high accuracy. The flow behavior of the melt polymer and its final dimensional stability are determined by the mass, momentum, and energy conservation laws along with shrinkage-based stress equations. This integrated numerical approach is essential to optimize the manufacturing cycle and ensure structural integrity of the fuse box housing in the selected systems PBT, PA66, PC/ABS and PP within the acceptable engineering limits.

The main system of detailed equations that form the basis of the simulation is presented below:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

The  $\rho$  here stands for density, and  $u$  for the velocity vector; they together ensure the mass balance in the system.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (2)$$

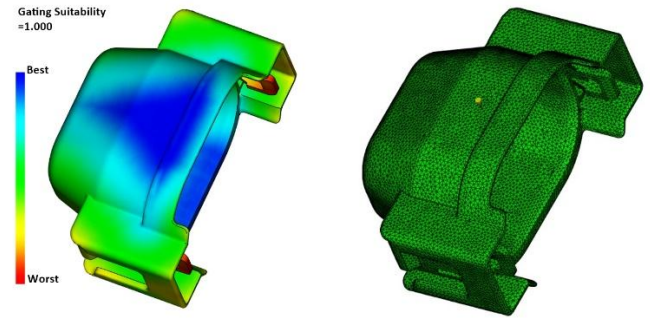
It describes the movement of the melt under pressure ( $p$ ) and shear stress ( $\tau$ ) in the mold.

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{sh} \quad (3)$$

Total deformation ( $\varepsilon$ ); Determining final warpage by calculating change components due to elastic, thermal and shrinkage as sum of each single one.

### 2.5 Gate Location Design

Afterwards, to ensure the balanced distribution of polymer melt and to prevent the flow-induced instabilities inside the insulator box body, a comprehensive Entrance Point Position Analysis was conducted to find the optimum injection point, which is a critical procedural step. The optimized injection point, as shown in Figure 6, was chosen as the balanced filling node of the model; thus, while other common defects such as air traps and delays are minimized, production efficiency and molding accuracy are maximized. Misconfiguration of injection point is one of the main sources of structural failure and shrinkage-induced warping. This stage is very important from the point of view of improving the quality of the part while at the same time minimizing production errors.



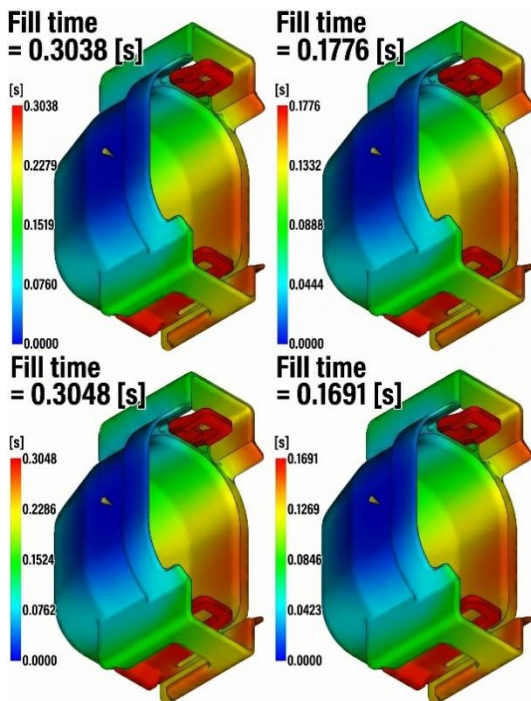
**Figure 6:** Gate Location.

## 3. ANALYSIS RESULTS

### 3.1 Fill Time

Analysis of the Filling Time indicates that all four candidate materials are capable of filling the automotive fuse box cover geometry without short shots. However, a substantial difference in rheological behavior was still observed: polyolefin based ME212U (PP-TD20) and Ultramid A3HG6

HR (PA66-GF30) have exhibited excellent flow properties with filling times less than 0.18 seconds. On the other hand, Cycloy CX7240 (PC/ABS) and Ultradur B 4300 G6 (PBT-GF30) needed about 75% more time to fill the cavity under the same constraints which also indicates higher viscosity and potentially increased injection pressure requirements. From a processing efficiency point of view, while PP-TD20 is capable providing the widest processing window, PC/ABS may need a tighter thermal control to avoid shear-induced degradation during the high-speed filling stage.

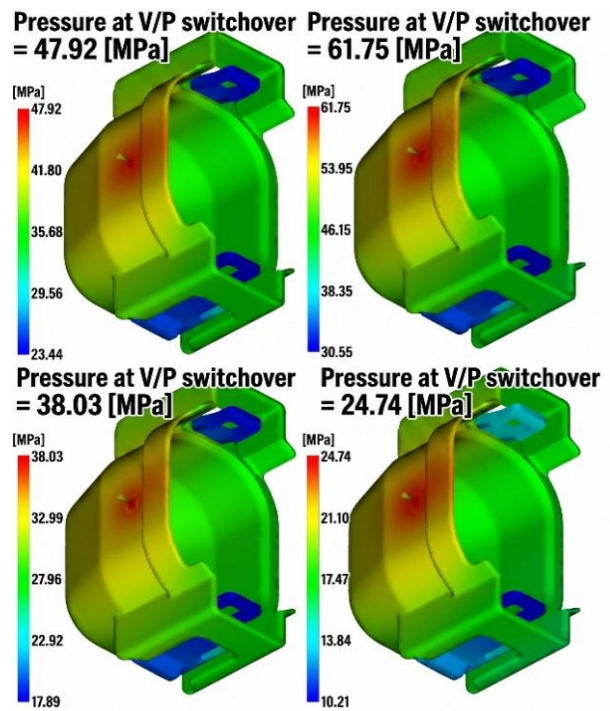


**Figure 7:** Fill Time results for a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

### 3.2 Pressure at V/P switchover

Pressure analysis at the V/P transition point shows that ME212U (PP-TD20) provides the best processing profile and requires the lowest injection pressure of 24.74 MPa to achieve full cavity volume. On the other hand, Ultradur A3HG6 HR (PA66-GF30) due to the flow resistance originating from the glass fiber and the high injection speed required for this grade, the synergetic effects lead to the highest pressure (61.75 MPa) demand. Despite these differences, all four materials remain within the safety working range of standard injection molding equipment (<70 MPa), allowing the

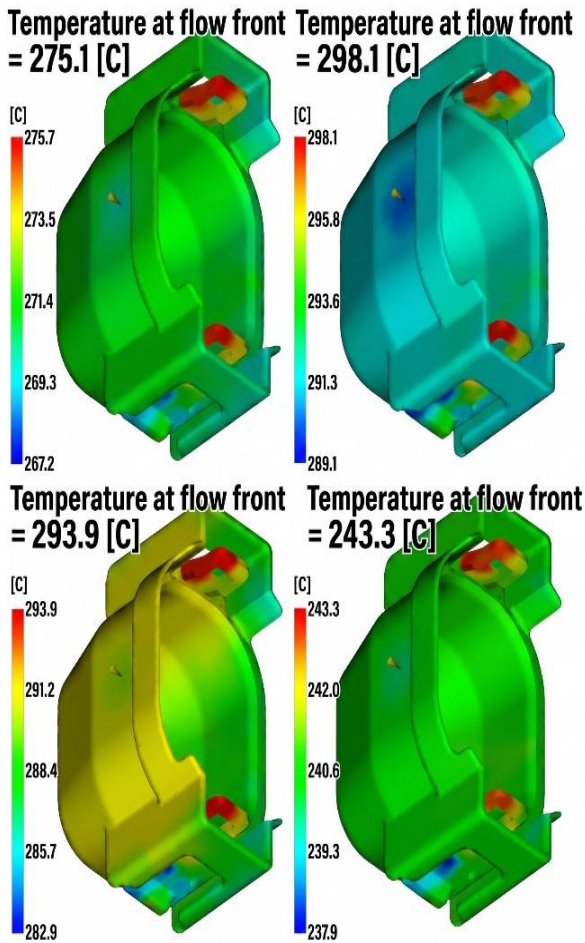
production of the fuse box cover with a high degree of structural integrity and low risk of mold wear or flash.



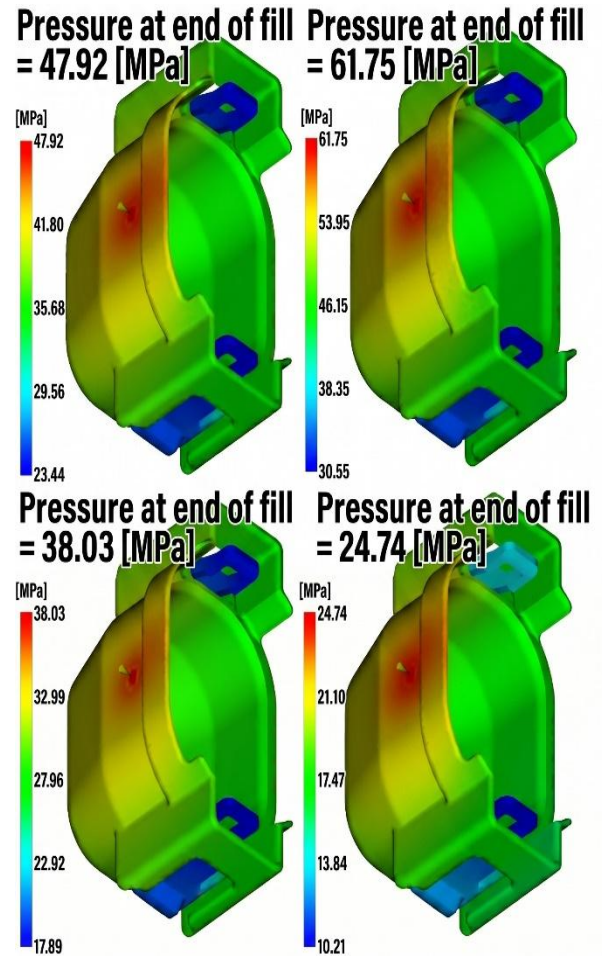
**Figure 8:** Pressure at v/p switchover a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

### 3.3 Temperature at front flow

Flow Front Temperature analysis reveals that all four materials have retained enough thermal energy for complex features of a fuse box cover to be completely filled. ME212U (PP-TD20) displayed the highest thermal stability with the lowest temperature deviation of 5.4°C. On the other hand, Cycloy CX7240 (PC/ABS) and Ultradur A3HG6 HR (PA66-GF30) exhibited local temperature rises in joint geometries of snap fit due to high cutting speeds. These increases facilitate the filling of thin-walled sections but require careful injection velocity profiling to prevent local thermal degradation. For automotive applications, where the integrity of snap fit is of utmost importance, PBT-GF30 and PA66-GF30 are preferred due to their ability to maintain high flow front temperatures; this facilitates superior molecular orientation at potential weld line locations.



**Figure 9:** Temperature at front flow a) PBT b)PA66 c) PC/ABS d) PP.



**Figure 10:** Pressure at end of fill a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

### 3.4 Pressure at end of fill

After analysing the final fill pressure of the container, the manufacturability of the four material candidates for the automotive fuse box cover was also confirmed; the peak pressures were still within the optimum range of 24 to 62 MPa. ME212U (PP-TD20) outperformed the Ultramid A3HG6 HR (PA66-GF30) in terms of processibility, as it required 60% less pressure in the extrusion process. The markedly higher pressure requirement of PA66-GF30 is associated with the glass fiber reinforcement having a synergistic effect and also the high-speed injection necessary to prevent early solidification of the thin-walled snap-fits. All materials are suitable; however, the lower pressure requirements of PP-TD20 and PC/ABS indicate a wider processing range, reduction of tool wear, and decrease of deformation potential due to residual stresses.

### 3.5 Volumetric shrinkage

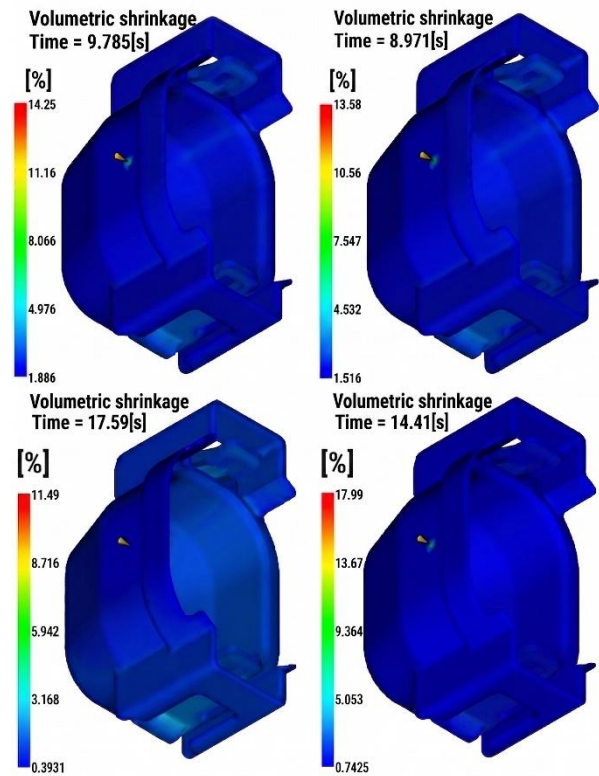
The shrinkage phenomenon does not only pertain to volumetric change but is also influenced by crystallization kinetics and cooling rate. For semi-crystalline polymers (PBT-GF30, PA66-GF30, and PP-TD20), from the molten phase to the solid phase, a considerable volumetric contraction is observed due to the formation of the crystalline structure. Furthermore, this phenomenon is not only time-dependent but is also location-dependent as the temperature gradients inside the mold and the cooling rate lead to variations in shrinkage, which in turn, cause warpage.

Besides, it is well known that thick parts cool down slowly and this is able to keep crystal formation process going for a while and thus these areas undergo larger volume reduction. On the other hand, it is well documented that thin walls cool

down very quickly and as a result, the crystallization is almost stopped and therefore this part of the component undergoes minimal shrinkage. Crystallization not being a factor in the case of the amorphous PC/ABS material, volumetric changes are governed by thermal expansion coefficient only. That leads to isotropic shrinkage and very well controlled shrinkage. Hence, low warpage of PC/ABS together with excellent dimensional stability is one of the greatest advantages of this material.

Volume shrinkage analysis reveals the main differences in material classes. Amorphous based Cypoloy CX7240 (PC/ABS) with a shrinkage rate of 11.49%, highest dimensional stability amongst the samples, turned out to be a perfect candidate for precisely mating automotive bodies. Semi-crystalline ME212U (PP-TD20) showed the most negative results with a volume shrinkage rate as high as 17.99%, that is incompatible with the risk of sinking marks and assembly errors getting through the roof. Glass fiber reinforced PBT and PA66 exhibited moderate levels of shrinkage, however, their performance is very much determined by the fiber orientation. For a fuse box cover where sealing integrity and snap-fit joint reliability are of utmost importance, PC/ABS will present the most robust production range while PP-TD20 will require aggressive packing strategies and potential mold size compensations.

To reduce shrinkage in PP-TD20, the packing pressure should be increased to 70–90% of the maximum injection pressure, and the packing time should be extended until the gate freeze-off stage. This ensures continued material feeding during solidification, thereby reducing volumetric shrinkage and sink marks. However, excessive pressure may increase residual stresses; therefore, the pressure–time profile should be optimized.



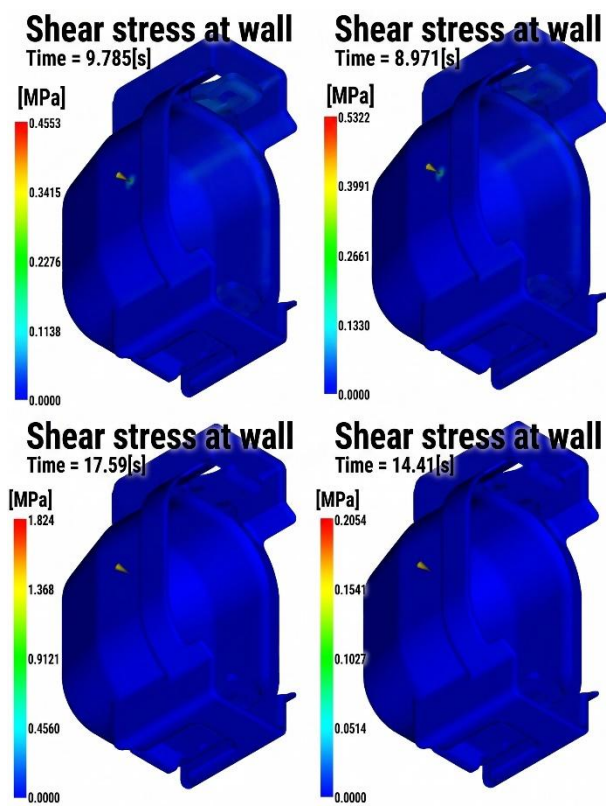
**Figure 11:** Volumetric shrinkage a) PBT b) PA66 c) PC/ABS d) PP.

### 3.6 Wall shear stress

Analyzing the shear stress on the walls reveals that a key rheological challenge arises for Cypoloy CX7240 (PC/ABS) material in the current mold design; here the maximum stress has reached 1.824MPa, which is far above the threshold recommended for preserving the both surface and structural integrity. On the other hand, ME212U (PP-TD20) has exhibited a most favourable behavior at 0.2054 MPa due to its low melt viscosity and superior shear-thinning characteristics. Glass fibre-reinforced PBT and PA66 grades have exhibited acceptable stress levels (~0.5 MPa) but they remain vulnerable to localized orientation in snap-fit geometries. For automotive applications where the chemical resistance and snap-fit lifetimes are required, the excessive wall stress in PC/ABS indicates a high risk of premature failure due to stress-induced degradation or environmental stress cracking (ESC).

Although PC/ABS exhibits superior dimensional stability and low warpage, the high wall shear stress value of 1.824 MPa represents a critical

processing limitation. This behavior is primarily attributed to its relatively high melt viscosity and shear-sensitive rheological response. This trade-off can be mitigated through process and mold design optimization, such as increasing the gate size and reducing the injection speed. However, these modifications may lead to longer filling times and increased cycle time, as well as potential effects on cooling behavior and shrinkage. Therefore, PC/ABS should not be considered as an inherently optimal material, but rather as a conditionally suitable candidate when appropriate processing adjustments are applied.



**Figure 12:** Wall shear stress a) PBT b) PA66 c)PC/ABS d) PP.

### 3.7 Warpage

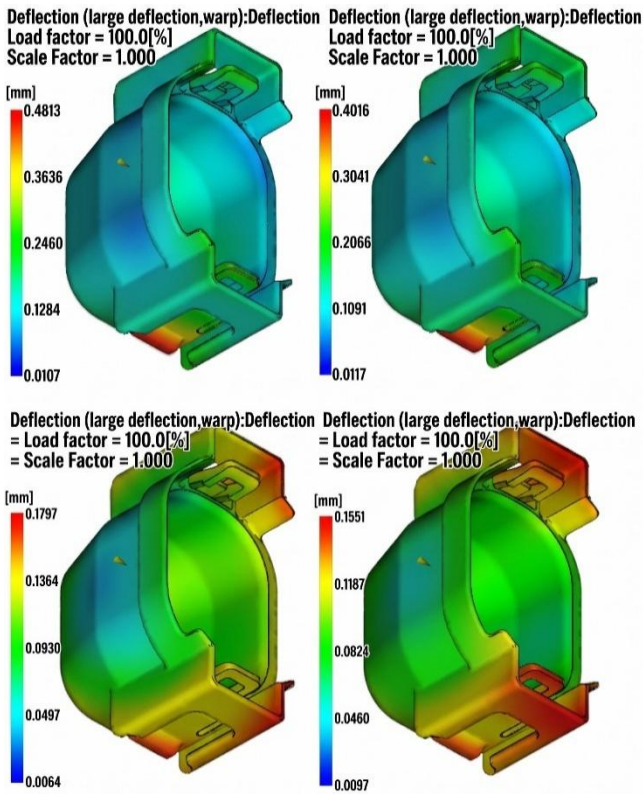
Shrinkage is one of the contributing factors towards warpage occurring. However it is not the only factor causing warpage. A combination of stress that was left inside, temperature difference, and material's anisotropic properties also contribute to warpage. When the pressure during a stage is obtained, the pressure distribution may lead to unevenly distributed temperature inside the part so various parts are crystallized and shrunk at various

times and rates. Varied shrinkage causes residual stresses which finally leads to deformation when the part is released. However, variations in different parts of the molded article may cause shrinkage since thicker sections cool down less quickly, so they have higher temperature gradients and are therefore the main places of the buildup of residual stresses. On the other hand, thin-walled parts mainly experience rapidly cooling as well as molecular changes in orientation due to flow in the cavity. Fiber-reinforced parts get the above situation exaggerated by differences in regional stiffness resulting in increased anisotropic shrinkage and warpage. So higher warpings observed in PBT-GF30 and PA66-GF30 were due to fiber orientation along with thermo-mechanical residual stresses.

Warpage analysis shows a clear difference between fiber-reinforced engineering plastics and mineral-filled or amorphous blends. ME212U (PP-TD20) and Cycloxy CX7240 (PC/ABS) show great dimensional stability as their maximum deviations are 0.155 mm and 0.180 mm, respectively. This is due to the fact that talc-filled and amorphous systems have more isotropic shrinkage behavior.

The PBT-GF30 and PA66-GF30 have much higher deformation, up to 0.481 mm, because of anisotropy caused by fibre orientation. As fuse box covers require very tight sealing and snap-fit alignment, PC/ABS and PP-TD20 seem to be more reliable design materials that will not only minimize the risk of assembly misalignment but also prevent leakage of secondary sealing.

Not including cooling channels in the model gives a more perfect representation of the thermal field which can lead to a different assessment of the extent of warpage behavior. Actually, non-uniform cooling conditions present in actual molds can increase differential shrinkage and residual stress formation which in turn leads to more substantial warpage. As a result, the warpage findings disclosed should be taken only within this limitation. The incorporation of cooling channel design in the model is planned in the next work for more accurate thermal and deformation analyses.

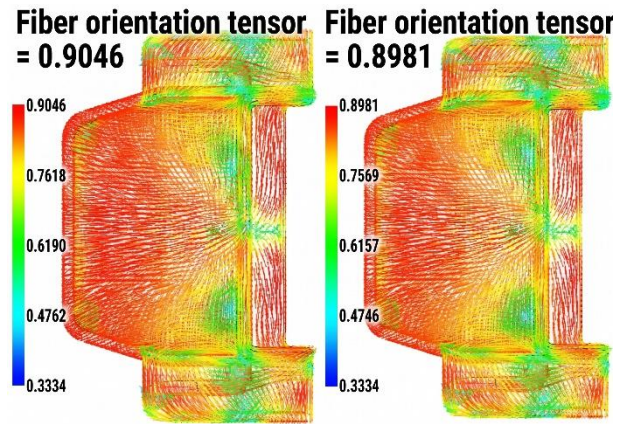


**Figure 13:** Warpage results a) PBT b) PA66  
c)PC/ABS d) PP.

### 3.8 Fiber Orientation

Figure 14 clearly shows a strong orientation of the fibers along the flow direction. The alignment of the fibers with the main flow direction is especially predominant in narrow parts, where flow is accelerated, and in snap-fit regions. On the other hand, in areas where the flow decelerates or changes direction, the orientation of fibers becomes more random. Such a pattern of orientation results in fiber-reinforced semi-crystalline polymers having elastic properties that vary with direction, which in turn, affects the anisotropic shrinkage and the subsequent warpage.

Relatively larger warpage values seen in PBT-GF30 and PA66-GF30 can be explained by the directional stiffness differences that emanate from the fiber alignment along the flow direction. Consequently, the results of fiber orientation distribution are regarded as one of the main factors that justify the physical explanation of the warpage behavior.



**Figure 14:** Fiber Orientation a) PBT b) PA66.

To provide a clearer and more systematic comparison of material performance, not only maximum values but also the distribution ranges of key simulation outputs are presented in Table 3. This approach enables a more comprehensive evaluation of process stability, variability, and material behavior under different processing conditions.

**Table 3:** Comparative Results.

Parameter	PBT-GF30	PA66-GF30	PC/ABS	PP-TD20
Fill Time (s)	0.29	0.17	0.29	0.16
Injection Pressure (MPa)	~45	61.75	~50	24.74
Pressure at End of Fill (MPa)	~48	~62	~52	~25
Temperature Deviation (°C)	~7-8	~6-7	~6-7	5.4
Volumetric Shrinkage (%)	~13-14	~12-13	11.49	17.99
Max Wall Shear Stress (MPa)	~0.5	~0.5	1.824	0.205
Warpage (mm)	0.481	~0.45	0.180	0.155
Fiber Orientation Effect	High	High	-	Low
Dimensional Stability	Medium	Medium	High	High

Studies investigating experimental outcomes reported in scientific journals reveal that glass fiber reinforced semi-crystalline polymers (PA66-GF30 and PBT-GF30), as a result of fiber orientation towards the main flow direction of the melt within the mold, have been found to exhibit anisotropic shrinkage. They were also found to be most susceptible to warpage at cantilever snap-fit zones which was confirmed experimentally [33,34]. Likewise, deformation patterns of talc-filled polypropylene (PP-TD20) dominated by filler orientation show a very strong matching with experimental observation reported in the literature [35]. On the other hand, due to the amorphous nature of ABS that is by definition non-crystallizing and having inherently isotropic shrinkage, it leads to the minimum values of warpage and the highest dimensional stability which is in line with the expectations reported in earlier experimental work; this has also been validated by the present simulation model [36].

#### 4. CONCLUSIONS

The detailed Moldflow study of an automotive fuse box cover made from four different polymers, Ultradur B 4300 G6 (PBT-GF30), Ultramid A3HG6 HR (PA66-GF30), Cypoloy CX7240 (PC/ABS), and ME212U (PP-TD20), has exposed how the rheological nature, thermodynamics, and accuracy of the final product interact with each other. Among those, the polyolefin-based ME212U shows the best filling profile with the lowest injection pressure (24.74 MPa) and the least wall shear stress (0.2054 MPa). Yet, the considerable volumetric shrinkage (17.99%) and the large specific volume collapse as illustrated by the PVT data are sources of major worries for sink marks and dimensional variations, especially in the thickest parts.

On the other hand, the nearly amorphous and copolymer-rich Cypoloy CX7240 (PC/ABS) is touted as the best in terms of dimensional accuracy having the least total warpage (0.1797 mm) and the most consistent shrinkage pattern (11.49%) through its being free of a crystalline phase transition "knee point." Yet, the requirement for the highest wall shear stress at the gate (1.824 MPa) means that a

bigger gate or lowered injection speed are very much needed without compromising the rest of the cycle time to prevent localized thermal degradation and surface roughness.

Fiber-reinforced plastics having glass fiber as reinforcement namely PBT-GF30 and PA66-GF30, excel in mechanical property enhancements but pose huge challenges in control of geometrical anisotropy owing to fiber orientation as well as residual stresses. Based on our results PBT-GF30 records the highest discrepancy 0.4813 mm, which is almost at the tolerance edge limit for automotive assembly and sealing integrity. Besides, local shear heating at snap-fit locations was common for all materials and especially the PA66 and PC/ABS types suggesting that these features might suffer from brittleness upon high-temperature exposure if processing is not carefully controlled.

Henceforth, Cypoloy CX7240 can be considered as a promising candidate material for automotive components requiring high-precision assembly and structural stability under engine conditions, provided that appropriate process and mold design optimizations are implemented to control shear stress levels. In contrast, PBT-GF30 exhibits the highest deformation tendency under the current conditions and would require significant mold and process modifications to achieve acceptable dimensional performance.

At the production line, efforts should mainly go into fine-tuning packing schedules for lowering shrinkage in semi-crystalline barriers and using well balanced cooling circuits for minimizing stress caused by uneven cooling at the part ends. Possible topics for future study include long-term thermal cycling effects on snap-fit retention force changes and the development of sequential valve gating technique in the attempt to further equalize flow front temperatures and diminish weld line visibility noted during the first stage of filling in simulation.

Increasing the thickness of the walls makes it easier for the molten plastic to get through the mold since there will be less resistance to the flow and the material will stay liquid for a longer time; however, the heat differences that will come about in the thick

parts of the piece may lead to differential shrinkage and warpage, which are undesirable effects. On the other hand, the thin-walled areas are mainly influenced by rapid cooling, flow freezing and the exertion of high shear stresses. Thus, studying changes in wall thickness will provide better insights into the material, process, design interplay, especially when dealing with complicated automotive parts. Developing numerical analysis of different wall thickness cases will be the focus of future research.

**Author Contribution:** All authors conceived the study, collected and organized the data, conducted the analysis, and interpreted the findings. The author wrote the manuscript, discussed the results within the context of the study, and finalized the paper.

**Conflicts of Interest:** The author declares that there is no conflict of interest.

## 5. REFERENCES

- [1] N. O. Potuk, M. Oksuz, A. Ekinci, M. Ates, and I. Aydin, "Optimization of injection molding processing parameters for thin-walled plastic parts manufactured for the automotive industry," *Polymers*, 18(1), 91, 2026.
- [2] C.-C. Cazacu, T. C. Nasu, M. Hanga, D.-A. Cazacu, and C. E. Cotet, "Smart manufacturing workflow for fuse box assembly and validation: A combined IoT, CAD, and machine vision approach," *Appl. Sci.*, 15(17), 9375, 2025.
- [3] J. K. Yang and Y. J. Xu, "Warpage analysis of injection molding based on mold flow," *Adv. Mater. Res.*, vol. 538–541, 1192–1196, 2012.
- [4] Z. Song, S. Liu, X. Wang, and Z. Hu, "Optimization and prediction of volume shrinkage and warpage of injection-molded thin-walled parts based on neural network," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 109(3), 755–769, 2020.
- [5] F. Tan and B. Birişik, "Optimization of material and process parameters in the injection molding of piezoresistive card-type pressure sensors using the finite element method," *JSR-A*, (061), 100–115, 2025.
- [6] İ. C. Kaya, "Plastik enjeksiyon parametrelerinin otomotiv sigorta kutusunun modellenmesinde ve üretiminde boyutsal sapma değerleri üzerine etkileri," M.S. thesis, Pamukkale Univ., Denizli, Turkey, 2025.
- [7] M. Abasalizadeh, R. Hasanzadeh, Z. Mohamadian, T. Azdast, and M. Rostami, "Experimental study to optimize shrinkage behavior of semi-crystalline and amorphous thermoplastics," *Iran. J. Mater. Sci. Eng.*, 15(4), 41–51, 2018.
- [8] Y. Shao, C. Xue, M. Chu, and Y. Yang, "Residual fiber length and fiber orientation of anisotropic injection molded glass fiber reinforced polyamide 66 composites in experimental and numerical study," *Fibers Polym.*, 22(7), 1995–2005, 2021.
- [9] S. Ferdouse, F. A. Mozumdar, and Z. Hu, "Effects of injection molding process parameters on quality of discontinuous glass fiber-reinforced polymer car fender by computer modeling," *J. Compos. Sci.*, 9(11), 589, 2025.
- [10] A. S. Bahman, F. Iannuzzo, T. Holmgaard, R. Ø. Nielsen, and F. Blaabjerg, "Reliability-oriented environmental thermal stress analysis of fuses in power electronics," *Microelectron. Reliab.*, 76, 25–30, 2017.
- [11] E. Fernandez, E. Torres, I. Zamora, A. J. Mazon, and I. Albizu, "Thermal model for current limiting fuses installed in vertical position," *Electr. Power Syst. Res.*, v107, 167–174, 2014.
- [12] G. Chiriac, "Thermal analysis of fuses with variable cross-section fuselinks," *Electr. Power Syst. Res.*, 92, 73–80, 2012.
- [13] Y. Li and Z. H. Zhang, "Circuit testing system of vehicle fuse box based on LabVIEW," *Appl. Mech. Mater.*, 43, 132–136, 2011.
- [14] W. Hou, W. Zhang, X. Liu, Z. Wang, and M. Ding, "Failure analysis of aviation torsional springs," *Chin. J. Aeronaut.*, 24(4), 527–532, 2011.
- [15] W. Wang, Y. Luo, K. Yang, and C. Shang, "Multi-angle automotive fuse box detection and assembly method based on machine vision," *Measurement*, 145, 234–243, 2019.
- [16] M. S. Bhatia and S. Kumar, "Critical success factors of Industry 4.0 in automotive manufacturing industry," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, 69(5), 2439–2453, 2020.
- [17] H. Fatorachian and H. Kazemi, "A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: Theoretical operationalisation

- framework," *Prod. Plann. Control*, 29(8), 633–644, 2018.
- [18] M. Karakurt and A. Küçüker, "Araç sigorta kutularına hatalı sigorta yerleştirme tespitine yönelik şablon eşleştirme ve görüntü işleme tabanlı uygulama geliştirilmesi," in *Proc. ISAST: Int. Symp. Automot. Sci. Technol.*, Ankara, Turkey, 2023.
- [19] R. Curta, M. Steopan, C. Schonstein, and F. Ursa, "Automating the feeding of a fuse box for the auto industry," *Acta Tech. Napocensis- Ser. Appl. Math. Mech. Eng.*, 61(4), 671–676, 2018.
- [20] A. Plesca, "Numerical thermal analysis of fuse mounted on fuse holder," *Heat Transfer Eng.*, 36(18), 1518–1524, 2015.
- [21] L. G. Bujoreanu et al., "Thermal analysis of eutectic alloy at HBC fuses (Thermal analysis of fuse element-connector-electric wire system)," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 17(7-8), 1085–1092, 2015.
- [22] Y. Huang, "Knowledge-based parametric design of high-precision automotive fuse box," M.Phil. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Hong Kong Univ. of Science and Technology, Hong Kong, China, 2013.
- [23] J. Lin, M. Rickert, L. Wen, and A. Knoll, "Automotive fuse box assembly task with normal execution (Knowledge-augmented anomaly detection in small lot production)," in *Proc. ResearchGate Conf.*, Sinaia, Romania 2023.
- [24] C. C. Cazacu et al., "Optimizing assembly in wiring boxes using API technology for digital twin," *Appl. Sci.*, 14(20), 9483, 2024.
- [25] J. Kim et al., "Development of fuse box assembly machine for automobile," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 19(5), 142–149, 2002.
- [26] G. Hiyane-Nashiro et al., "Multi-objective optimization of injection molding process parameters for junction boxes based on BP neural network and NSGA-II algorithm," *Polymers*, 18(3), 577, 2025.
- [27] H. S. Kim, Y. T. Im, et al., "Gate location design in injection molding of an automobile junction box with integral hinges," *J. Mater. Process. Technol.*, 140(1-3), 110–115, 2003.
- [28] H. Oktem, T. Erzurumlu, and I. Uzman, "Optimization of injection-molding process for thin-walled polypropylene part using artificial neural network and Taguchi techniques," *Materials*, 13(23), 4158, 2021.
- [29] GoodTech Mfg & Engineering Data, "Challenges of molding a PA66+PPE part with intricate ribs for automotive electrical enclosures," *Industrial Molding Case Studies*, 2022.
- [30] Society of Plastics Engineers (SPE) / IMD, "Processing and molding polymers with nanometer titanates in automotive fuse box covers," in *SPE Tech. Papers*, 2021.
- [31] UL Prospector / SABIC Material Sciences, "Low warpage and injection molding behavior of flame-retardant PPE blends for photovoltaic/electrical junction boxes," 2022.
- [32] Massachusetts Institute of Technology (MIT) DSpace, "A power assessment of machining tools & injection molding systems," M.S./Ph.D. thesis, Massachusetts Inst. of Technol., Cambridge, MA, 2002.
- [33] Cadrex Plastics Engineering, "Transitioning outdoor electrical enclosures to plastic injection molding: Draft angles and wall uniformity," 2021.
- [34] H.-J. Chang and Z.-M. Su, "Optimizing glass fiber molding process design by reverse warping," *Materials*, 13(5), 1151, 2020.
- [35] Y. Ryu, J. S. Sohn, C.-S. Yun, and S. W. Cha, "Shrinkage and warpage minimization of glass-fiber-reinforced polyamide 6 parts by microcellular foam injection molding," *Polymers*, 12 (4), 889, 2020.
- [36] K. Shelesh-Nezhad and A. Taghizadeh, "Shrinkage behavior and mechanical performances of injection molded polypropylene/talc composites," *Polym. Eng. Sci.*, 47(12), 2124–2128, 2007.
- [37] M. Abasalizadeh, R. Hasanzadeh, Z. Mohamadian, T. Azdast, and M. Rostami, "Experimental study to optimize shrinkage behavior of semi-crystalline and amorphous thermoplastics," *Iran. J. Mater. Sci. Eng.*, 15(4), 41–51, 2018.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Borsa Operasyonları için Ölçeklenebilir Gerçek Zamanlı Endeks Yönetim Sistemi: BEYS Mimarisi ve Sistem Modeli

## *A Scalable Real-Time Index Management System for Stock Exchange Operations: Architecture and System Model of BEYS*

Murat Can Altun<sup>1</sup>, Ahmet Başgöze<sup>1</sup>, Özyavuz Topçu<sup>1</sup>, Altan Arı<sup>1</sup>, Ahmet Can Ramazanoğlu<sup>1</sup>  
Mehmet Göktürk<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Borsa İstanbul Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar, Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Geliş / Received: 06.04.2026

Kabul / Accepted: 20.04.2026

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Mehmet Göktürk [gokturk@gtu.edu.tr](mailto:gokturk@gtu.edu.tr)

**ÖZ:** Borsa endeksleri, portföy yönetimi, türev ürünler, ETF'ler ve piyasa gözetimi için temel referans göstergelerdir. Bu nedenle endeks üretim altyapısı, doğruluk, yeniden üretilebilirlik, düşük gecikme ve yüksek erişilebilirlik gereksinimlerini aynı anda karşılamalıdır. Borsa İstanbul'da kullanılan mevcut Endeks Hesaplama Sistemi (ICSII), Oracle veri tabanı kullanmaktadır. Endeks sayısı ve piyasa verisi hacmi arttıkça bu yapı disk G/Ç baskısı, ölçeklenebilirlik kısıtları, bakım zorluğu ve maliyet üretmektedir. BEYS; GAL tabanlı Core Message Stream, Java tabanlı servisler, SQL veri katmanı ve Histstore bileşeni içeren mesaj odaklı bir mimari benimsemektedir. Mimari, kritik hesaplama yolunda veri tabanı bağımlılığını azaltmayı, modül bazlı gözlemlenebilirliği artırmayı, yüksek erişilebilirliği desteklemeyi ve mevcut sistemle paralel çalışma yoluyla kontrollü geçiş sağlamayı hedeflemektedir. İlk ölçümler, 1000 bileşenli BigDecimal tick işleme süresinin 1-2 ms olduğunu, her saniye sürdürülebilir kapasitenin BigDecimal yapıda yaklaşık 500, Double yapıda ise her biri 0-1 ms içinde hesaplanacak şekilde yaklaşık 1500 endekse ulaştığını göstermiştir. Warmup adı verilen BigDecimal iyileştirme çalışmalarının ardından ise 0-1 ms'de 1000 endeksin hesaplanabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca darboğazın ic\_idxcalc'den ic\_idxmgr'e kayabildiğini ve büyük veri kümelerinde açılış davranışının ek bir ölçekleme sınırı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, BEYS'in borsa ölçeğinde gerçek zamanlı endeks üretimi için güçlü bir yeniden-mimari yön sunduğunu ve uçtan uca SLA doğrulaması için yönetsel temel oluşturduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Endeks hesaplama, gerçek zamanlı akış işleme, mesaj odaklı mimari, yüksek erişilebilirlik.

**ABSTRACT:** Stock indices are mission-critical benchmark indicators in portfolio management, derivatives, ETFs, and market surveillance; therefore, an index production platform must satisfy correctness, reproducibility, low latency, and high availability simultaneously. In Borsa İstanbul's current Index Calculation System (ICSII), remains coupled to the Oracle database layer. As the number of indices and the volume of market data increase, this design creates database I/O pressure, scalability constraints, maintenance complexity, and licensing cost. This paper presents the architecture, system model, findings for the system. BEYS adopts a message-driven architecture built on a GAL-based Core Message Stream, Java-based services, an SQL data layer, and a Histstore component. The design reduces database dependency on the critical computation path, improve module-level observability, availability, and enable controlled transition by parallel runs with the legacy system. Benchmarks show, under a 1000-constituent workload, warmup reduced BigDecimal tick-processing time from 1-2 ms to 0-1 ms, while sustainable per-second capacity reached from 500 indices to 1000 in the BigDecimal configuration and about 1500 in the Double configuration. The results also indicate that the bottleneck can shift from ic\_idxcalc to ic\_idxmgr and that startup behavior under large datasets becomes a scaling constraint. Overall, the study shows that BEYS offers a strong re-architecture direction for exchange-scale real-time index production and provides a methodological basis for end-to-end SLA validation.

**Keywords:** Index computation, real-time stream processing, message centered architecture, high availability.

## 1. GİRİŞ

Borsa endeksleri, sermaye piyasalarında piyasa performansının izlenmesi, portföylerin kıyaslanması, türev ürünlerin dayanak varlıklarının tanımlanması ve endekse dayalı yatırım araçlarının fiyatlanması açısından temel referans göstergelerdir. Borsalar açısından bu endekslerin doğru, tutarlı ve zamanında üretilmesi operasyonel bir gereklilik yanında aynı zamanda veri hizmetleri ve endeks temelli ürünlerin sürdürülebilirliği bakımından da kritik bir ihtiyaç olmaktadır [1].

Endeks hesaplama süreci anlık fiyatların bir araya getirilmesinden ibaret değildir. Endeks bileşenleri, serbest dolaşım oranları, pay miktarları, kurumsal aksiyonlar, dönemsel gözden geçirmeler ve bölen güncellemeleri ele alındığında, süreç zaman duyarlı ve durumlu bir hesaplama problemine dönüşmektedir. Bu nedenle endeks üretim altyapısının metodolojiye tam uyum sağlaması ve düşük gecikmeyle çalışması genellikle istenmektedir [2]-[5].

Borsa İstanbul'da halen kullanılan Endeks Hesaplama Sistemi (ICSII), endeks üretimini uzun süredir desteklemektedir. Bununla birlikte mevcut mimaride hesaplama fonksiyonlarının önemli bölümünün Oracle veri tabanı katmanında bütünleşik biçimde çalışması, artan endeks sayısı ve veri hacmi altında performans, ölçeklenebilirlik ve bakım açısından kısıtlar oluşturmaktadır. Disk G/Ç yükünün artması, yatay ölçekleme imkânlarının sınırlı kalması, geliştirme ve bakım çevrimlerinin uzaması ile lisans bağımlılığı mevcut yapının başlıca sorun alanlarıdır [6]. Özellikle her saniye üretilen gün içi endeks değerlerinin ortalama 300 ms, zirve durumda 1000 ms içinde hesaplanması hedefi dikkate alındığında, mevcut mimarinin uzun vadede aynı servis kalitesini koruyarak sürdürülebilmesi zorlaşmaktadır.

Çalışmada söz konusu kısıtları gidermek amacıyla geliştirilen Borsa İstanbul Endeks Yönetim Sistemi'ni (BEYS) ele alınmıştır. BEYS, endeks hesaplamayı veri tabanından ayırıştırır,

servis tabanlı, mesaj odaklı ve ölçeklenebilir bir mimari yaklaşım önermektedir. Bu yapıda hesaplama mantığı uygulama servislerine taşınmaktadır. Bileşenler ortak mesajlaşma katmanı üzerinden haberleşmekte, referans veriler ilişkisel veri tabanında yönetilmekte ve ham piyasa verileri ayrı bir saklama katmanında tutulmaktadır. Böylece kritik hesaplama yolunda veri tabanı bağımlılığının azaltılması, performans hedeflerinin etkin yönetilmesi ve sistemin artan iş yüküne esnek biçimde cevap verebilmesi amaçlanmaktadır. Tasarımda performans artışı yanında doğruluk ve kontrollü geçiş de hedefdir. Bu nedenle yeni sistemin mevcut yapı ile bir süre paralel çalıştırılması, aynı veri akışları altında sonuçların karşılaştırılması ve devreye almanın kademeli olarak yürütülmesi öngörülmektedir. Endeks üretimi gibi kritik bir alanda mimari dönüşüm riskinin azaltılması gerekmektedir.

Gerçek bir borsa işletim bağlamında endeks üretiminin mimari gereksinimlerini ortaya koyması ve bu gereksinimlere yanıt veren BEYS mimarisi ile sistem modelini sunması bu çalışmanın ana katkısıdır. Ayrıca mevcut sistemden yeni mimariye geçiş için önerilen doğrulama ve değerlendirme çerçevesini de tanımlamaktadır. Makalenin devamında önce ilgili literatür özetlenmekte, ardından problem tanımı ve yöntem açıklanmakta, sonrasında ise BEYS mimarisi, sistem modeli ve değerlendirme yaklaşımı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Çalışmanın katkıları üç başlıkta özetlenebilir:

- (i) Gerçek bir borsa işletim bağlamında, çok sayıda endeks türü ve katı gecikme hedefleri altında gereksinimlerin sistematik olarak tanımlanması,
- (ii) Mesajlaşma katmanı, servis ayırıştırması ve veri saklama kararlarını içeren BEYS mimarisi ve sistem modelinin sunulması,
- (iii) Doğrulama/benchmark yaklaşımı ve tartışma kısmında mimari kararların sınırlılıkları ile gelecek çalışma alanlarının ortaya konulması.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ VE MEVCUT ÇALIŞMALAR

### 2.1 Endeks Metodolojileri ve Hesaplama Karakteristiği

Endeks hesaplama metodolojileri, fiyat seviyesinin aritmetik birleşiminden ibaret değildir. Bileşen kümesi, ağırlıklandırma şeması (piyasa değeri, serbest dolaşım ayarlı piyasa değeri vb.), kurumsal aksiyon işleme kuralları, yuvarlama ve limit mekanizmaları ile bölen (divisor) güncellemeleri endeksin yeniden üretilebilirliğini belirleyen temel unsurlardır. Borsa İstanbul'un piyasa değeri ağırlıklı endeks metodolojisi, endeks değerinin bileşen fiyatları, pay adetleri ve serbest dolaşım oranları ile hesaplandığını, kurumsal aksiyonlar sırasında bölenin ayarlanması yoluyla endeks sürekliliğinin korunduğunu açık biçimde tanımlamaktadır [2]. Benzer şekilde uluslararası metodoloji dokümanları da bölümleri merkezî bir kontrol değişkeni olarak ele almaktadır. Standard & Poor's endeks matematiği rehberi, bölenin yapay sıçramaları önlemek için kullanıldığını, MSCI metodolojisi günlük ve gerçek zamanlı hesaplamada referans veri kümesi ile kurumsal aksiyon takviminin kritik rolünü, FTSE Russell ise endeks hesaplamasının veri kalitesi kontrolleriyle desteklenen kural tabanlı bir süreç olduğunu vurgulamaktadır [3]–[5]. Bu çerçevede, endeks üretiminin hesaplama hızıyla ve veri bütünlüğü ve metodolojiye sadakatle de tanımlandığını göstermektedir.

Endekslerin ekonomik ve tarihsel işlevine ilişkin çalışmalar bu teknik gereksinimleri destekler niteliktedir. Ripley, ulusal endeksler arasındaki sistematik bağlantıları tartışırken [7], Hautcoeur, endekslerin tarihsel gelişiminde ölçüm ve temsil problemlerine işaret etmektedir [8]. Endeks üretiminin aynı zamanda yönetim, şeffaflık ve tutarlılık gerektiren kurumsal bir süreç olduğunu bulgular ortaya koymaktadır. Dolayısıyla gerçek zamanlı endeks üretim sistemlerinin değerlendirilmesinde gecikme ve yönetsel doğruluk, veri kalitesi ve geriye dönük yeniden üretilebilirlik temel ölçütler arasında yer almaktadır.

### 2.2 Düşük Gecikmeli Gerçek Zamanlı İşleme Yaklaşımları

Finansal piyasalarda düşük gecikme gereksinimi, alım-satım sistemleri ve veri yayımı, risk ölçümleri ve endeks hesaplama gibi destekleyici ancak "görev kritik" sistemler için belirleyicidir. Spiers ve Wallez, Wall Street bağlamında yüksek başarılı hesaplamaların karar süreçlerine etkisini tartışarak donanım ve yazılım yığınında gecikmeyi azaltmaya yönelik yaklaşımları özetlemektedir [9]. Hızlandırma yönünde GPU tabanlı çalışmalar da özellikle paralel agregasyon ve vektörize hesaplamalarda dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır. Induwara ve Jayasena, GPU kullanımıyla endeks hesaplamasının hızlandırılabilirliğini göstererek hesaplama tarafındaki paralellik fırsatlarını ortaya koymuştur [10]. Bununla birlikte büyük ölçekli endeks üretiminde darboğaz çoğu zaman aritmetik işlem maliyeti ile sınırlı kalmamaktadır. Veri hareketi, durum yönetimi, hata toleransı ve bileşenler arası koordinasyon da uçtan uca performansı belirlemektedir.

Bu nedenle gerçek zamanlı akış işleme literatürü, finansal veri işleme problemleri için daha geniş ve daha uygun bir çerçeve sunmaktadır. Stonebraker ve arkadaşlarının tanımladığı gereksinimler, verinin hareket halinde işlenmesi, olay-tabanlı yaklaşım, durumun etkin yönetimi, zaman aşımı mekanizmaları ve yüksek erişilebilirlik gibi özellikleri öne çıkarmaktadır [11]. Endeks hesaplama gibi durumlu ve zaman duyarlı uygulamalar için bu önemlidir. Öte yandan Fernandes ve çalışma arkadaşlarının büyük veri akış platformlarını karşılaştıran çalışması, gerçek zamanlı analitikte gecikme/throughput dengesinin teknoloji seçimini belirleyen temel eksen olduğunu göstermektedir [12]. Literatür değerlendirildiğinde, endeks üretim sistemlerinde düşük gecikme için hızlı hesaplama motoru yanında, olay akışının, durum bilgisinin ve hata modellerinin mimari düzeyde birlikte tasarlanması gerekmektedir.

### 2.3 Mesajlaşma Olay Akışı ve Teslim Garantileri

Dağıtık endeks hesaplama mimarilerinde bileşenlerin ayrıştırılması ve veri akışının güvenilir biçimde yönetilmesi için mesajlaşma katmanı merkezi bir rol üstlenmektedir. Geleneksel mesaj kuyruğu yaklaşımlarına ilişkin performans çalışmaları, finansal uygulamalarda gecikme ölçümünün ve gerçekçi benchmark tasarımının kritik olduğunu göstermektedir [13]. Son yıllarda ise log-tabanlı event streaming platformları, yüksek throughput, kalıcı saklama ve tekrar oynatma yetenekleri nedeniyle gerçek zamanlı işleme senaryolarında öne çıkmıştır. Log-tabanlı event streaming platformları, düşük gecikmeli veri işleme senaryolarında literatürde yaygın biçimde tartışılmaktadır. Kafka ve Pulsar gibi sistemler, tekrar oynatma, ölçeklenebilir abonelik yapıları ve kalıcı mesaj saklama gibi özellikleri nedeniyle bu literatürde sık başvurulan örneklerdir [14]–[17]. Bununla birlikte bu çalışmada söz konusu platformlar, BEYS'in arka plan örnekleri olarak ele alınmaktadır.

Mesajlaşma altyapılarının seçimi mimari özelliklerin yanında iş yüküne bağlı ampirik performans verilerine de bağlıdır. Chy ve arkadaşları, Kafka, Pulsar, Artemis ve RocketMQ gibi JVM tabanlı kuyruk servislerini karşılaştırarak gecikme ve throughput profilinin mesaj boyutu, üretici-tüketici oranı ve abonelik topolojisine göre değiştiğini göstermiştir [18]. Benzer biçimde OpenMessaging Benchmark çerçevesi, farklı sistemlerin aynı test düzeneği altında ölçülmesini mümkün kılan pratik bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır [19]. Bulgular, endeks hesaplama gibi kuyruk ucu gecikmesine duyarlı uygulamalarda teknoloji seçiminin kurumsal veri kümeleri ve gerçekçi senaryolarla doğrulanmasına işaret etmektedir.

Finansal hesaplamalarda teslim garantileri de ayrı bir önem taşımaktadır. At-most-once, at-least-once ve exactly-once semantikleri, özellikle tekrarlı mesaj işleme ve durum güncellemesinin tutarlılığı açısından kritik tasarım kararları olmaktadır. Kafka'da idempotent producer ve işlemsel üretim

mekanizmalarıyla exactly-once semantiğine yaklaşan model tanımlanmıştır [20]. Pulsar da transaction desteği ile tüket-işle-üret desenlerinde atomikliği güçlendirmeyi amaçlamaktadır [21]. Literatür, bu garantilerin tek başına yeterli olmadığını, uygulama servislerinin idempotent tasarımı, deterministik durum yönetimi ve doğru senkronizasyon mekanizmaları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla mesajlaşma katmanı entegrasyon omurgası olma yanında doğruluk ve hata toleransı açısından sistem davranışını belirleyen temel bir mimari bileşen olarak ele alınmalıdır.

### 2.4 Veri Saklama İzlenebilirlik, Operasyonel Kullanılabilirlik

Endeks üretim sistemlerinde nihai endeks değerlerinin yanında ham piyasa verisinin ve ara durumların da izlenebilir olması gereklidir. Hata ayıklama, geriye dönük test, denetim izi oluşturma ve uyuşmazlık durumlarında kök neden analizi yapabilmek açısından bu gereksinim kritik rol oynamaktadır. Literatürde sütun-tabanlı dosya formatları büyük ölçekli analitik iş yükleri için sık tartışılrsa da, BEYS'in güncel uygulama yaklaşımında tarihsel fiyat, tarihsel varlık verisi ve endeks değerleri Histstore bileşeni üzerinden SQL veri saklama katmanına yazılmaktadır. Bu nedenle veri saklama mimarisi, ayrı bir dosya formatından çok operasyonel izlenebilirlik, sorgulanabilirlik ve mevcut sistem bileşenleriyle tutarlı veri yönetimi hedefleri çerçevesinde ele alınmaktadır.

Öte yandan endeks yönetimi arka plan servislerinin yanında operasyon personelinin kullandığı arayüzler de sistem güvenilirliğini etkileyen bir unsurdur. ISO 9241-210 standardı, etkileşimli sistemlerde insan-merkezli tasarımın yaşam döngüsü boyunca uygulanmasını, kullanıcı ihtiyaçlarının sistematik olarak çıkarılmasını ve tasarımın iteratif biçimde doğrulanmasını önermektedir [22]. Endeks yönetimi gibi operasyonel hata maliyetinin yüksek olduğu ortamlarda, görev akışlarının az adımda tamamlanabilmesi, yanlış işlem riskini azaltan arayüz kararları ve

kullanıcı geri bildirimleriyle iyileştirilen ekran tasarımları sistemin genel işletilebilirliğine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu nedenle veri saklama ve izlenebilirlik kadar, operasyonel kullanılabilirlik de gerçek zamanlı endeks yönetim mimarisinin tamamlayıcı bir boyutu olarak değerlendirilmelidir.

Literatür, endeks metodolojilerinin durum yönetimi ve veri kalitesi gerektirdiğini, düşük gecikmeli finansal sistemlerin akış işleme ve hata toleransı ilkeleriyle tasarlanmasını, mesajlaşma ve veri saklama katmanlarının bu hedeflerin gerçekleşmesinde önemli rol oynadığını belirtmektedir. Ancak borsa ölçeğinde çoklu endeks türünü tek yönetim çerçevesinde birleştiren, veri tabanı bağımlılığını azaltırken doğruluk, yeniden üretilebilirlikten ödün vermeyen uçtan uca mimari tasarımlara yönelen akademik çalışma sayısı azdır. Burada vaka çalışması ile mevcut boşluğa mimari düzeyde katkı hedeflenmiştir.

### 3. PROBLEM TANIMI

#### 3.1 İş Kapsamı ve Yük Karakteristiği

BEYS, Borsa İstanbul'da hesaplanan ve yayımlanan endekslerin tek bir çatı altında yönetilmesini hedefleyen bir yeniden-mimari (re-architecture) proje çalışması olarak başlamıştır. Proje kapsamında ele alınan endeks portföyü, 456 adet pay endeksi (152 gerçek zamanlı, 304 gün sonu), 62 adet BIST-KYD endeksi (45 gerçek zamanlı, 17 gün sonu), 20 adet risk kontrol endeksi, 6 adet kaldıraçlı ve ters endeks ile 4 adet altın bazlı endeksten oluşmaktadır. Görülen bu çeşitlilik, farklı veri kaynakları ve hesaplama kurallarının ortak bir işletim modeline taşınmasını gerektirmiştir.

İş yükü açısından endeks hesaplama, (i) yüksek frekanslı piyasa verisi güncellemelerinin akış olarak alınması, (ii) endeks kurallarına göre durum güncellemesi ve yeni endeks değerinin üretilmesi, (iii) hesaplanan değerlerin piyasa veri sistemine zamanında iletilmesi ve (iv) gün sonu süreçlerinde toplu hesaplama/raporlama çıktılarının üretilmesi aşamalarını içermektedir. Operasyon hedefi her saniye üretilen gün içi endeks değerlerinin ortalama 300 ms, zirve 1000 ms içinde yayımlanması

olmuştur. Bu gereksinim uçtan uca gecikme bütçesinin her bileşen için ölçülebilir hâle getirilmesini zorunlu kılmaktadır.

#### 3.2 Mevcut Sistem (ICSII) Bağlamı ve Gözlenen Kısıt Sınıfları

ICSII mimarisinde endeks hesaplama fonksiyonlarının veri tabanı katmanında bütünleşik çalışması, sistemin ölçek modelini büyük ölçüde veri tabanı sunucusunun kapasitesine bağımlı kılar. Endeks sayısı ve iş kuralları arttıkça, hesaplama sırasında oluşan yoğun okuma/yazma işlemleri disk G/Ç yükünü yükseltmektedir. Bu da gecikme jitter'ını artırarak deterministik zamanlama hedeflerini zorlaştırmaktadır. Ayrıca veri tabanı üzerinde özelleştirilmiş fonksiyonlar, sürüm yönetimi, test otomasyonu ve modüler geliştirme pratiklerini sınırlamakta ve lisans/işletim maliyetini yükseltmektedir [6].

Bu bağlamda problem, 'endeks hesaplamayı veri tabanı dışına çıkararak performans ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşan, ve mevcut sistemle uyumlu biçimde kademeli devreye alınabilen bir endeks yönetim mimarisini' tasarlama ve uygulama olarak tanımlanabilir. Problem tanımı bileşen ayrıştırması, veri yaşam döngüsü, teslim garantileri ve operasyonel gözlemlenebilirlik (observability) gibi sistem mühendisliği boyutlarını içermektedir.

**Tablo 1:** Fonksiyonel olmayan gereksinimler.

Gereksinim	Hedef / Açıklama
Gün içi gecikme bütçesi	Endeks değeri üretimi ve yayımı için ort. 300 ms, zirve 1000 ms hedefi
Yüksek erişilebilirlik (HA)	Bileşen arızalarında hızlı failover, servis kesintisinin azaltılması
Veri güvenliği	Mesaj ve durum kaybına karşı kalıcı depolama ve geri kazanım, denetlenebilir iz kayıtları
Yatay ölçeklenebilirlik	Endeks/servis bazında paralelleşme, kaynak artırımıyla lineer ölçek
Sürdürülebilirlik ve maliyet	Veri tabanı bağımlılığının azaltılması, açık kaynak bileşenlerle işletim maliyetinin düşürülmesi

### 3.3 Gereksinimler

Fonksiyonel ve fonksiyonel olmayan başlıklarda gereksinimler ele alınabilir. Fonksiyonel olarak sistem özellikle endeks tanımları ve bileşen yönetimi, kurumsal aksiyon işleme, gün içi ve gün sonu hesaplama süreçleri, hesaplanan endekslerin yayımlanması, izleme/raporlama ve yetkilendirmeye dayalı yönetim arayüzü sağlamalıdır. Fonksiyonel olmayan gereksinimler ise gecikme hedefleri, yüksek erişilebilirlik, veri kaybına karşı dayanıklılık, yatay ölçeklenebilirlik, bakımı kolay modüler yapı ve maliyet etkinliği olarak özetlenebilir.

Tablo 1’de özetlenen gereksinimler, mimari kararların değerlendirme ölçütlerini oluşturmaktadır.

## 4. YÖNTEM

### 4.1 Gereksinim Çıkarımı ve İş Fonksiyonlarının Ayrıştırılması

BEYS yöntemsel olarak tasarım-bilim yaklaşımına yakın bir çizgidedir. Mevcut sistemin iş fonksiyonlarının analizi, hedef mimarinin tasarımı, prototipleme ve doğrulama adımlarını içeren döngüsel bir mühendislik süreciyle ele alınmıştır. İlk adımda ICSII’nin işlevleri, referans veri yönetimi, gün içi hesaplama, gün sonu süreçleri, raporlama ve dış sistem entegrasyonları olarak ayrıştırılmıştır. Veri tabanı katmanında çalışan bileşenlerin hangi işlevsel rolü üstlendiği çıkarılmıştır. Bundaki amaç ise yüksek değişkenlik gösteren hesaplama mantığını veri tabanından izole ederek servis katmanına taşımaktır.

Kullanıcı arayüzü ve operasyonel akışların tasarımında ISO 9241-210 standardının önerdiği insan-merkezli tasarım yaşam döngüsü temel alınmıştır. Bu kapsamda operasyon personeli ile senaryo bazlı görev analizi yapılması, arayüz prototiplerinin iteratif değerlendirilmesi ve hata yapma olasılığını azaltan etkileşim tasarımı hedeflenmiştir [23].

### 4.2 Mimari Tasarım Yaklaşımı ve Teknoloji Seçim Ölçütleri

Mimari tasarımda, entegrasyon bağımlılıklarını azaltmak için olay-tabanlı (event-driven) iletişim deseni ve gevşek bağlı servis ayrıştırması (mikroservis) benimsenmiştir. Mesajlaşma odaklı tasarımda, Enterprise Integration Patterns literatüründe tanımlanan publish-subscribe, message channel, idempotent receiver ve saga benzeri desenler, endeks üretim zincirindeki dayanıklılık ve test edilebilirlik hedeflerini desteklemektedir [23], [24]. Ayrıca veri yoğun sistemlerde kalıcılık, tekrar oynatma ve durum yönetimi gibi konuların birlikte ele alınması gerektiği, veri tabanı ve akış katmanının sınırlarını önemli kılmaktadır [25].

Mesajlaşma katmanı seçimi için ölçütler, (i) düşük gecikme ve yüksek throughput, (ii) kalıcı saklama ve replay, (iii) tüketici grupları ile yatay ölçeklenebilirlik, (iv) işletilebilirlik (operability), (v) güvenlik ve yetkilendirme, (vi) teslim garantileri ve işlem (transaction) desteği olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda Apache Kafka [15], Apache Pulsar [16] ve ticari bir seçenek olarak Genium INET [26] değerlendirme havuzuna alınmıştır.

### 4.3 Benchmark ve Doğrulama Stratejisi

Çalışmada mesajlaşma sistemlerinin performans değerlendirmesinde literatürde önerilen yaklaşımlar izlenmiştir. Chy ve arkadaşlarının JVM tabanlı kuyruk servisleri için sunduğu karşılaştırmalı değerlendirme, iş yükünün (mesaj boyutu, publish/consume oranı, consumer sayısı) gecikme dağılımını güçlü biçimde etkilediğini göstermektedir [18]. Bu nedenle BEYS’te aday mesajlaşma altyapıları için, sentetik yük ve gerçek piyasa verisinin örneklenmiş izleriyle ölçüm yapılması tercih edilmiştir.

Benchmark altyapısı olarak OpenMessaging Benchmark çerçevesinin kullanılması önerilmektedir. Çerçeve, farklı sistemlerin aynı ölçüm tanımı altında P50/P95/P99 gecikme, throughput ve kaynak tüketimi gibi metriklerle karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır [19]. Mesajlaşma katmanı seçiminde maksimum throughput yanında gecikme kuyruğu

davranışı (tail latency) ve hata durumlarında toparlanma süreleri belirleyici kabul edilmiştir.

#### 4.4 Veri Saklama Yaklaşımı ve Geçiş Planı

Hedef mimaride hesaplama fonksiyonlarını barındırmak yerine referans verilerin yönetimi ve hesaplama çıktılarının kalıcılaştırılması için ilişkisel veri tabanı katmanı konumlandırılmıştır. Açık kaynak bir seçenek olarak PostgreSQL, lisans bağımsızlığı ve ekosistem olgunluğu nedeniyle değerlendirilmiştir [27]. Mevcut sistemle uyumluluk ve kademeli geçiş ihtiyacı nedeniyle Oracle altyapısı ile birlikte çalışabilirlik gözönünde tutulmuştur [6].

Ham piyasa verisi, tarihsel varlık verisi ve endeks değerleri için kalıcı saklama yaklaşımı, uygulama servislerinden ayrıştırılmış bir tarihsel veri katmanı üzerinden ele alınmıştır. Güncel uygulamada bu işlev Histstore bileşeni tarafından yürütülmekte ve ilgili veriler SQL veri saklama katmanına yazılmaktadır. Böylece referans veriler ile tarihsel hareket verileri ortak kurumsal veri yönetimi ilkeleri altında tutulurken, üretim hattının hesaplama mantığı veri tabanından ayrıştırılmış olmaktadır. BEYS'te Histstore bileşeni, gerçek zamanlı akışın üretim hattını tıkamadan (non-blocking) yan yola yazım yapacak şekilde tasarlanmıştır.

Geçiş planı kapsamında BEYS'in bir süre mevcut ICSII ile paralel çalıştırılması ve aynı zaman diliminde üretilen değerlerin otomatik testlerle doğrulanması hedeflenmektedir. Kullanılan yaklaşım doğruluk ve metodoloji uyumluluğu riskini azaltırken, kademeli devreye alma ile operasyonel kesinti olasılığını azaltmayı amaçlamaktadır.

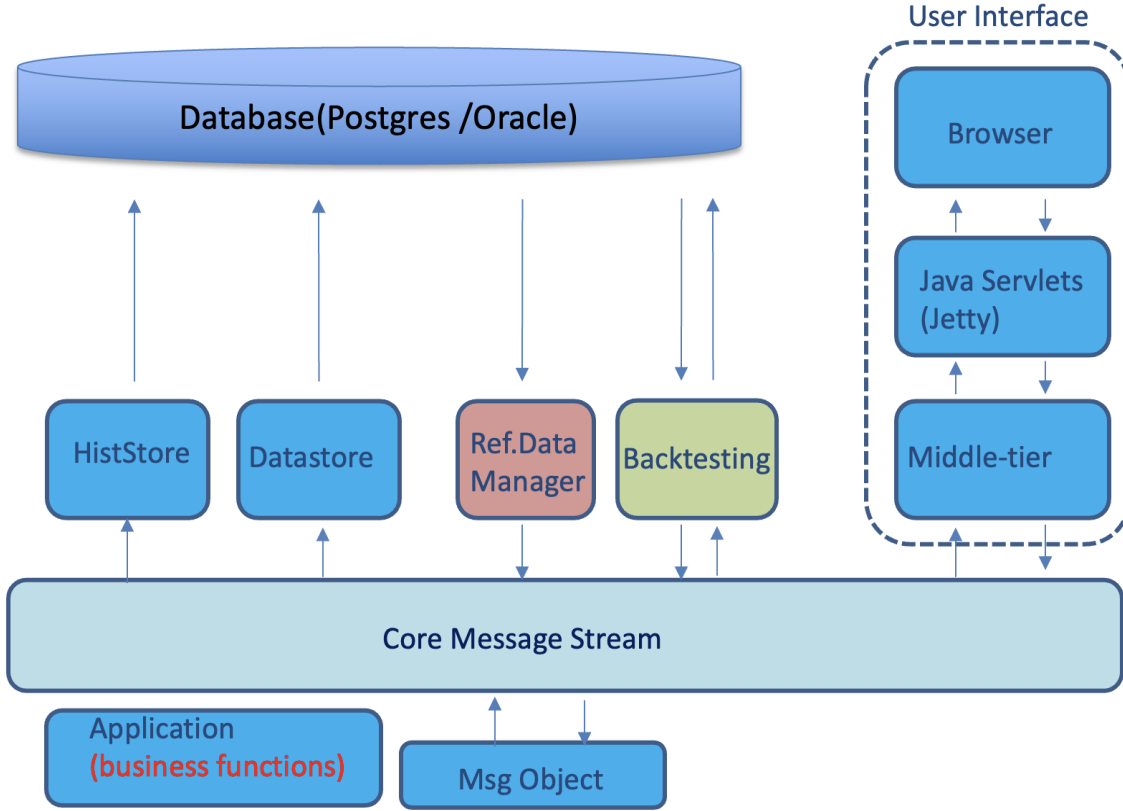
## 5. BEYS MİMARİSİ VE SİSTEM MODELİ

### 5.1 Genel Mimari Görünüm

BEYS, mevcut ICSII tasarımında veri tabanına gömülü biçimde yürütülen endeks hesaplama mantığını uygulama katmanına taşıyan dağıtık bir endeks hesaplama ve yönetim sistemi olarak tasarlanmıştır. Çalışmadaki mimari üç ana eksen üzerine kurulmuştur: Dizilmiş bir mesajlaşma omurgası üzerinden haberleşen Java uygulamaları, referans ve tarihsel verinin tutulduğu SQL veri katmanı ve web tabanlı kullanıcı arayüzü. Uygulama katmanındaki servisler aynı fiziksel sunucu üzerinde ya da farklı düğümlerde çalışabilmektedir. Böylece hesaplama işlevleri ve operasyonel bileşenler yatay olarak ayrıştırılabilmektedir.

Şekil 1, sistemin temel etkileşim modelini göstermektedir. Kullanıcılar, Jetty tabanlı servet katmanı ve orta katman uygulaması üzerinden sisteme erişmektedir. Veri ve komutlar Core Message Stream üzerinden ilgili servisler arasında dolaşmaktadır. Referans veri yönetimi Ref.Data Manager bileşeni üzerinden yürütülürken, gerçek zamanlı fiyatlar, tarihsel varlık verileri ve hesaplanan endeks değerleri Histstore ve DataStore bileşenleri üzerinden SQL veri saklama katmanına yazılmaktadır. Böylece kritik hesaplama yolu ile kalıcı saklama yolu birbirinden ayrıştırılmakta ve performans, bakım, işletilebilirlik hedefleri aynı mimari çerçevede dengelenmektedir.

Core Message Stream katmanı, BEYS'in omurgasıdır. Güncel tasarımda bu katman, Core'un GAL (Genium Access Layer) üzerinde çalıştığı dizilmiş bir mesajlaşma yapısı olarak ele alınmıştır. Aynı fiziksel makinede veya farklı düğümlerde çalışan uygulamalar standartlaştırılmış mesaj nesnelere üzerinden haberleşmektedir. Her yeni oturumda mesajlar sıfırdan başlayarak sıralı akış içinde işlenmektedir. Deterministik işleme davranışı ve servisler arası gevşek bağlılık açısından önerilen tasarım, sistem modelinin merkezindedir.



Şekil 1: BEYS mesajlaşma temelli mimari bileşenleri ve veri akışı.

## 5.2 Bileşen Tanımları ve Sorumluluklar

BEYS içinde yer alan temel Java uygulamaları işlevsel sorumluluklara göre ayrıştırılmıştır. Reference Data Manager (RDM), sistem açılışında iş ve yapılandırma verilerini veri tabanından alarak mesajlaşma omurgasına yayınlamaktadır. Zamanlanmış değişikliklerin ve varlık eylemlerinin yürütülmesini yönetmektedir. Action Sources bileşenleri, güvenlik referans verisi, ortaklık eylemleri ve endeks bileşen değişiklikleri gibi girdileri harici beslemelerden veya teslim edilen dosyalardan alarak anlık ya da zamanlanmış değişiklik mesajlarına dönüştürmektedir. Price Manager, farklı veri kaynaklarından gelen fiyatları normalize etmektedir. Mükerrer kayıt temizleme, filtreleme ve eşik kontrolü gibi işlemler sonrası yönetilmiş fiyat akışını sisteme geri yayınlamaktadır.

Security Manager, pazar ve menkul kıymet durumlarını yönetmektedir. Hesaplamayı etkileyen kurumsal aksiyonları güvenlik düzeyinde uygulamaktadır. Index Manager, endekslerin açılış-kapanış durumlarını, bileşen eylemlerini ve hesaplama esas bağlamsal verileri yönetmektedir. Index Calculator ise Index Manager

tarafından yayınlanan hesaplama ayarları ile Price Manager tarafından yayınlanan yönetilmiş fiyatları kullanarak endeks değerlerini üretmektedir. Üretilen değerler, Outfeed bileşenleri vasıtasıyla farklı dağıtım kanallarına aktarılabilir. Report Manager rapor üretiminden, Supervisor ise alarm, sağlık ve performans izlemekten sorumludur.

Kalıcı veri katmanında iki tamamlayıcı bileşen yer almaktadır. Datastore, mesajlaşma omurgasında yayınlanan veri öğelerinin ekleme, silme ve güncelleme işlemlerini seçilen SQL veri tabanına yazan bileşendir. Bu katman veri deposundan bağımsız olacak şekilde tasarlanmış olup PostgreSQL varsayılan seçenek olarak öne çıkmakla birlikte Oracle ile birlikte çalışabilirlik de korunmaktadır [6], [27]. Histstore ise fiyatları, tarihsel varlık verilerini ve hesaplanan endeks değerlerini SQL veri saklama katmanına yazan kayıt bileşenidir. Böylece veri tabanı, hesaplama mantığının yürütüldüğü katman olmaktan çıkarılmakta ve referans veri, durum ve tarihsel kayıtların kalıcılaştırıldığı bir katman hâline gelmektedir.

Operasyonel akışlarda kullanıcı arayüzü de mimarinin tamamlayıcısıdır. Web tabanlı arayüz ise Jetty 9 servlet motoru ve orta katman servisleri üzerinden veri ve komut alışverişi yapmaktadır. İnce istemci yapı sayesinde operasyon kullanıcılarının aynı hizmetleri tarayıcı üzerinden yürütebilmesine olanak tanınmıştır. Yönetim fonksiyonlarının hesaplama servislerinden ayrıştırılması ve rol bazlı işletim akışlarının daha esnek biçimde tasarlanması desteklenmektedir.

### 5.3 Çalışma Modeli, Ölçekleme ve Yüksek Erişilebilirlik

BEYS'in sunucu tarafındaki çalışma modeli, modül ayrıştırmasına ve de yüksek erişilebilirlik ve failover gereksinimlerine de cevap verecek biçimde tasarlanmıştır. Java uygulamaları genel olarak A ve B olmak üzere çift örneklilikte, çoğu zaman farklı sunucularda çalıştırılmaktadır. İç servisler olarak değerlendirilen uygulamalarda klasik bir birincil-ikincil ayrımı yerine "hot-hot" çalışma modeli benimsenmiştir. Bu modelde A ve B örnekleri aynı girdilere yanıt olarak aynı çıktı akışını üretmektedir. Mesajlaşma omurgasının merkezindeki "sequencer" (dizici), önce ulaşan mesajı geçirip daha sonra gelen eşdeğer mesajı elemektedir. Böylece tekil süreç arızaları ve bir sunucunun tamamen devre dışı kalması, hizmette kesinti oluşturmadan yönetilebilmektedir.

Buna karşılık "rdm", "outfeed" ve "datastore" gibi aynı anda yalnızca tek örneğin aktif olması gereken modüllerde "server-standby" çalışma modeli kullanılmaktadır. Bu grupta yer alan modüllerin "failover" süreci "ElectionService" tarafından yönetilmekte ve başlangıçta bir örnek lider olarak seçilirken diğer örnekler bekleme konumunda tutulmaktadır. Birincil sürecin kontrollü şekilde kapatılması durumunda standby örneği anında devralmaktadır. Plansız kesinti hâlinde ise liderlik belirli bir eşik süre sonunda otomatik olarak devredilmektedir. Süreçler arası kalp atışı mesajları ve rol izleme mekanizmaları, failover davranışının izlenebilir olmasını desteklemektedir.

Düğüm düzeyinde yüksek erişilebilirlik için galserver etkinliği ic\_monitor süreci tarafından izlenmektedir. Birincil düğümdeki galserver kesintisi algılandığında mesaj trafiğinin standby düğüme aktarılması sağlanmaktadır. Daha üst seviyede "site failover" için uygulama katmanında

üretilen mesajlar "disaster site" konumundaki sunucu kümesine "SoupMessageServer" modülü ile dağıtılmaktadır. Disaster konumunda ise "SoupMessageClient" modülü gönderilen mesajları dinleyerek gerekli senkronizasyonu sağlamaktadır. Veri tabanı katmanında ise PostgreSQL çoğaltma yaklaşımı öngörülmüştür. Böylece tüm uygulama "process failover", "node failover" ve "site failover" ile bütünlüklü yüksek erişilebilirlik çerçevesi içinde ele alınmaktadır.

Veri kalıcılığı ve toparlanma davranışı da bu yüksek erişilebilirlik modelinin bir parçasıdır. Datastore ve Histstore tarafında asenkron yazım uygulanmış ve her bir data tablosu için ayrı veritabanı yürütme iş parçacıkları tasarlanmıştır. Ayrıca intelligent rewind yaklaşımı ile her veri varlığı için önbellek tutulmaktadır. Yeniden başlatma veya rol değişiminde "replay" edilen verilerin mükerrer veya eksik kayıt üretmesi önlenmektedir. Veri tabanı bağlantısı kayb olduğunda gerekli veriler uygulama önbelleklerinde korunmakta ve veri tabanı tekrar erişilebilir olduğunda kalıcı ortama uygulanmaktadır. "Graceful shutdown" desteği ise tamamlanmamış işlemlerin yönetilmesini ve "standby site" a hızlı geçişi kolaylaştırmaktadır. Birlikte değerlendirildiklerinde, BEYS'in yüksek erişilebilirlik yaklaşımı mesajlaşma katmanı, uygulama ve veri katmanının birlikte ele alınarak tasarlandığı görülmektedir.

### 5.4 Mesaj Türleri, Veri Modeli ve Durum Yönetimi

BEYS'te mesajlaşma omurgası aynı zamanda sistem modelinin sözleşmesidir. Bu nedenle mesaj şemalarının açık tanımlı, sürümlenebilir ve geriye dönük uyumlu olması gerekmektedir. Uygulamada piyasa verisi tikleri, yönetilmiş fiyat mesajları, endeks tanım güncellemeleri, kurumsal aksiyon olayları, güvenlik ve endeks durum mesajları, kontrol komutları, çıktı mesajları ve gün sonu anlık görüntüleri bu sözleşmenin ana parçalarıdır. Alarm ve istatistik mesajları da operasyonel izlenebilirlik açısından aynı çerçevede içindedir.

Tablo 2, sistem kapsamındaki endeks portföyünü özetlemektedir. Portföy, çoklu varlık sınıflarını ve farklı hesaplama kurallarını ortak işletim modeli altında birleştirmeyi gerektirmektedir. Endeks düzeyinde tutulan bağlamın fiyat bilgisi sağlamanın yanında fiyat, pay adedi, serbest

dolaşım oranı, lot büyüklüğü, kurumsal aksiyon bilgisi, bileşen bağlamı ve ağırlıklandırma parametreleri birlikte yönetilmektedir. Eşit ağırlık, UCITS1, non-market value ve özel/grup ağırlıklandırma gibi farklı yöntemlerin modüler biçimde ele alınabilmesi de bu bağlam modelinin parçasıdır. Dolayısıyla BEYS'te durum yönetimi, "son fiyat" saklama dışında her endeks için hesaplama bağlamının ve metodolojik durumun süreklilik içinde korunması problemini çözmektedir.

Mevcut benchmark gözlemleri, partition kullanılmayan senaryolarda single-node ve multi-node ortamlar arasında belirgin bir fark göstermemiştir. Bu nedenle bu çalışmada ölçekleme tartışması, doğrulanmış bir partition kazancı üzerinden yürütülmektedir. Sistemin mevcut kurulum altında sunduğu modüler kapasite ve yüksek erişilebilirlik davranışı üzerinden ele alınmaktadır. Partition yapısı kod tabanında yer almakla birlikte, bu makalede raporlanan deneylerde ayrıca doğrulanmış bir iyileştirme olarak sunulmamaktadır.

Durum yönetimi açısından her endeks için bileşen kümesi, güncel ağırlıklar, bölen, gün içi ara değerler, planlanmış değişiklikler ve gerektiğinde geri dönüş veya yeniden çalışma için anlık görüntü/snapshot verilerinin tutulması gerekmektedir. Hata durumlarında güvenli toparlanma, sequenced mesaj akışından yeniden oynatma, servis düzeyinde idempotent güncellemeler, tarihsel kayıt katmanı ve paralel çalışma ile yapılan doğruluk karşılaştırmaları birlikte ele alınarak sağlanmaktadır. Bu sayede endeks üretimi, dağıtık sistem olmasına rağmen metodolojik tutarlılığını koruyacak şekilde kurgulanmaktadır.

**Tablo 2:** BEYS endeks türleri ve sayıları.

Endeks türü	Gerçek zamanlı	Gün sonu
Pay endeksleri	193	395
BIST-KYD endeksleri	40	21
Risk kontrol endeksleri	0	20
Kaldıraçlı ve ters endeksler	0	14
Altın bazlı endeksler	1	7

Tablo 2'de özetlenen (Endeks sayıları zaman içinde değişiklik gösterebilir.) endeks portföyü ise BEYS'in mevcut mimarisine yüksek hacimli endeks yönetimini karşılayabilecek ölçekte ele alındığını göstermektedir. Mevcut benchmark gözlemleri, partition kullanılmayan senaryolarda single-node ve multi-node ortamlar arasında belirgin bir fark ortaya koymamıştır. Bu nedenle bu aşamada performans tartışması, doğrulanmış bir partition kazancı üzerinden değil de sistemin mevcut kurulumunda sunduğu kapasite üzerinden yapılmalıdır. Partition yapısı kod tabanında yer almakla birlikte yapılan bu çalışmada raporlanan senaryolarda ayrıca test edilmemiştir. Dolayısıyla gelecekte doğrulanacak bir ölçekleme seçeneğidir.

Durum yönetimi açısından endeks hesaplama, her endeks için bileşen kümesi, güncel ağırlıklar, bölen, gün içi ara değerler ve hata durumlarında geri dönüş (rollback) için snapshot gibi verilerin tutulmasını gerektirmektedir. Stream processing literatüründe "durumlu operatörler" olarak tanımlanan yapılara benzerlik mevcuttur. Hata durumlarında güvenli toparlanma için, (i) mesaj akışından tekrar oynatma, (ii) periyodik durum anlık görüntüleri ve (iii) idempotent güncelleme stratejileri birlikte ele alınmalıdır [11], [25].

### 5.5 Teslim Garantileri, İdempotensi ve Hata Toleransı

Finansal endeks üretiminde yanlış sıra, mükerrer işlem veya veri kaybı, hatalı endeks değerleri ve dolaylı ürün fiyatlamaları üzerinde doğrudan etki yaratabileceğinden, teslim davranışı BEYS'te altyapı özelliği olarak ve uçtan uca bir sistem özelliği olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda sequencer tabanlı sıralama, hot-hot çalışan servislerin ürettiği mükerrer çıktının elenmesi, "ElectionService" ile tek liderli modüllerin kontrolü, intelligent rewind ve servis düzeyinde idempotent güncelleme mantığı birlikte çalışmaktadır. Böylece aynı mesajın birden fazla kez işlenmesi ya da rol değişimi sırasında veri eksilmesi gibi riskler uygulama davranışı seviyesinde yönetilmektedir.

Bu yaklaşımın önemli sonucu ayrıca teslim semantiğinin pratikte yalnızca bir "exactly-once" iddiasına indirgenmemesidir. BEYS'te doğruluk ise deterministik durum güncellemesi, rol geçişlerinde kontrollü devralma, tarihsel kayıt katmanı ve ICSII

ile paralel çalışma sırasında yapılan karşılaştırmalar üzerinden güvence altına alınmaktadır. Sistemde hata toleransı mesajlaşma omurgasının kabiliyetiyle ve uygulama servislerinin tasarımı ve operasyonel doğrulama mekanizmalarıyla birlikte sağlanmaktadır.

### 5.6 Veri Saklama Katmanı: Hesaplama Modeli

BEYS'te veri saklama katmanı iki iş yükü sınıfına göre ayrıştırılmıştır. Referans veriler ve yönetimsel meta-veriler ilişkisel veri tabanında tutulmaktadır. Bu katmanda veri tutarlılığı, versiyonlama ve denetim izi öne çıkmaktadır. PostgreSQL başlangıç sistemi için doğal aday olarak değerlendirilmekle birlikte, mimari veri deposundan bağımsız tasarlandığı için farklı SQL seçenekleriyle çalışabilecek biçimde kurgulanmıştır [6], [27]. Bu tercih, lisans maliyetlerini azaltırken mevcut sistemlerle uyumlu geçişi de mümkün kılmaktadır.

Gerçek zamanlı fiyatlar tarihsel varlık verileri ve hesaplanan endeks değerleri ise Histstore üzerinden SQL veri saklama katmanına yazılmaktadır. Ham tick verisi ve ilişkili tarihsel kayıtlar uygulamada eklemeli karakterde tutulmaktadır. Geriye dönük inceleme, doğrulama, karşılaştırma, backtesting ve kök neden analizi için kurumsal bir veri temeli sağlanmaktadır. Amaç ayrı bir dosya-formatı optimizasyonu yanında üretim sistemiyle tutarlı, sorgulanabilir ve denetlenebilir bir tarihsel kayıt mekanizması kurmaktır. Bu nedenle veri saklama kararı, doğrudan operasyonel izlenebilirlik ve doğrulama gereksinimleriyle ilişkili olmaktadır.

Endeks hesaplamasının çekirdeğinde, bileşen bazında ağırlıklandırılmış piyasa değerlerinin bölün ile normalize edilmesi yer almaktadır. Örnek bir piyasa değeri ağırlıklı şema aşağıdaki biçimde gösterilebilir:

$$I_t = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{(i,t)} * Q_i * FF_i)}{D_t} \quad (1)$$

Burada  $P_{(i,t)}$  bileşen  $i$ 'nin  $t$  anındaki fiyatını,  $Q_i$  ilgili pay adedini,  $FF_i$  serbest dolaşım oranını ve  $D_t$  bölünü göstermektedir. Kurumsal aksiyonlar, bileşen değişiklikleri ve dönemsel güncellemeler sırasında  $D_t$ 'nin doğru yönetimi, endeks sürekliliğinin korunması için zorunludur [2]–[5]. BEYS mimarisi, bu hesaplama çekirdeğini veri tabanından ayrıştırılmış servisler üzerinde

çalıştırırken, gerekli tüm bağlamsal veriyi mesajlaşma ve tarihsel kayıt katmanlarıyla destekleyecek biçimde yapılandırmaktadır.

## 6. DEĞERLENDİRME TASARIMI VE SENARYOLAR

### 6.1 Doğruluk Doğrulaması: Paralel Çalışma ve Çıktı Karşılaştırması

BEYS'in doğruluk değerlendirmesinde temel yöntem, mevcut ICSII ile paralel çalışma yaklaşımıdır. Aynı piyasa verisi akışı ve aynı referans veri anlık görüntüsü altında üretilen endeks değerleri zaman damgası bazında eşleştirilmektedir. Nihai endeks değeri ve bölün güncellemeleri, bileşen ağırlıkları, kurumsal aksiyon uygulama anları ve gün içi ara durum değişkenleri karşılaştırılmaktadır. Farklılıkların hesaplama zincirinin hangi adımında ortaya çıktığının izole edilebilmesi sağlanmaktadır. Histstore ve ilişkili tarihsel kayıt katmanı, bu karşılaştırmalarda geriye dönük inceleme, yeniden çalışma ve kök neden analizi için veri temeli oluşturmaktadır.

### 6.2 Benchmark Düzeni ve Senaryo Ailesi

Çalışmada raporlanan nicel değerlendirme, öncelikle BEYS'in endeks hesaplama ve yönetim hattının kapasite karakteristiğini görünür kılmaya odaklanmaktadır. Deney ailesi üç sayısal temsil koşulu altında tasarlanmıştır: BigDecimal, Double ve warmup sonrası BigDecimal. Warmup, Double ve BigDecimal değerlendirme sonuçları sonrası geliştirilen ve JVM'in Double'daki tekrarlayan hesapların optimizasyon yapısına benzer bir şekilde çalışan bir süreçtir. Warmup sırasında fiyat dışındaki piyasa değeri gibi endeks hesabında kullanılan ve gün içinde değişmeyen sayısal değerler piyasaların açılışından önce günde bir kere hesaplanır, hesabın sonucunda çıkan aynı obje gün içinde her gerektiğinde tekrar kullanılarak bellekte yer açma, Garbage Collection gibi işlemlerden kısılmasını sağlar. Böylece bir yandan sayısal gösterimin hesaplama maliyetine etkisi, diğer yandan JVM warmup sonrasında oluşan davranış değişimi aynı deney çerçevesinde incelenilmektedir.

Ana deney yükü, 1000 bileşenden oluşan endeksler üzerinde kurulmuştur. Sistemin tek bir endeks için aritmetik doğruluk problemini ele almak yerine

çoklu endekslerin eşzamanlı işletimindeki sürdürülebilir kapasiteyi görünür kılmak amacıyla bu yük seçilmiştir. Senaryo ailesi, (i) her saniye hesaplama, (ii) 60 saniyede bir hesaplama, (iii) warmup sonrası her saniye hesaplama, (iv) her saniye fiyat akışını taklit eden simulated senaryo ve (v) büyük veri kümeleriyle açılış/stabilite testlerinden oluşmaktadır. Her saniye hesaplama senaryoları sürdürülebilir üst sınırı görmek için stres testi olarak, 60 saniyede bir hesaplama senaryoları ise daha seyrek kadanslı toplu iş yükünü temsil edecek biçimde tasarlanmıştır.

Deney tasarımında ayrıca dağıtım topolojisinin etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda bazı senaryolar single-node ve multi-node ortamlarda tekrarlanmış, partition kullanılmayan kurulumda düğüm sayısının kapasite üzerindeki etkisi ayrıca gözlemlenmiştir. Böylece ölçekleme davranışı, yalnızca kuramsal yatay genişleme varsayımıyla değil, mevcut kurulumun pratik davranışı üzerinden değerlendirilmiştir.

### 6.3 Ölçüm Metrikleri

Benchmarklarda üç performans göstergesi izlenmiştir. Birincisi, tekil tick işleme süresidir. Bu metrik, hesaplama çekirdeğinin sayısal gösterimden ne ölçüde etkilendiğini ve warmup sonrasındaki iyileşmeyi görünür kılmaktadır. İkincisi, belirli bir kadansta sürdürülebilir biçimde hesaplatılabilen eşzamanlı endeks sayısıdır. Sistemin gerçek operasyon yükü altındaki kapasite sınırını göstermesi bakımından önemlidir. Üçüncüsü ise darboğazın hangi modülde yoğunlaştığıdır. Ölçümlerde yalnızca ortalama hız değil, ic\_idxcalc ve ic\_idxmgr gibi modüllerin hangi koşul altında sınırlayıcı hâle geldiği de kaydedilmiştir.

Bunlara ek olarak operasyonel kararlılık göstergeleri de izlenmiştir. Büyük veri kümeleriyle yapılan denemelerde açılış sonrası DOWN durumuna düşme, heap/stack baskısı ve Liquibase kaynaklı hatalar ayrı gözlem çıktıları olarak ele alınmıştır. Yapılan tercih, değerlendirmeyi yalnızca “daha hızlı mı?” sorusuna indirgememektedir. Aynı zamanda “hangi büyüklükte, hangi koşulda ve hangi modülde sınır oluşuyor?” sorusuna yanıt vermeyi amaçlamaktadır. Dolayısıyla çalışma, performans değerlendirmesini gecikme, kapasite ve

işletim kararlılığı eksenlerinin birlikte ele alındığı bir mühendislik problemi olarak konumlandırmaktadır.

Sunulan ölçümler, uçtan uca yayın SLA’sını tek başına kapatan nihai doğrulamalar değildir. Ölçümler, öncelikle endeks hesaplama servislerinin ve ilişkili yönetim modüllerinin kapasite karakteristiğini ortaya koyan senaryo bazlı benchmarklardır. Uçtan uca piyasa veri girişi, mesajlaşma omurgası, hesaplama, veri saklama ve yayın zincirinin tümünü kapsayan son SLA doğrulaması ayrı bir çalışma alanıdır.

### 6.4 Dayanıklılık Geçerlilik Sınırları

BEYS mimarisinde süreç failover, node failover, site failover ve veri tabanı bağlantı kaybından toparlanma gibi yetenekler mimari düzeyde tanımlanmış olsa da, bu bölümde raporlanan nicel senaryoların ana odağı yüksek erişilebilirlik davranışından çok hesaplama kapasitesidir. Bu nedenle failover ve toparlanma yetenekleri, burada sunulan benchmarklardan ayrı fakat tamamlayıcı bir doğrulama eksenini olarak düşünülmelidir. Aynı şekilde partition yapısının kod tabanında yer alması, onun bu makalede raporlanan deneylerde doğrulanmış bir performans kazanımı olarak yorumlanması için yeterli değildir.

Dolayısıyla değerlendirme tasarımı, BEYS’in mevcut gelişim aşamasına uygun biçimde iki tamamlayıcı hedefe hizmet etmektedir: bir yandan ICSII ile metodoloji uyumunu ve doğruluk karşılaştırmasını mümkün kılmakta, diğer yandan BigDecimal-Double tercihleri, warmup etkisi, kadans farkı, düğüm topolojisi ve veri kümesi büyüklüğü gibi değişkenler altında sistemin gerçek kapasite ve darboğaz davranışını görünür hâle getirmektedir. Bu çerçevede, sonraki bölümde sunulan benchmark bulgularının hangi deney mantığı içinde elde edildiğini açık biçimde temellendirmektedir.

## 7. BULGULAR

Gerçekleştirilen benchmark çalışmaları, 1000 bileşenden tan oluşan endeks yükünde sayısal temsil seçiminin ve uygulama optimizasyonlarının sistem davranışı üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermiştir. İlk ölçümlerde BigDecimal ile tick hesaplama süresi 1-2 ms, Double ile 0-1 ms düzeyinde gözlemlenmiştir. Ancak BigDecimal

tarafında yapılan iyileştirmeler ve warmup sonrasında bu fark önemli ölçüde kapanmıştır. BigDecimal ile gelen ticklerin de 0–1 ms düzeyinde işlenebildiği görülmüştür. Mevcut uygulamanın ilk ölçümlere göre hesaplama tarafında belirgin bir iyileşme sağlanmıştır.

**Tablo 3:** Benchmark çalışmalarından bulgular.

Senaryo	Gözlenen sonuç	Başlıca darboğaz / not
BigDecimal, 1000 bileşen, her saniye hesaplama	Yaklaşık 500 endekse kadar sürdürülebilir hesaplama	600 endekste sistem kilitlenmiştir, ic_idxcalc zorlanmakta
Double, 1000 bileşen, her saniye hesaplama	Büyük sorun yaşanmadan 1500 endekse kadar hesaplama gözlenmiştir	Darboğaz ic_idxmgr modülüne kaymakta
BigDecimal, 1000 bileşen, 60 saniyede bir hesaplama	1000 endeks aynı anda hesaplanabilmiştir	Tüm ticklerin aynı anda işlendiği durumda süre yaklaşık 3 saniyeye çıkabilmekte
Warmup sonrası BigDecimal	Tick hesaplama süresi 0–1 ms düzeyine inmiştir	İlk ölçümlerde 1–2 ms olan süre iyileşmiştir

Kapasite açısından sonuçlar aynı veri modeli altında iki farklı davranış örüntüsüne işaret etmektedir. BigDecimal kullanılan buildlerde her saniye yaklaşık 500 endeks sürdürülebilir biçimde hesaplanabilirken, 600 endeks senaryosunda sistemin kilitlendiği ve ic\_idxcalc modülünün belirgin biçimde zorlandığı gözlenmiştir. Double kullanılan buildlerde ise ic\_idxcalc modülünün aynı ölçüde zorlanmadığı, ancak yeni darboğazın ic\_idxmgr modülünde oluştuğu görülmüştür. Büyük sorunlar yaşanmadan her saniye 1500 endekse kadar “tick-by-tick” hesaplama yapılabildiği raporlanmıştır. Dolayısıyla benchmarklar kapasite düzeylerini ve ayrıca darboğazın modüller arasında yer değiştirebildiğini de ortaya koymaktadır.

Hesaplama aralığının daha uzun tutulduğu senaryolar da ek bir karşılaştırma zemini sunmuştur. BigDecimal ile 60 saniyede bir hesaplama senaryosunda 1000 endekse kadar

hesaplama mümkün olmuştur. Ancak tüm ticklerin aynı anda işlendiği durumda toplam süre yaklaşık 3 saniyeye kadar çıkmıştır. Aynı senaryo “single-node” ve “multi-node” ortamlarda da gözlemlenmiştir. Partition kullanılmayan kurulumda iki ortam arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Mevcut deney kümesinde düğüm sayısından çok iş yükü dağıtım biçiminin ve modül içi darboğazların belirleyici olduğu görülmektedir.

Ölçekleme sınırları daha büyük veri kümelerinde daha görünür hâle gelmiştir. 100.000 endeks yükleme denemesinde Liquibase kaynaklı “heap size” hataları oluşmuştur. 10.000, 5.000, 2.000, 1.800, 1.600 ve 1.550 endeksli veri kümelerinde ise ic\_idxmgr modülünün açılıştan birkaç dakika sonra DOWN durumuna geçtiği gözlenmiştir. Üstelik bu davranışın ic\_idxmgr’a ilave “stack” ve “heap” verilmesine rağmen devam etmesi, başlangıç ve yönetim katmanındaki ölçekleme sorununun ayrıca ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

BEYS’in kavramsal bir öneri yanında gerçek yük altında ölçülebilir kapasite üretebildiğini ilk bulgular göstermektedir. 1000 bileşenli yükte BigDecimal ile sürdürülebilir üst sınır yaklaşık 500 endeks, Double ile ise yaklaşık 1500 endeks olarak gözlenmiştir. Warmup sonrasında BigDecimal tick işleme süresi de 0–1 ms düzeyine inmiştir. Buna karşılık büyük veri kümelerinde ic\_idxmgr modülü ve açılış davranışı yeni ölçekleme sınırları üretmiştir. Bu nedenle burada sunulan sonuçlar, tam üretim benzeri uçtan uca SLA doğrulamasından ziyade sistemin kapasite ve darboğaz karakteristiğini görünür kılan ilk somut bulgular olarak değerlendirilmelidir.

## 8. SONUÇ

Borsa İstanbul bağlamında endeks üretiminin ölçek ve gecikme gereksinimleri altında yeniden ele alınması ve BEYS mimarisi ile sistem modelinin ortaya konulması bu çalışmada amaçlanmıştır. Endeks hesaplamanın veri tabanı katmanına gömülü biçimde sürdürülmesinin uzun vadede performans, ölçeklenebilirlik ve işletim maliyeti açısından sürdürülebilir olmadığı ve buna karşılık hesaplama mantığının servis katmanına taşınmasının sistemi daha modüler, izlenebilir ve geliştirilebilir hâle getirdiği sonucu elde edilmiştir. GAL tabanlı Core Message Stream, SQL veri katmanı ve Histstore bileşenleri birlikte ele

alındığında, BEYS yaklaşımı kritik hesaplama yolunda veri tabanı bağımlılığını azaltan ve kademeli geçişe uygun bir mimari çerçeve sunmaktadır.

BEYS endeks hesaplama mantığını veri tabanı katmanından ayrıştırarak servis tabanlı ve mesaj odaklı bir yapıya taşımakta olup temel katkısı bu yödedir. Bu sayede mevcut ICSII'de veri tabanı üzerinde yoğunlaşan işlem yükü uygulama katmanına dağıtılmaktadır. Sistem modül bazında izlenebilir, test edilebilir ve iyileştirilebilir hâle gelmektedir. Core Message Stream, SQL veri katmanı ve Histstore bileşenleri birlikte değerlendirildiğinde, mimari performans yanında aynı zamanda bakım kolaylığı, maliyet avantajı ve operasyonel sürdürülebilirlik de hedeflenmektedir. Ayrıca "hot-hot" çalışan iç servisler, ElectionService ve ic\_monitor tabanlı failover yaklaşımı, sistemin görev-kritik bir ortam için tasarlandığını göstermektedir.

Gerçekleştirilen karşılaştırmalı ölçümler mimari yaklaşımın somut kapasite üretebildiğini göstermiştir. Ayrıca kapasite artışı yanında darboğazın hangi modülde oluştuğu görünür kılınmıştır.

Dolayısı ile BEYS, veri tabanı merkezli endeks hesaplama yaklaşımından daha esnek, daha gözlemlenebilir ve daha ölçeklenebilir bir yapıya geçiş açısından güçlü bir mimari yön ortaya koymaktadır. Bu çalışmada sunulan bulgular, sistemin kavramsal bir öneriden öte gerçek bir uygulama düzeyine ulaştığını göstermektedir. Ancak sonraki aşamada uçtan uca SLA ölçümleri, partition etkisinin doğrulanması, failover sürelerinin nicel olarak ölçülmesi ve büyük veri kümesi açılış davranışının iyileştirilmesi gerekmektedir.

**Yazar Katkıları:** Murat Can Altun; kavramsallaştırma, yöntem geliştirme, yazılım geliştirme, sistem mimarisi tasarımı, entegrasyon ve doğrulama süreçlerine katkı sağlamıştır. Ahmet Başgöze, Altan Arı ve Özyavuz Topçu; kavramsallaştırma, yöntem geliştirme, yazılım geliştirme, sistem mimarisi tasarımı ile test ve revizyon süreçlerinde görev almıştır. Ahmet Can Ramazanoğlu; sistem bileşenlerinin entegrasyonu, teknik doğrulama, Ar-Ge ve analiz çalışmalarında yer almıştır. Mehmet Göktürk ise literatür taraması,

biçimsel analiz ve sonuçların yorumlanması süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Teşekkür:** Bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkı sağlayan proje ekibine ve Borsa İstanbul operasyon birimlerine teşekkür ederiz.

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

## 9. KAYNAKLAR

- [1] Borsa İstanbul, "Endeksler," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.borsaistanbul.com/endeksler>.
- [2] Borsa İstanbul, "BIST Market Cap Weighted Stock Indices Methodology," Mayıs 2025, [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.borsaistanbul.com/files/bist-market-cap-weighted-stock-indices-methodology-final-version2.pdf>.
- [3] S&P Global, "Index Mathematics Methodology," Kasım 2014, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.spice-indices.com/idpfiles/spice-assets/resources/public/documents/methodology-index-math.pdf>.
- [4] MSCI, "MSCI Index Calculation Methodology," Şubat 2025, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.msci.com/indexes/documents/methodology/0\\_MSCI\\_Index\\_Calculation\\_Methodology\\_20240812.pdf](https://www.msci.com/indexes/documents/methodology/0_MSCI_Index_Calculation_Methodology_20240812.pdf).
- [5] FTSE Russell, "FTSE UK Index Series Guide to Calculation," Sürüm 6.1, Ağustos 2025, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.lseg.com/content/dam/ftse-russell/en\\_us/documents/ground-rules/ftse-uk-index-series-guide-to-calc.pdf](https://www.lseg.com/content/dam/ftse-russell/en_us/documents/ground-rules/ftse-uk-index-series-guide-to-calc.pdf).
- [6] M. Stonebraker, U. Çetintemel ve S. Zdonik, "The 8 requirements of real-time stream processing," *SIGMOD Record*, 34(4), 42-47, 2005.
- [7] C. Spiers ve J. Wallez, "High-performance computing on Wall Street," *Computer*, 43(12), 53-59, 2010. doi:10.1109/MC.2010.349.
- [8] S. Induwara ve S. Jayasena, "Fast computation of stock market indices using GPUs," *8th IEEE International Conference on Industrial and*

- Information Systems (ICIIS)*, Peradeniya, Sri Lanka, 2013, 237-242.
- [9] D. M. Ripley, "Systematic elements in the linkage of national stock market indices," *The Review of Economics and Statistics*, 55(3), 356-361, 1973.
- [10] P.-C. Hautcoeur, "Why and how to measure stock market fluctuations? The early history of stock market indices, with special reference to the French case," PSE Working Paper, 2006.
- [11] J. P. Fernandes, A. M. Salgado ve J. Bernardino, "Big data streaming platforms to support real-time analytics," *ICSOFIT*, 426-433, 2020. doi:10.5220/0009817304260433.
- [12] J. Kreps, N. Narkhede ve J. Rao, "Kafka: A distributed messaging system for log processing," *Proceedings of the NetDB*, 11(2011), 1-7, 2011.
- [13] Apache Kafka, "Apache Kafka Documentation," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://kafka.apache.org/42/getting-started/introduction/>.
- [14] Apache Pulsar, "Apache Pulsar Architecture Overview," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://pulsar.apache.org/docs/next/concepts-architecture-overview/>.
- [15] Apache BookKeeper, "Apache BookKeeper Documentation (Overview/Concepts)," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://bookkeeper.apache.org/docs/overview/>.
- [16] Md Showkat Hossain Chy ve diğerleri, "Comparative evaluation of Java virtual machine-based message queue services: A study on Kafka, Artemis, Pulsar, and RocketMQ," *Electronics*, 12(23), 4792, 2023.
- [17] OpenMessaging, "OpenMessaging Benchmark Framework," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://openmessaging.cloud/docs/benchmark/>.
- [18] Confluent, "Exactly-once semantics are possible: Here's how Apache Kafka does it," 30 Haziran 2017, [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.confluent.io/blog/exactly-once-semantics-are-possible-heres-how-apache-kafka-does-it/>.
- [19] Apache Pulsar, "Pulsar Transactions: What are transactions?," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://pulsar.apache.org/docs/next/txn-what/>.
- [20] G. Hohpe ve B. Woolf, *Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions*. U.S.: Addison-Wesley Professional, 2004.
- [21] S. Newman, *Building Microservices*, 2. baskı. O'Reilly, 2021.
- [22] M. Kleppmann, *Designing Data-Intensive Applications*. O'Reilly, 2017.
- [23] ISO, "ISO 9241-210:2019 Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems," 2019.
- [24] H. Subramoni ve diğerleri, "Design and evaluation of benchmarks for financial applications using Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) over InfiniBand," *2008 Workshop on High Performance Computational Finance*, IEEE, Austin, TX, USA, 2008.
- [25] Genium INET, "Genium INET," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.borsaistanbul.com/files/kullanicikilavuzlari.pdf>
- [26] Oracle Database Technologies, "Database Technologies," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.oracle.com/database/technology/>
- [27] PostgreSQL, "PostgreSQL," [Çevrimiçi]. Erişim: 29 Ocak 2026. Erişim adresi: <https://www.postgresql.org/docs/current>.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# İlkokul Yapılarının İklimsel Konfor Tasarım Parametreleri Açısından İncelenmesi: Düzce Örneği

## *An Evaluation of Primary School Buildings in Terms of Climatic Comfort Design Parameters: The Case of Düzce*

Beyza Bayrak<sup>1,\*</sup>, Alper Bideci<sup>1</sup>, Ünal Sever<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Sanat, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>Kırklareli Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kırklareli, Türkiye

Geliş / Received: 05.04.2026

Kabul / Accepted: 16.04.2026

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Beyza Bayrak [beyzabayrak530@gmail.com](mailto:beyzabayrak530@gmail.com)

**ÖZ:** Barınma ihtiyacı tarih boyunca iklimsel koşullardan korunma ve çevresel verilerden yararlanma gereksinimiyle şekillenmiştir. Geçmişte yapılar güneşlenme, hâkim rüzgâr yönü ve su kaynakları gibi çevresel veriler dikkate alınarak tasarlanmış ve iklime uyumlu çözümler geliştirilmiştir. Günümüzde ise hızlı yapılaşma, tasarım aşamasında iklim verilerinin yeterince dikkate alınmamasına yol açmaktadır. Bu durum enerji tüketimini artırırken iç mekân konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Eğitim yapılarında termal konfor, öğrencilerin sağlık, dikkat düzeyi ve akademik performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. İlkokul çağındaki çocukların fizyolojik özelliklerinin yetişkinlerden farklılık göstermesi, bu yapıların iklimsel tasarım açısından daha hassas ve kullanıcı odaklı biçimde ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Aynı zamanda, günlerinin çoğunluğunu okul ortamında geçirmeleri, iç mekân kalitesinin önemini daha da artırmaktadır. Bu kapsamda, Düzce ili merkezine bağlı Koçyazı Mahallesi'ndeki ilkokullarda iklimsel konfor tasarım parametreleri değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda yeni eğitim yapıları için önerilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılar, konumları, yönlenmeleri, kütle formları, yapı kabuğu özellikleri ve yakın çevre ile kurdukları ilişki bağlamında incelenmiştir. Veriler yerinde gözlem ve analizler yoluyla toplanmış ve ilgili konfor kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yapıların yönlenme ve form açısından kısmen iklime uyumlu olduğunu göstermektedir. Buna karşın yapı kabuğu ve pasif tasarım stratejilerinin yeterince etkin kullanılmadığını göstermektedir. Çalışma sonucunda, eğitim yapılarında iklime duyarlı tasarımın önemi vurgulanarak literatüre ve uygulama alanına katkı sunulması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İklimsel tasarım, enerji etkin tasarım, eğitim binaları, ilkokul, Düzce.

**ABSTRACT:** The need for shelter has evolved throughout history in response to climatic conditions and the necessity to benefit from environmental data. In the past, buildings were designed by considering factors such as solar orientation, prevailing wind direction, and water resources in mind, leading to climate-responsive solutions. Today, however, rapid construction processes result in insufficient consideration of climatic data during the design phase. This increases energy consumption and negatively affects indoor comfort. In educational buildings, indoor thermal comfort directly affects students' health, attention, and academic performance. This is important for primary school children, whose physiological characteristics differ from adults and require more sensitive, user-oriented design approaches. As they spend most of their time in school, indoor environmental quality becomes even more important. In this context, primary schools in the Koçyazı neighborhood of Düzce city center were evaluated in terms of climatic comfort design parameters. The buildings were analyzed with respect to their location, orientation, mass form, building envelope properties, and relationships with the surrounding environment. Data was collected through on-site observations and analyses and assessed according to relevant comfort criteria. The findings show that buildings are partly climate-responsive in orientation and form, but passive design strategies and the building envelopes are not effectively utilized. As a result, the study aims to emphasize the importance of climate-responsive design in educational buildings and to contribute to both the literature and practice.

**Keywords:** Climatic design, energy-efficient design, educational buildings, primary school, Düzce.

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusu tarih boyunca artış göstermiş ve bu artış özellikle 1950 yılından itibaren hızlanmıştır [1]. Buna paralel olarak enerji talebi de artmaktadır. Fosil yakıtlar gibi sınırlı enerji kaynaklarının tükenmesi, çevresel sorunları da artırmaktadır [2]. Günümüzde binalar enerji tüketimi ve çevreye zarar verme açısından büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle yapılacak yeni binaların sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi ve tasarım sürecinde iklim verilerinin dikkate alınması önem taşımaktadır. Literatürde yer alan verilere göre, binalar inşaat ve kullanım aşamalarında toplam enerji tüketiminin %42'sinden, sera gazı emisyonlarının %35'inden ve su kaynaklarının tüketiminin yaklaşık %25'inden sorumludur [3,4]. Bu yüksek oranlar, tasarım aşamasında iklim verilerinin dikkate alınmasını giderek daha önemli hâle getirmektedir. Bu bağlamda, iklimsel konfor tasarım yaklaşımları, yapıların yerel iklim koşullarına uyum sağlayarak enerji ihtiyacını azaltmayı ve iç mekân konfor koşullarını iyileştirmeyi amaçlayan temel bir araçtır.

İklimle uyumlu tasarım uygulamalarının temel koşullarından biri sürdürülebilir mimarlıktır. Sürdürülebilirlik, yapıların çevresel etkilerini azaltarak kaynakların verimli kullanımını hedefleyen bir tasarım yaklaşımıdır. Sürdürülebilir yapılar konumuna, yönüne ve çevresine gösterdikleri duyarlılık ile yaşam döngüsü boyunca verimliliği üzerinden değerlendirilmektedir. Enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlayan "Sürdürülebilir yapı", "iklimle duyarlı yapı", "iklimsel konforlu yapı", "enerji etkin yapı" ve "yüksek performanslı yapı" kavramları benzer anlamlar taşımaktadır [5]. Enerji verimliliği, enerjinin etkin ve tasarruflu bir şekilde kullanılması, yani ihtiyacı karşılamak için daha az enerji harcanabilmesi olarak tanımlanabilir. İç sıcaklığı korumak için binayı dıştan yalıtım (ki bu hem soğutma hem de ısıtma döneminde katkı sağlar) yapılarda enerji verimliliğinin en basit örneklerindedir. Bu kavram bağlamında yapılar, kullanıcı konforunu koruyarak enerjiyi en verimli şekilde kullanabilmeli, iç ve dış ortam koşullarına uyum sağlayabilmelidir [2].

Bina içinde iklimsel konforun sağlanması, ışınım, sıcaklık, nem ve rüzgâr gibi parametrelerin kontrol edilmesine bağlıdır. Isıtma veya soğutma

gerektiren dönemlerde enerji korunumu, iklimle uyumlu tasarım stratejileri ile sağlanabilmektedir [6]. Bu kapsamda, proje alanına ait iklim verilerinin (sıcaklık, nem, rüzgâr yönü gibi) analiz edilmesi tasarım sürecinin ilk adımıdır. Ayrıca, bina formu, hacim düzeni, yönlenme durumu ve cephe tasarımı gibi mimari öğeler ile doğal havalandırma, yeterli doğal aydınlatma ve güneş kontrolü sistemleri gibi çevresel düzenlemeler de iklimsel konforun sağlanmasında kritik rol oynamaktadır. Bu önlemler, enerji tüketimini azaltırken iç mekân konforunu artırmaktadır [2,7].

Eğitim yapıları, kullanıcı profili olarak hassas grupları barındırmaları sebebiyle iklimsel konfor tasarımı açısından özel bir öneme sahiptir. Zomorodian ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, öğrencilerin termal konfor tercihlerinin yetişkinlerden farklı olarak standartlarda belirtilen konfor aralığında olmadığını göstermektedir. Öğrencilerin öğrenme performansı, dikkat süresi ve genel sağlığı üzerinde termal konforun belirleyici etkileri olmaktadır. Bu nedenle, ilkökul yapılarında iklimsel konfor tasarımının sağlanması yalnızca enerji verimliliği değil, aynı zamanda pedagojik verimlilik açısından da gereklidir [8].

Bu çalışmanın amacı, iklimsel konfor tasarım parametreleri açıklamak ve Düzce ili Koçyazı Mahallesi'nde bulunan ilkökul yapılarını bu parametreler doğrultusunda değerlendirmektir. Araştırma kapsamında incelenen başlıca parametreler; yapıların yönlendirilmesi, formu, yapı kabuğu özellikleri, doğal havalandırma olanakları, güneş kontrolü ve çevresel yerleşim koşullarıdır. Düzce'nin ılımlı-nemli iklim özellikleri göz önünde bulundurularak elde edilen bulgular, hem mevcut okul yapılarının performansını değerlendirmek hem de gelecekteki tasarımlar için iklimle duyarlı tasarım rehberi oluşturmak amacıyla yorumlanmıştır.

## 2. İKLİMSEL KONFOR TASARIM PARAMETRELERİ

İklimsel tasarım, yapıların çevresel koşullarla uyumlu biçimde tasarlanmasını amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın temel amacı, enerji tüketimini azaltırken kullanıcı konforunu artırmaktır [9]. Kullanıcının aktivite düzeyi, giyim yalıtımı ve mekân kullanım biçimi gibi bireysel etkenler algılanan sıcaklığı doğrudan

etkilemektedir. Bunun yanı sıra, güneş ışınımı, rüzgâr hızı, dış hava sıcaklığı ve bağıl nem gibi çevresel faktörler, yapıların maruz kaldığı iklimsel yükleri belirleyerek pasif ve aktif tasarım stratejilerinin şekillenmesini sağlamaktadır. Özellikle bina kabuğu özellikleri, gölgeleme sistemleri ve doğal havalandırma imkânları, enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahip olduğundan iklimsel konfor tasarımının temel bileşenleri arasında yer almaktadır [10]. İklimsel tasarım sürecinde kullanıcı, iklim verileri ve yapı özelliklerine ait parametrelerin birlikte ele alınması hem termal konforun sağlanması hem de enerji performansının artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır [11].

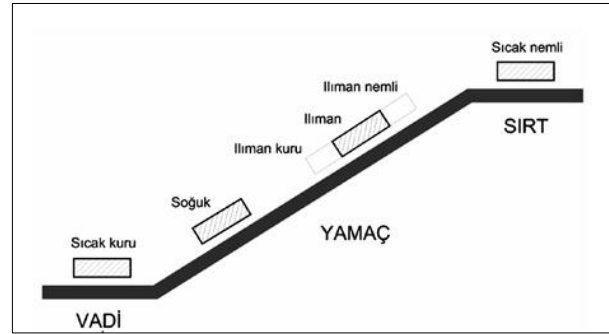
İklimsel konfor tasarım parametreleri kullanıcıya ilişkin (aktivite düzeyi ve giysi türü), iklime ilişkin (güneş ışınımı, hava hareketleri, hava nemi ve hava sıcaklığı) ve binaya ilişkin (yapının konumu, yapının yönlendirilmesi, yapının formu ve yapının yakın çevresiyle olan yapılaşma düzeyi) olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir [12,13]. Bu çalışma kapsamında binaya ilişkin parametreler alt başlıklarda açıklanmıştır.

## 2.1 Yapının Konumu

Yapının konumlandırılmasında topografya ile uyum, iklim koşullarının kontrol altına alınarak ısı kayıpları ve kazançlarının azaltılmasında önemli bir etkidir [2]. Konumlandırmada bitki örtüsü, hâkim rüzgâr yönü, güneş, bina aralıkları, blok tipleri ve yerleşim yoğunluğu gibi faktörler, kentsel hava akışı ve doğal havalandırmayı etkileyerek yapının performansını belirleyen temel morfolojik unsurlardır [14].

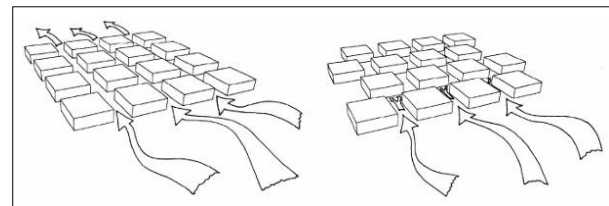
Yerleşim kararlarında güneş ışınımı ve hava akımları gibi doğal verilerin dikkate alınması uygun alan seçimi açısından belirleyicidir (Şekil 1). İklim koşullarına bağlı olarak yerleşim kararları farklılık göstermektedir. Sıcak ve nemli iklimlerde vadilerin sırt bölgeleri tercih edilerek rüzgârın serinletici etkisinden yararlanılırken, sıcak ve kuru iklimlerde yerleşimler genellikle vadilerde konumlandırılarak güneşin aşırı etkisinden ve rüzgârın taşıdığı tozdan korunma sağlanır. İlman iklimlerde ise güneş ve rüzgârdan dengeli şekilde yararlanmak esastır. Bu nedenle ılıman kuru iklimlerde yamaçların alt kısımları, ılıman nemli iklimlerde ise üst kısımlar tercih edilmektedir.

Soğuk iklimlerde ise güneşe bakan yamaçlar, güneş ışınımından maksimum düzeyde faydalanmak amacıyla uygun yerleşim alanlarıdır [15].



Şekil 1: İklim özelliklerine göre uygun topografik yerleşim örnekleri [15].

Konumlandırma aşamasında bir diğer faktör olan bina bloklarının dizilimindeki farklılıklar, rüzgârın yerleşim içine nüfuz etme derinliğini büyük ölçüde etkiler. Örneğin daha geçirgen ve düşük yoğunluklu kentsel dokular, rüzgâr kaynaklı doğal havalandırmayı desteklerken, sıkışık ve yüksek yoğunluklu yerleşimler hava akışını sınırlar [14]. CFD (Computational Fluid Dynamics / Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmaları, bina aralıklarının (Şekil 2) havalandırma performansını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir [16]. Bu doğrultuda, yerleşme ölçeğinde alınan morfolojik kararlar, dış mekân hava hareketlerinin yanı sıra iç mekânda doğal havalandırma potansiyelini ve termal konfor üzerinde doğrudan etkilidir.



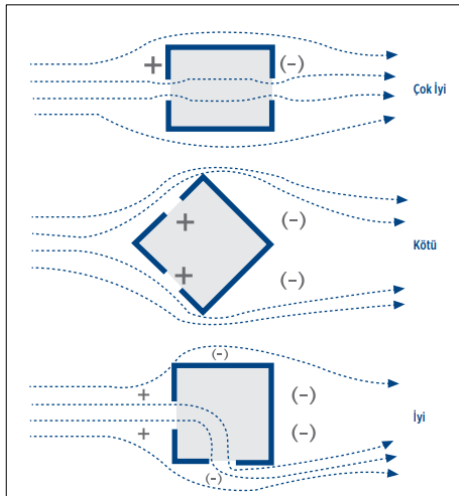
Şekil 2: Bina aralıklarının hava akışına etkisi [17].

## 2.2 Yapının Yönlendirilmesi

Yapının yönlendirilmesinde iki temel ilke öne çıkar. Bunlardan ilki, kış aylarında güneşten elde edilen ısı kazancını artırmak, yaz aylarında ise bu kazancı sınırlandırmaktır. İkinci ilke ise doğal havalandırmayı desteklemek amacıyla hâkim rüzgâr yönünden etkin biçimde yararlanmaktır. Güneş ışınımının ısıtıcı etkisi ile rüzgârın serinletici özelliğinden faydalanmada yönlendirme belirleyici bir rol oynar. Yapının yönüne bağlı olarak değişen

iklim koşulları, kullanıcı konforunu artıracak şekilde düzenlenebilir [15]. Bu kapsamda, hâkim rüzgâr yönü, pencere konumları ve açıklık düzenleri gibi tasarım parametreleri dikkate alınarak doğal havalandırma desteklenmeli ve enerji verimliliği artırılmalıdır. Sıcak iklim bölgelerinde yapıların birbirinin rüzgârını kesmeyecek şekilde konumlandırılması, rüzgârın serinletici etkisinden daha fazla yararlanılmasını sağlarken; soğuk iklimlerde kısa cephenin hâkim rüzgâr yönüne yönlendirilmesiyle ısı kayıpları azaltılabilir [2].

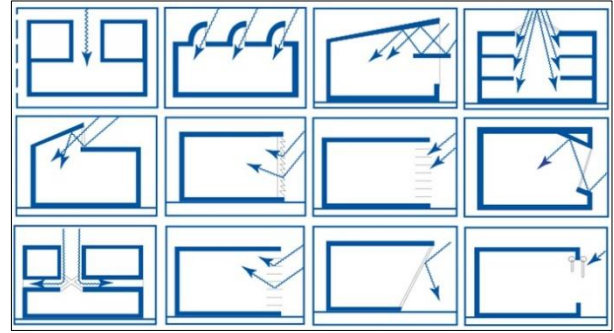
Pasif güneş enerjisinden yararlanma açısından yönlendirme kararları, yapı performansında önemli farklılıklar oluşturur. Özellikle güneye bakan, geniş cam açıklıklarına sahip ve iyi yalıtılmış yapılarda bu etki daha belirgin hâle gelmektedir. Kış aylarında güneş enerjisinin büyük bir kısmının elde edildiği 09.00–15.00 saatleri arasında, yapının güneş ışınımını engelleyecek unsurlardan arındırılmış biçimde yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, komşu yapıların konumu ve aralıkları da güneş kazancını azaltmayacak şekilde düzenlenmelidir [2]. Güneş ışınımının şiddeti ile rüzgârın hız, yön ve süreklilik özellikleri yönleri göre değişiklik gösterdiğinden, mevsimsel farklılıklar yapının aydınlatma olanaklarını ve ısı kazançlarını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, optimum yönlendirme (Şekil 3) güneşle yapılan açılı ve hâkim rüzgâr yönleri birlikte değerlendirilerek belirlenmeli, böylece güneş ve rüzgâr etkilerinin dengeli ve verimli kullanımı sağlanmalıdır [15].



Şekil 3: Yönlendirmenin hava akışı üzerindeki etkisi [18].

### 2.3 Yapının Formu

Yapı formu, plan geometrisi, yapı yüksekliği, çatı tipi ve cephe özellikleri ile tanımlanmaktadır [5]. Bu biçimsel özellikler, iklimin olumlu etkilerinden faydalanmayı mümkün kılarken, olumsuz çevresel etkilerden korunmaya da etkili olmaktadır [15]. Bina formunun yüzey–hacim oranı, güneş ışınım maruziyeti ve ısı kayıpları açısından belirleyici bir faktördür. Daha kompakt geometrilerin daha az dış yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle ısı transferini sınırlandırarak enerji ihtiyacını azalttığı çeşitli simülasyon çalışmalarında gösterilmiştir [19]. Eşit hacme sahip farklı geometrik formların yüzey alanları farklı tasarlanabilir (küçükten büyüğe doğru sırasıyla küre, silindir, küp ve dikdörtgen prizma (+ diğer prizmalar) şeklinde sıralanmaktadır [15]. Buna göre, mimari tasarım sürecinde form seçimlerinin yalnızca estetik değil, aynı zamanda enerji performansı sağlayacak şekilde yapılması gerektiğini göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4: Yapı Formu- Enerji Verimliliği İlişkisi [18].

Yönlendirme ve formun kombinasyonunun rüzgâr akışı üzerinde yarattığı değişimler, doğal havalandırmaı doğrudan etkilemektedir. Farklı geometrik formlara sahip binalar üzerinde yapılan CFD çalışmalarında, farklı formların rüzgârın hızında ve akışında gözle görülür değişikliklere neden olduğu ve bunun iç mekân hava değişim oranlarını etkilediği belirlenmiştir [20]. Dolayısıyla bina ölçeğinde yönlendirme ve formun bir arada değerlendirilmesi hem pasif ısı kontrolü hem de doğal havalandırma ve gölgelendirme üzerinde önemli olup, tasarım sürecinde çevresel verilerle birlikte bütüncül olarak ele alınması gerektiği görülmektedir.

### 2.4 Yapı Kabuğu

Yapı kabuğu, iç mekânı dış çevreden ayıran yatay,

düşey ve eğimli yapı elemanlarının bütünüdür. Ayrıca güneş kontrolü (Şekil 5) ve doğal havalandırma açısından enerji performansını belirleyen bir diğer kritik parametredir. Yapı kabuğundaki saydam alanlar, ısı kaybı ve kazancı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Saydam yüzeylerin artması ısı transferini artırırken, dolu yüzeylerin yalıtım etkisi azalmakta ve ısı koruma kapasitesi düşmektedir [15]. Özellikle yüksek camlı cephelerin bulunduğu yapılarda güneş ışınımının iç mekân termal konforu üzerindeki etkisi belirgin olmaktadır [21]. Bunu kontrol altına almak için cepheye entegre edilen gölgeleme elemanları, soğutma yüklerini azaltmada etkili pasif stratejiler olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda farklı gölgeleme elemanlarının enerji tüketimi üzerinde anlamlı farklar yarattığını görülmektedir [22].

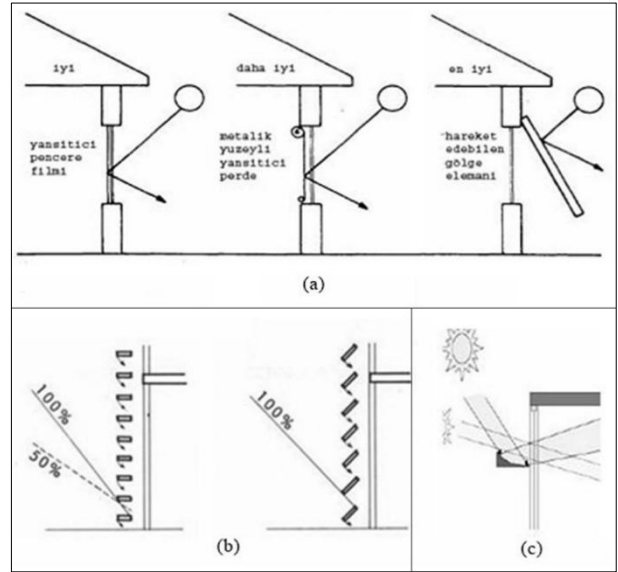
Diğer yandan doğal havalandırma stratejileri de bina kabuğunda yer alan açıklıkların konumu, boyutu ve geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. Rüzgâr kaynaklı havalandırma üzerine yapılan sayısal modelleme çalışmaları, açıklık tasarımının hava değişim oranlarını önemli ölçüde etkilediğini doğrulamaktadır [23]. İklimsel değişkenlerin ve dış ortam sıcaklığının kabuk performansı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, kabuk tasarımının geometrik ve iklimsel bağlamda dikkate alınması gerekmektedir [24,25].

Isı kaybının yüksek olduğu veya enerji tüketiminin fazla olduğu iklim koşullarında, kuzey cephelerinde az pencere veya kapalı yüzeyler ve peyzaj elemanları tercih edilebilir; güney cephelerinde ise ısı kaybı düşük camlar kullanılabilir. Ayrıca, kuzeye bakan alanlarda güneş kazancını artırmak amacıyla güneye yönlendirilmiş çatı pencereleri yerleştirilebilir [2].

Bina dış yüzeylerinin renk ve dokusu da termal performansı doğrudan etkiler. Duvar yüzeyinin dokusu ısı transferini etkilerken, renk güneş ışınlarının yansımalarını ve emilimini kontrol eder. Yalıtım seviyesi arttıkça, opak duvarlar için bu etkiler termal açıdan daha az belirleyici olur. Ancak pencerelerden içeri giren güneş ışınımını yansıtmak için açık renkli dış duvarların kullanımı hâlâ önemlidir. Ilıman ve nemli iklimlerde duvarlar orta tonlarda, çatılar ise açık renkli olarak tasarlanabilir. Yapı kabuğunun ısı geçirgenlik katsayısının düşük olması, yaz aylarında fazla ısı kazanımını

engellerken, kış aylarında ısı kaybını azaltarak enerji tasarrufu sağlar ve iç mekânın konforlu sıcaklık aralığında kalmasına yardımcı olur [2].

Sonuç olarak, bina kabuğunda güneş kontrolü ve doğal havalandırmanın dahil edilmesi hem iç mekân konforunun artırılması hem de enerji tasarrufu açısından önemlidir. Bu bağlamda açıklık yerleşimi, gölgeleme çözümleri ve malzeme özellikleri gibi parametrelerin iklimsel verilerle bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 5: Güneş kontrolü örnekleri. (a) doğu ve batı pencereleri için güneş kontrolü stratejileri, (b) yatay hareket edebilen gölgeleme elemanları, (c) ışık rafı [26].

## 2.5 Yapının Yakın Çevresiyle Olan Yapılaşma Düzeyi

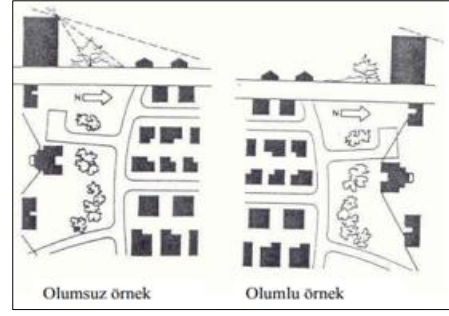
Yapının çevresiyle kurduğu ilişkide hedeflenen performansın sağlanabilmesi için bazı temel çevresel parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda komşu yapılaşma durumu, çevredeki bitki örtüsü ve arazinin topografik özellikleri öncelikli unsurlar arasında yer alır. Söz konusu faktörler, yapının maruz kalacağı güneş ışınımı miktarını ve hâkim rüzgârlarla olan etkileşimini belirleyerek enerji performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [6]. Yapıların birbirlerine göre konumlanması, yükseklikleri ve aralarındaki açık alan mesafeleri, güneş ışınımı ve rüzgâr akımları üzerinde yönlendirici ya da engelleyici bir etki oluşturabilmektedir (Şekil 6). Bu nedenle

bulunduğu iklim koşullarına bağlı olarak uygun tasarım stratejileri geliştirilmesi gerekmektedir [27].

Yapıların, yoğun yapılaşmanın hâkim olduğu kentsel alanlarda ya da daha seyrek yerleşimin bulunduğu kırsal bölgelerde konumlanması, enerji etkin tasarım açısından önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Kentsel dokunun yoğun olduğu bölgelerde hava hareketleri genellikle daha sınırlı, hava sıcaklıkları ise daha yüksektir. Bununla birlikte, hava kirliliği seviyesinin artması güneş ışınımının etkisini azaltırken, bitki örtüsünün azalmasına bağlı olarak nem oranı da düşmektedir. Kentsel alanlarda rüzgâr hızı, kırsal bölgelere kıyasla yaklaşık %25 oranında daha düşük olmasına rağmen, yüksek yapıların oluşturduğu dar koridorlarda (kentsel kanyon etkisi) yer yer beklenmedik derecede yüksek rüzgâr hızları gözlemlenebilmektedir [27].

Kullanıcı konforu, görsel, termal, akustik, iç hava kalitesi ve sosyal boyutlar gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu kapsamda doğal havalandırma, gün ışığından etkin yararlanma, yeşil alan varlığı ve manzara gibi unsurlar kullanıcı konforunu olumlu yönde etkilemekte ve enerji verimliliğine katkı sunmaktadır [2]. Bitki örtüsü, estetik katkısının yanı sıra yapı çevresinde mikro iklim koşullarını etkileyen işlevsel bir unsurdur. Bitkiler, güneş ışınımını azaltma, rüzgâr hızını düşürme, gürültüyü sınırlama ve hava kirliliğini filtreleyerek daha temiz bir ortam oluşturma gibi çeşitli faydalar sağlar. İklim koşullarına bağlı olarak bitki türü seçimi, bu etkileri artıracak ya da gerektiğinde ters yönde düzenleyecek şekilde planlanabilir; özellikle yaprak dökün türler, mevsimsel değişimlere uyum açısından avantaj sağlar [6].

Güney cephelerde daha küçük ölçekli ağaçların tercih edilmesi ve ağaçların yapıdan belirli bir mesafe (yaklaşık 5-10 metre) ile konumlandırılması, güneşten gelecek olan ışınları engellenmemesi açısından dikkat edilmesi gereken bir faktördür. Ilıman-nemli iklim bölgelerinde ise bitki örtüsünün serinletici hava akımlarını engellemeyecek biçimde düzenlenmesi önemlidir. Bu doğrultuda uzun gövdeli ve geniş taç yapısına sahip bitkilerin seçilmesi, hava akımının çim yüzeylerden geçerek yapıya ulaşmasını sağlayarak mikro iklim konforunu artırır [6].



Şekil 6: Güneş ışınım miktarının çevreyle ilişkisine örnekler [28].

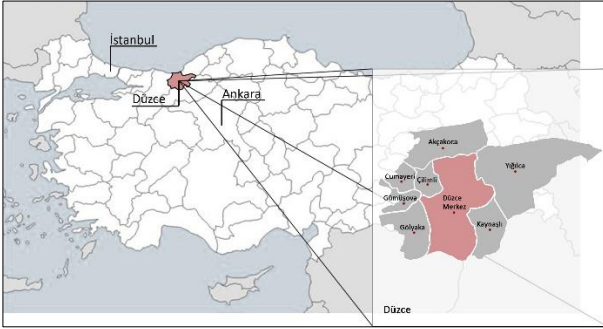
### 3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Araştırmada, Düzce ili Koçyazı Mahallesi'nde bulunan iki farklı ilkököl yapısı (İlkököl A ve İlkököl B) seçilmiştir. Çalışmada incelenen iki ilkököl yapısı, aynı mahalle içerisinde yer almaları ve benzer iklimsel koşullara maruz kalmaları nedeniyle seçilmiştir. Yapıların farklı dönemlerde inşa edilmiş olması, değişen tasarım yaklaşımlarının iklimsel konfor üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır. Çalışma sürecinde yapıların konumu, yönelmesi, formu, yapı kabuğu özellikleri ve çevresel ilişkileri saha incelemeleri ve mevcut plan verileri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, literatürde yer alan iklimsel tasarım kriterleri ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Araştırmanın kapsamı, yalnızca Düzce ili merkez Koçyazı Mahallesi'nde yer alan iki ilkököl yapısı ile sınırlıdır. Bu nedenle elde edilen bulgular genellenebilir nitelikte olmayıp, benzer iklim özelliklerine sahip bölgeler için bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Çalışmanın kısıtları, analizlerin yalnızca gözlemsel veriler ve mevcut planlar üzerinden gerçekleştirilmiş olmasıdır. Yapılarda uzun dönemli ölçümler (iç mekân sıcaklık, nem, hava akışı, enerji tüketimi vb.) yapılmamıştır. Bu sebeple, değerlendirmeler daha çok mimari ve iklimsel tasarım ilkeleri üzerinden nitel olarak yapılmıştır. Bununla birlikte, yapıların farklı mevsim koşullarındaki performans değişimleri doğrudan ölçülmemiştir. Literatür ise, çalışmanın kuramsal çerçevesini oluşturmak amacıyla sınırlı düzeyde ele alınmış olup, araştırmanın odağı mevcut yapıların yerinde analizi ve performans değerlendirmesi olarak belirlenmiştir.

### 3.1 Çalışma Alanı

Düzce ili, Batı Karadeniz Bölgesi'nde konumlanmakta ve yaklaşık olarak 40°37'–41°07' kuzey enlemleri ile 30°49'–31°50' doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 7). Kentin ortalama yükseltisi 140 metre civarındadır ve ilin yüzölçümü yaklaşık 370 km<sup>2</sup>'dir [29]. Batı Karadeniz Bölgesi'nde konumlanan bir il olup kuzeyde Zonguldak, batıda Sakarya, doğuda ve güneyde ise Bolu ile çevrelenmektedir [30].



Şekil 7: Düzce ilinin konumu.

Düzce'nin tarihsel geçmişi M.Ö. 800–1390 yılları arasında uzanmaktadır. Bölge Frig, Lidya, Pers, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı gibi birçok uygarlığın etkisi altında gelişmiştir. Bu süreç Bitinyalılar, Roma-Bizans, Osmanlı ve Cumhuriyet dönemleri çerçevesinde değerlendirilmektedir [30]. 1999 depremleri sonrasında il statüsü kazanan kent, İstanbul ve Ankara arasında yer alan stratejik konumu sayesinde bölgesel ölçekte önemli bir merkez hâline gelmiştir [30,31]. Kentsel gelişim büyük ölçüde D-100 karayolu doğrultusunda şekillenmiş ve yerleşim düzeni ova tabanı ile çevresindeki yükseltiler arasında dağılım ortaya koymaktadır [32]. Topografik olarak yüksek dağ kütleleriyle çevrili bir ova niteliği taşıyan Düzce'de, jeolojik yapı ağırlıklı olarak alüvyonlardan oluşmakta, yer yer volkanik kayalar gözlenmektedir [33,34].

İklimsel açıdan Düzce, Karadeniz ikliminin baskın olduğu, ancak Akdeniz ve karasal iklim tipleri arasında geçiş özelliği (ılıman-nemli iklim bölgesi özellikleri) gösteren bir bölgede yer almaktadır. Bu geçiş karakteri, özellikle topografyanın etkisiyle şekillenmektedir. Dağlık alanların kıyıda iç kesimlere doğru yükselmesi, deniz etkisinin tamamen ortadan kalkmasını engelleyerek iklim üzerinde kısmi bir yumuşatıcı etki oluşturmaktadır [33]. Yaz ayları genellikle sıcak ve nemli geçerken,

kış aylarında sıcaklıklar dönemsel olarak değişkenlik gösterebilmekte ve yer yer düşük sıcaklıklar gözlenebilmektedir. Yıllık yağış miktarının fazlalığı, geniş orman alanlarının varlığı, yüzey sularının yoğunluğu ve topografik yapının hava hareketlerini sınırlayıcı etkisi bölgedeki yüksek nemin sebeplerindedir [35]. Bu iklimsel özellikler, yapı tasarımında doğal havalandırma, gölgeleme ve nem kontrolü gibi stratejilerin önemini artırmaktadır.

### 3.2 İlkokul Yapıları (İlkokul A-B)

İlkokul A (Şekil 8), bodrum, zemin ve iki normal kat olmak üzere toplam dört kattan oluşmaktadır. Yaklaşık 5000 m<sup>2</sup> kapalı alana sahip olan yapı, 24 derslik içermektedir. 2025 yılında hizmete açılan okulda, 246 öğrenci ve 16 öğretmen bulunmaktadır.



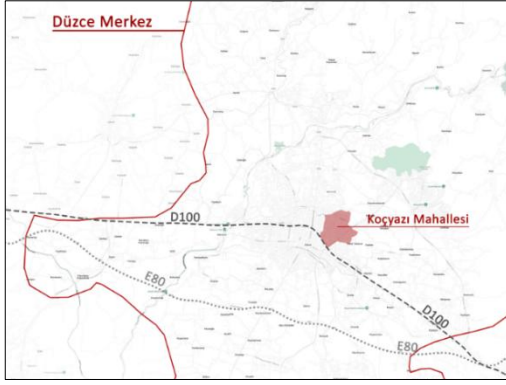
Şekil 8: İlkokul A.

İlkokul B (Şekil 9), bodrum, zemin ve iki normal kat olmak üzere toplam dört kattan oluşmaktadır. Yaklaşık 7000 m<sup>2</sup> kapalı alana sahip olan yapı, 40 derslik içermektedir. 2010 yılında hizmete açılan okulda, 1352 öğrenci ve 65 öğretmen bulunmaktadır.

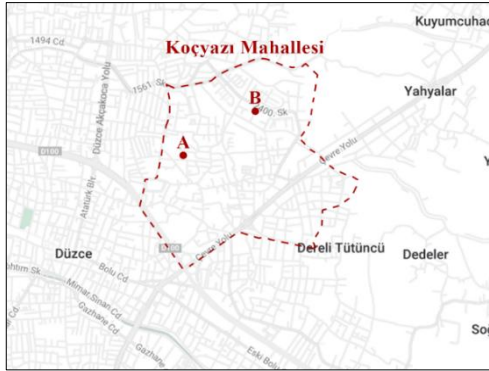


Şekil 9: İlkokul B.

Çalışmada incelenen ilköğretim yapıları (Şekil 11) Düzce ili kent merkezine bağlı Koçyazı Mahallesi'nde (Şekil 10) bulunmaktadır.



Şekil 10: Koçyazı Mahallesi'nin konumu.

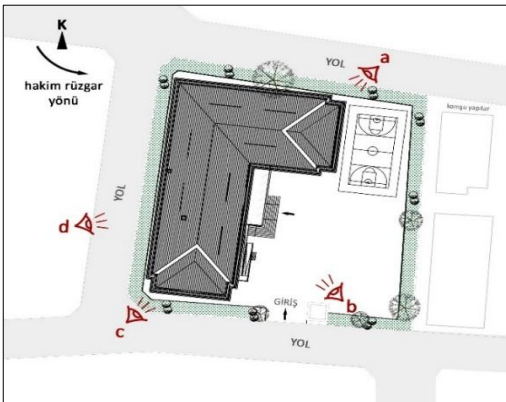


Şekil 11: Koçyazı Mahallesi'nde yer alan ilkokulların konumları.

### 3.3 İlkokul A



Şekil 12: İlkokul A çalışma alanı içerisindeki konumu

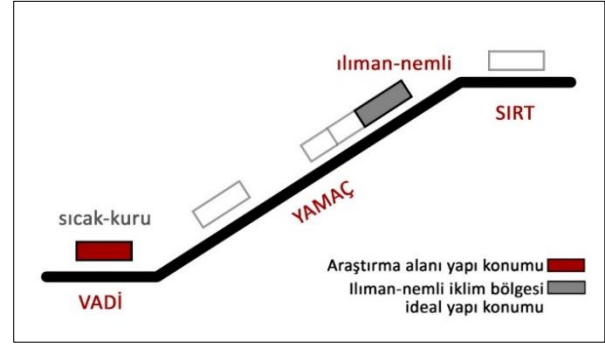


Şekil 13: İlkokul A çalışma vaziyet planı ve fotoğraf çekim açısı (a, b, c, d) konumları



Şekil 14: İlkokul A: a, b, c, d açılarından çalışma alanı görselleri

#### 3.3.1 Yapının Konumu



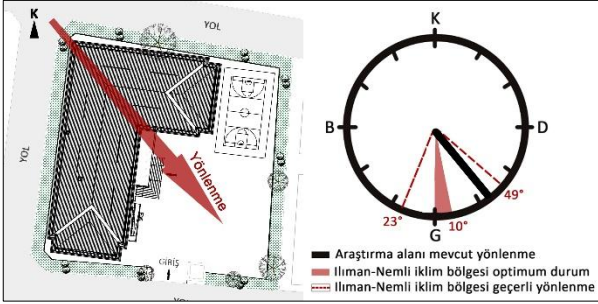
Şekil 15: İlkokul A: ılıman nemli iklim bölgesi ve çalışma alanı için yapı konumu

Koçyazı Mahallesi'nde yer alan İlkokul A'nın konumlandığı bölge (Şekil 12) topografik açıdan düşük eğimli ve düze yakın (Şekil 15) bir arazi karakteri göstermektedir. Planlı konut alanı içerisinde yer alan yapı, topografik olarak yapılaşmaya uygun olmakla birlikte, ova yerleşimine bağlı olarak yüksek nem, su birikimi ve sınırlı hava sirkülasyonu gibi dezavantajlar barındırmaktadır. Bu durum, özellikle ılıman nemli iklim koşullarında yapı çevresinde iklimsel konforun olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir.

#### 3.3.2 Yapının Yönlendirilmesi

Düzce, Karadeniz ikliminden etkilenen, bulutlu gün sayısının fazla olduğu ve nemli bir bölgedir. Bu nedenle güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamak kritiktir. Plan (Şekil 13) incelendiğinde, binanın ana kollarından birinin güneye baktığı görülmektedir. Bu, dersliklerin gün boyu doğal ışık alması ve kışın pasif ısıtmadan yararlanması için idealdir. Binanın batı cephesi yola paralel

uzanmaktadır. Batı güneşi (öğleden sonra) yatay geldiği için sınıflarda parlama ve aşırı ısınma yapabilir; ancak Düzce gibi çok sıcak olmayan bölgelerde bu durum, uygun gölgeleme elemanlarıyla avantaja dönüştürülebilir. Fotoğraflar (Şekil 14) incelendiğinde, içeriden sonradan eklenmiş gölgeleme elemanlarıyla (stor perde vb.) bu durumun kontrol altına alındığını gözlemlenmektedir.



Şekil 16: İliman ve nemli iklim bölgesi bina yönelim değerleri ve ilkokul A yönelimi.

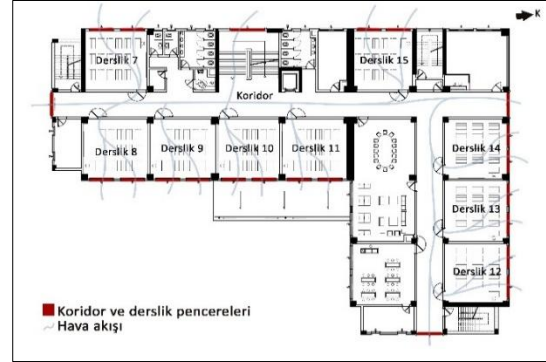
Ana girişin iç avluya bakması ve güneydoğu cephesinde yer alması stratejik bir karardır. Kuzey rüzgarına maruz kalan bir giriş, kapı her açıldığında bina içindeki sıcak havanın hızla kaçmasına (ısı kaybına) neden olurdu. Bu nedenle, güneyden verilen giriş, binanın termal dengesini korumaya yardımcı olur.

Yapının yönlendirmesinin (Şekil 16), Düzce'nin soğuk rüzgarlarından korunma ve pasif güneş kazancı sağlama açısından uygun olduğu değerlendirilmektedir. Bahçenin ve spor sahasının binanın doğu/güney kısmında kalması, öğrencilerin daha korunaklı ve aydınlık bir ortamda vakit geçirmesine olanak tanımaktadır.

### 3.3.3 Yapının Formu

Hâkim rüzgâr yönü ve korunma açısından okul binasının "L" formu, kuzeyden gelen soğuk rüzgarlara karşı bir kalkan görevi göstermektedir. Binanın kütlesi kuzey ve batı cephelerini kapatarak, okul bahçesini (doğu ve güney kısımları) rüzgârdan korunaklı bir iç avluya dönüştürmüştür. Bu yerleşim, özellikle kış aylarında teneffüs alanlarında (bahçede) mikroklima etkisi yaratarak öğrencilerin rüzgârdan daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, L formu, binanın gün ışığından yararlanma yüzeyini dikdörtgen bir kütleyle artırır. İç köşede kalan alanlar, sabah

ve öğle güneşini farklı açılardan alarak homojen bir aydınlatmaya katkı sunmaktadır.



Şekil 17: İlkokul A 1. Kat planı.

Açıklıkların konumu hava akışını değiştirmektedir. L tipi yerleşimlerde, köşe ve iki farklı cephe olduğu için farklı açıklık konumları oluşur ve bu çapraz havalandırma (cross-ventilation) için olumlu etki oluşturabilir [23]. Planda (Şekil 13) rüzgârın binanın dış çeperine çarpıp yanlara süzülmesi öngörülmüştür. 1. Kat planı incelendiğinde (Şekil 17) binanın koridorlarının ve sınıflarının karşılıklı pencerelere sahip olduğu görülmektedir. Kuzeyden gelen rüzgâr baskısı bina içerisinde taze hava akışını kolaylaştıracaktır. Koridorun uçlarındaki pencereler (merdiven kovaları ve koridor sonları) açık tutulursa, bina genelinde bir hava sirkülasyonu oluşur. Ancak sınıflar içindeki çapraz havalandırma, sadece kapı ve pencereler aynı anda açıkken mümkün olacaktır.

### 3.3.4 Yapı Kabuğu

Güney cephesindeki sınıflar ve vaziyet planında bahsettiğimiz batı cephesindeki (öğleden sonra) dikey güneş kırıcılar olmadan doğrudan güneş ışınımına maruz kalmaktadır. Bu durum, özellikle bahar ve yaz aylarında sınıfların hızla ısınmasına ("sera etkisi") yol açabilir. Sınıf içi sıcaklıklar artacak ve ısı konfor bozulacaktır. Yatay gelen güneş ışığı masalara ve tahtaya doğrudan yansyarak öğrencilerin gözlerini alabilir (parlama). Bu durumda sınıflarda iç mekân gölgeleme elemanlarının (stor perde vb.) kullanımı gereklidir. Ancak iç mekân perdeleri, ıyıyı camdan içeri girdikten sonra kestiği için dış güneş kırıcılar kadar etkili bir ısı kontrolü sağlamaz.

Güneş kırıcıların bulunmamasına rağmen geniş pencerelerin sağladığı avantajlar hâlâ geçerliliğini korumaktadır. Düzce'nin bulutlu günlerinde dahi

geniş pencere açıklıkları sayesinde sınıflara yüksek düzeyde gün ışığı girişi sağlanmaktadır. Bu durum, görsel konfor açısından olumlu bir etki yaratmaktadır.

Pencerelerin alt kısımlarının vasistas (yatay eksende açılabilir) olması, yağışlı havalarda bile kontrollü biçimde taze hava girişine olanak tanımaktadır. Geniş pencere yüzeyleri ise iç mekânda biriken nemli havanın daha hızlı tahliye edilmesini desteklemektedir.

Giriş cephesindeki tuğla kaplamalar, ısı kütlesi (thermal mass) sağlama potansiyeli ile gündüz güneş ısını emerek, gece yavaşça salarak iç sıcaklığı dengelemeye katkı sağlar. Güneş kırıncılarının eksikliği, kışın ısı kaybı riskini daha da artırmaktadır. Bu nedenle, geniş cam yüzeyler için nitelikli cam (ısıcam vb.) ve tuğla olmayan sıvalı yüzeyler için iyi bir mantolama (ısı yalıtımı) uygulanmış olması kritik önem taşımaktadır.

### 3.3.5 Yapının Yakın Çevresiyle Yapılaşma Düzeyi

Okulun bulunduğu Koçyazı Mahallesi, genel olarak düşük yoğunluklu bir konut dokusuna sahiptir. Şekil 10'da görüldüğü üzere okulun çevresindeki yapıların büyük çoğunluğunun müstakil veya az katlı (genellikle 2-3 katlı) konutlardan oluştuğu görülmektedir. Yapılar arasında geniş bahçeler ve tarımsal boşluklar mevcuttur. Bölge, bitişik nizamın olmadığı, "ayrık nizam" olarak adlandırılan, yapıların birbirine mesafeli durduğu bir kentsel dokuya sahiptir. Okulun etrafında rüzgârı kesecek yüksek bloklar veya yoğun bir yapı duvarı bulunmamaktadır. Bu durum, Düzce'nin kuzeyli sert rüzgarlarının yapı kabuğuna doğrudan çarpmasına neden olmaktadır. Çevrenin açıklık olması, kışın rüzgâr yükünü artırarak binanın dış yüzeyinden ısı kaybını hızlandırabilir. Ancak, daha önce belirtildiği gibi "L" formun bahçeyi içeri alması, açık arazideki rüzgâr etkisini kırmak için yerinde bir kentsel tasarım kararıdır.

Okulun yakın çevresinde yoğun betonlaşma yerine tarım arazileri, meyve bahçeleri ve boş parsellerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Şehir merkezlerindeki yoğun asfalt ve beton dokusunun yarattığı "kentsel ısı adası" etkisi bu bölgede oldukça düşüktür. Toprak yüzeylerin fazla olması, yaz aylarında çevredeki havanın aşırı ısınmasını engeller ve gece soğumasını kolaylaştırır. Bu durum, okul binasının doğal yollarla soğutulması

ve nem dengesi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

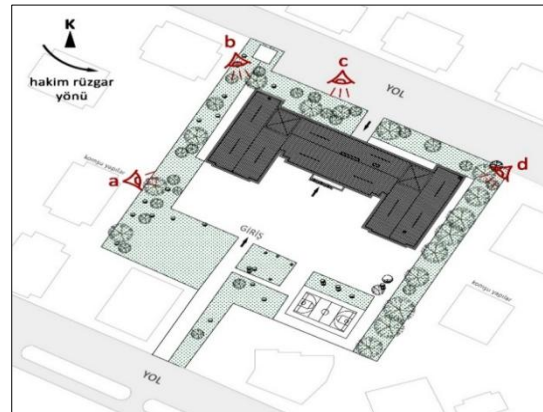
Çevredeki yapıların az katlı (2-3 kat) olması, okul binası üzerinde herhangi bir "komşu gölgesi" oluşmasını engellemektedir. Okul binası günün her saati, çevredeki binalardan bağımsız olarak maksimum güneş ışığı alabilmektedir. Kışın pasif güneş kazancı (ısınma) için bu durum oldukça uygundur. Ancak yazın, çevrede binayı gölgeleyecek ağaç veya yapı bariyeri olmadığı için, cephede görülen o geniş cam yüzeyler doğrudan güneş baskısı altında kalmaktadır.

Düzce, topografik yapısı gereği nemin ve hava kirliliğinin (inversiyon) biriktiği bir ovada yer almaktadır. Okulun etrafındaki boşluklar ve yol aksları, bölgede "hava koridoru" görevi görerek hava sirkülasyonuna olanak tanımaktadır. Yapılaşmanın seyrek olması, kirli veya nemli havanın okul çevresinde birikmesini engellemektedir. Rüzgârın bina aralarından rahatça geçebilmesi, sınıfların doğal havalandırma verimliliğini artırmaktadır.

### 3.4 İlkokul B



Şekil 18: İlkokul B çalışma alanı içerisindeki konumu

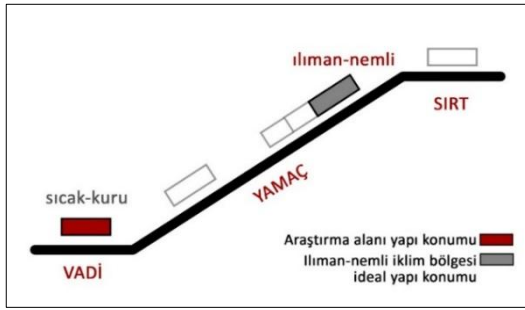


Şekil 19: İlkokul B çalışma vaziyet planı ve fotoğraf çekim açısı (a, b, c, d) konumları.



Şekil 20: İlkokul B: a, b, c, d açılarından çalışma alanı görselleri.

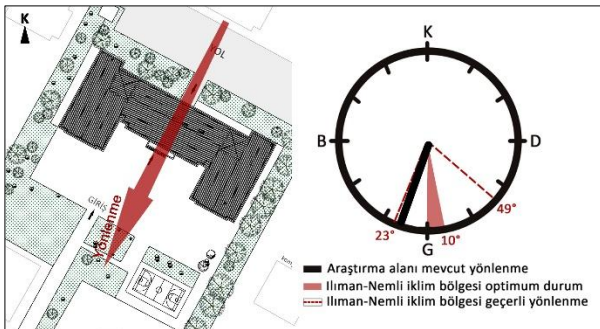
### 3.4.1 Yapının Konumu



Şekil 21: İlkokul B: Ilıman nemli iklim bölgesi ve çalışma alanı için yapı konumu.

Okul, Koçyazı Mahallesi'nde planlı konut yerleşimi içinde (Şekil 18), şehir merkezine yaklaşık 2 km uzaklıkta konumlanmıştır. Düz ve açık topografyada, planlı konut dokusu içinde konumlanması nedeniyle güneşlenme ve doğal havalandırma açısından potansiyel avantajlar sunmaktadır. Ancak bölgenin ova karakteri nedeniyle oluşabilecek nem, sis ve düşük hava hareketi gibi mikroklimatik olumsuzluklar, yapı tasarımında dikkate alınması gereken önemli çevresel faktörlerdir.

### 3.4.2 Yapının Yönlendirilmesi

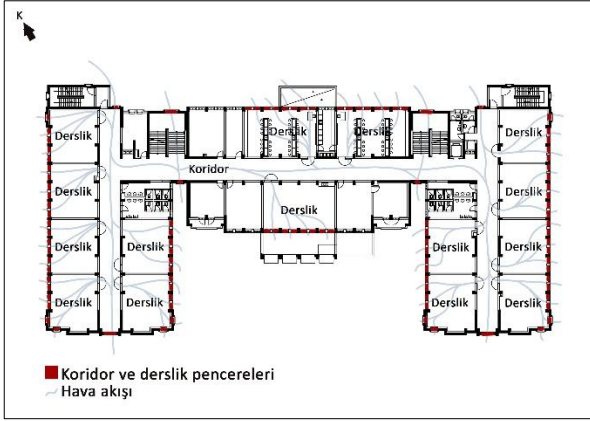


Şekil 22: Ilıman ve nemli iklim bölgesi bina yönelim değerleri ve ilkokul B yönelimi

Yapı kütleleri genel olarak doğu-batı doğrultusunda uzanmakta olup, uzun cephelerin kuzeye ve güneye baktığı anlaşılmaktadır (Şekil 19). Bu yönelim, iklimsel tasarım açısından oldukça doğru bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Güney cepheler güneşten daha fazla yararlanarak kışın doğal ısınma sağlarken, kuzey cepheler daha az güneş aldığı için ısı kaybını azaltacak şekilde kurgulanabilir. Hâkim rüzgâr yönünün kuzeybatıdan geldiği göz önüne alındığında, yapının bu rüzgârı doğrudan karşılayan cephelerinin bulunması doğal havalandırma açısından avantaj oluşturmaktadır, yapı çevresinde hava sirkülasyonunu desteklemektedir. Bununla birlikte, yapı formunun avlu oluşturacak şekilde kurgulanması, iç mekânların kontrollü hava hareketinden yararlanmasına olanak tanırken, dış çevredeki bitkisel düzenlemeler rüzgâr hızını kırarak konfor koşullarını iyileştirebilir. Ancak kuzeybatı yönünden gelen rüzgârların kış aylarında olumsuz etki yaratmaması için bu cephelerde koruyucu tasarım önlemlerinin alınması gerekmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, yapının yönelmesi (Şekil 22) güneş ve rüzgâr verilerinden yararlanma açısından uygundur ve iklimsel konfor koşullarını destekleyen bir yerleşim sergilemektedir.

### 3.4.3 Yapının Formu

Yapı, U formunda tasarlanmıştır ve ortada yarı açık bir avlu oluşturmaktadır (Şekil 19-20). Bu form, iklimsel açıdan değerlendirildiğinde rüzgârın doğrudan etkisini kısmen azaltarak daha kontrollü bir mikroklima oluşturulmasına katkı sunmaktadır. Aynı zamanda kütlelerin lineer uzanışı sayesinde cephe yüzeyleri artmakta ve doğal aydınlatma ile havalandırma olanakları güçlenmektedir. Binanın bloklu yapısı ve karşılıklı pencere düzeni, tennefüslerde sınıfların hızla havalandırılmasına (cross-ventilation) uygundur (Şekil 23). Nem oranının yüksek olduğu Düzce'de, yapı kabuğunun "nefes alabilmesi" ve iç mekândaki nemin tahliyesi, küf oluşumunu engellemek ve hava kalitesini korumak önemlidir. Ancak avlu alanının geniş ve sert zemin ağırlıklı olması, yaz aylarında ısınma ve termal konfor sorunlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle form genel olarak avantajlı olmakla birlikte, gölgeleme ve peyzaj düzenlemeleri ile desteklenmesi gerekmektedir.



Şekil 23: İlkokul B 1. Kat planı

#### 3.4.4 Yapı Kabuğu

Fotoğraflarda görüldüğü üzere yapıda tekrarlayan, dikey dikdörtgen formlu pencere düzeni hakimdir. Pencerelerin toplam cephe alanına oranı dengeli görünmekle birlikte, standart çift camlı alüminyum veya PVC doğrama kullanımı, kış aylarında Düzce'nin soğuk ve nemli havasında ısı köprüsü oluşturabilir. Pencerelerin yüksekliği, dersliklerin derinlerine kadar doğal ışık girmesine olanak tanımaktadır. Ancak, fotoğraflarda herhangi bir dış güneş kontrol elemanı (panjur, kırıcı vb.) görülmemektedir. Bu durum, özellikle güney cephelerde bahar ve yaz aylarında sınıfların aşırı ısınmasına (sera etkisi) neden olabilir. Cephede kullanılan açık sarı, bej ve beyaz tonları, güneş ışınlarını yansıtarak yazın yapının aşırı ısınmasını engellemek adına olumlu bir tercihtir.

#### 3.4.5 Yapının Yakın Çevresiyle Yapılaşma Düzeyi

Yapının yer aldığı Koçyazı Mahallesi, genel itibarıyla arık nizam, düşük yoğunluklu ve az katlı bir yerleşim dokusuna sahiptir. Bu kentsel doku, "Kentsel Isı Adası" etkisinin minimize edilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Vaziyet planında belirtilen kuzey-kuzeybatı yönlü hâkim rüzgâr yönü, yapı adaları arasındaki geniş boşluklar sayesinde kesintiye uğramadan parsel içerisine nüfuz edebilmektedir. Yapının çevresindeki düşük yapılaşma yoğunluğu, rüzgâr hızının düşmesini engelleyerek pasif soğutma ve doğal havalandırma potansiyelini artırmaktadır. Okul yapısının çevresindeki konut dokusunun homojen dikey ve yatay boşlukları, yapının tüm cephelerinin iklimsel veriyle doğrudan temas etmesine olanak tanımaktadır.

Yapı parseli çevresindeki yeşil boş alanlar ve bahçe kullanımları, sert zemin oranını düşürmektedir. Bu durum, yüzeyin güneş ışığını emme ve yeniden yayma (albedo) oranını dengeleyerek çevre sıcaklığının stabil kalmasına yardımcı olmaktadır. Parşel sınırlarında görülen ağaç dizilimleri, özellikle hâkim rüzgâr yönünde bir "rüzgâr kırıcı" görevi üstlenerek bina kabuğu üzerindeki ısı kayıplarını azaltma potansiyeline sahiptir. Kentsel morfoloji açısından bakıldığında, yapının yakın çevresindeki yapılaşma düzeyi, iklimsel veriye duyarlı bir yerleşim düzeni sunmaktadır.

## 4. SONUÇ

Çalışmada ılıman nemli iklim bölgesinde araştırılan ilköğretim yapılarının iklimsel konfor tasarım parametreleri doğrultusunda incelenmesiyle elde edilen sonuçlar şunlardır;

- Yapı konumu parametresinde, her iki yapının da düz ve ova karakterli bir topografyada, düşük yoğunluklu yerleşim dokusu içerisinde konumlandığı tespit edilmiştir. Bu durum güneşlenme ve doğal havalandırma açısından avantaj sağlar fakat yüksek nem ve sınırlı hava sirkülasyonu gibi mikroklimatik dezavantajları da beraberinde getirmektedir.
- Yapı yönlendirilmesi parametresinde, yapıların genel olarak güney yönelimli cepheler aracılığıyla güneş ışınımından yararlanacak şekilde konumlandırıldığı belirlenmiştir. Böylece kış aylarında pasif ısı kazancını desteklerken, hâkim rüzgâr yönüyle ilişkili olarak doğal havalandırma olanaklarının da değerlendirildiği anlaşılmaktadır.
- Yapı formu parametresinde, İlkokul A'da L formu, İlkokul B'de ise U formunun tercih edildiği tespit edilmiştir. İkisinde de rüzgâr etkisini kontrol altına alarak korunaklı açık alanlar oluşturduğu, aynı zamanda doğal aydınlatma ve çapraz havalandırma açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir.
- Yapı kabuğu parametresinde, geniş cam yüzeylerin doğal aydınlatma kapasitesini artırdığı saptanmış; ancak dış gölgeleme elemanlarının yetersizliği nedeniyle yaz aylarında güneş kontrolünün sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle İlkokul A'nın cephesinde yer alan renkli pencere

sövelerinin mevcut haliyle yalnızca dekoratif birer katman olarak kaldığı, oysa bu elemanlara derinlik kazandırılarak pasif birer güneş kırıcı olarak tasarlanabileceği öngörülmektedir. İki okulun da açık tonlu dış cepheleri ısı kazancını azaltıcı yönde olumlu katkı sağlamaktadır. Fakat İlkokul A'daki asimetrik doluluk-boşluk oranlarının ve İlkokul B'deki geleneksel pencere düzeninin güneş kırıcı elemanlarla desteklenmemesi, mevsimsel geçişlerde iç mekân konfor koşullarını olumsuz etkileyebilecek ortak bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir.

- Yapının yakın çevresiyle yapılaşma düzeyi parametresinde, düşük yoğunluklu ve ayırık nizam yerleşimin hâkim olduğu, yapı çevresinde hava akımını engellemeyen açık alanların ve yeşil dokunun bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum doğal havalandırmayı desteklerken, kentsel ısı adası etkisinin sınırlı kalmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, açık alanların fazlalığı, özellikle kış aylarında rüzgârın etkisini artırarak ısı kayıplarını yükseltebilmektedir.

Sonuç olarak, incelenen ilkokul yapılarının iklimsel konfor tasarım parametrelerini çoğunlukla karşıladığı görülmüştür. Özellikle yönlendirme ve yapı formu açısından iklime duyarlı tasarım kararlarının benimsendiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yapı kabuğunda güneş kontrol elemanlarının yetersiz olması ve çevresel düzenlemelerin sınırlı kalması geliştirilmesi gereken başlıca noktalar olarak öne çıkmaktadır.

Günümüzde enerji verimliliği ve kullanıcı konforunun giderek daha fazla önem kazandığı göz önünde bulundurulduğunda, eğitim yapılarında iklime uyumlu tasarım yaklaşımlarının daha kapsamlı değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Milli eğitimin prototip okul uygulamalarında, farklı iklim bölgelerine özgü verilerin yeterince dikkate alınmaması, enerji tüketiminin artmasına ve iç mekân konfor koşullarının olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, eğitim yapılarının tasarım sürecinde tek düze prototip uygulamalar yerine yerel iklim verilerine dayalı, esnek ve uyarlanabilir çözümlerin geliştirilmesi hem enerji etkinliği hem de kullanıcı sağlığı açısından önem taşımaktadır.

Bu kapsamda, gelecekte tasarlanacak eğitim yapılarında yerel iklim verilerine dayalı cephe tasarımlarının geliştirilmesi, dış gölgeleme elemanlarının zorunlu tasarım bileşeni olarak ele alınması ve yapı kabuğunda pasif sistemlerin daha etkin kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, eğitim yapılarının tasarım sürecinde tek düze prototip uygulamalar yerine yerel iklim verilerine dayalı, esnek ve uyarlanabilir çözümlerin geliştirilmesi hem enerji etkinliği hem de kullanıcı konforunu artıran yapılar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

**Yazar Katkıları:** Yazarlar, çalışmanın ortaya çıkmasında, kaynak taramada, makalenin kavramsal ve betimsel kısımlarında, düzenlenmesinde ortak katkı sağlamışlardır.

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

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Q. Qiao, A. Yunusa-Kaltungo, and R. Edwards, "Towards developing a systematic knowledge trend for building energy consumption prediction," *Journal of Building Engineering*, 35, 101967, 2021.
- [2] A. Geçkil and A. Bideci, "İklimsel tasarım konfor parametrelerinin bir eğitim yapısı üzerinde incelenmesi," in *Proc. EGE 10th Int. Conf. Applied Sciences*, İzmir, Turkey, 2023.
- [3] European Environment Agency. (2023). Buildings and construction. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/buildings-and-construction>
- [4] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). Bütünleşik bina tasarımı yaklaşımı ile proje geliştirme süreci uygulama kılavuzu. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Turkey. [Online]. Available: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/ustmenu/ustmenu838.pdf>
- [5] Ö. G. Çalış and M. Z. Akdemir, "Sağlık yapılarının iklimsel konfor tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi: Soğuk iklim bölgesinden Muş Devlet Hastanesi örneği," *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 3(2), 129–141, 2018, doi: 10.26835/my.410252.

- [6] S. Kaya, E. N. Usta, B. B. Dulkadiroğlu, and A. Bideci, "Facade damages in public structure: A case of Düzce," in *Proc. ISPEC Int. Congr. Multidiscip. Stud.*, 2021, 651–663.
- [7] H. Parlak Arslan and G. Koçlar Oral, "İklimsel tasarım bağlamında konut binalarında cephe tasarım parametrelerinin hassasiyet analizi," *Gazi University Journal of Science and Technology*, 38 (3), 1769–1780, 2023.
- [8] Z. S. Zomorodian, M. Tahsildoost, ve M. Hafezi, "Thermal comfort in educational buildings: A review article," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895–906, 2016.
- [9] M. Hu, K. Zhang, Q. C. Nguyen, and T. Tasdizen, "The effects of passive design on indoor thermal comfort and energy savings for residential buildings in hot climates: A systematic review," *Urban Climate*, 49, 101466, 2023.
- [10] D. Yaşar, "Climate as an input for design: A review based on Norman Foster's residential buildings," *Kent Akademisi*, 16(3), 1546–1559, 2023.
- [11] K. E. Charles, "Fanger's thermal comfort and draught models," *Nat. Res. Counc. Canada, Inst. Res. Constr., IRC-RR-162*, 2003.
- [12] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, GA, USA, 2017.
- [13] Ç. B. Dikmen, "Enerji etkin yapı tasarım ölçütlerinin örneklenmesi," *Politeknik Dergisi*, 14(2), 121–134, 2011.
- [14] S. J. Mei, J. T. Hu, D. Liu, F. Y. Zhao, Y. Li, Y. Wang, and H. Q. Wang, "Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies," *Energy and Buildings*, 155, 324–338, 2017.
- [15] A. Demirtaş, "Farklı iklim bölgelerinde otel yapılarının ısıtma ve soğutma yükleri açısından karşılaştırılması," M.S. thesis, Yıldız Technical Univ., Istanbul, Turkey, 2011.
- [16] A. Gülten and H. F. Öztop, "Analysis of natural ventilation performance of residential areas," *Urban Climate*, 34, 100709, 2020.
- [17] D. Dursun and M. Yavaş, "Soğuk iklime duyarlı kentsel tasarım yaklaşımları," *Iğdır University Journal of Science and Technology*, 7(2), 269–278, 2017.
- [18] European Union Project, *Enerji verimli bina tasarım stratejileri*, Project Rep., EuropeAid/134786/IH/SER/TR, Ankara, Turkey, 2016.
- [19] C. Marincu, D. Dan, and L. Moga, "Influence of building shape and insulation thickness on energy efficiency," *Energy for Sustainable Development*, 79, 101384, 2024.
- [20] B. Guo, M. Chen, X. Zhu, Z. Wang, L. Li, L. Pei, H. Chen, P. Chen, and T. Guo, "Urban morphology and ventilation using CFD-GIS," *Sustainable Cities and Society*, 122, 106241, 2025.
- [21] R. L. Hwang, P. L. Fang, and W. A. Chen, "Impact of solar radiation on indoor thermal comfort near highly glazed façades in a hot-humid subtropical climate: An experimental evaluation," *Building and Environment*, 243, 110725, 2023.
- [22] S. G. Koç and S. Maçka Kalfa, "Effects of shading devices on energy performance," *Journal of Building Engineering*, 44, 102653, 2021.
- [23] R. Kumar, H. A. Farhan, S. Nayak, M. Paswan, and A. Achintya, "Wind driven natural ventilation in building design," *Materials Today: Proceedings*, 46, 6770–6774, 2021.
- [24] T. Altun, A. Akçamete, and M. Akgül, "Investigation of outdoor temperature effects on building heating energy requirement," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(4), 789–799, 2020.
- [25] Y. Lin, H. Huang, J. Yang, X. Hu, and D. Li, "Meteorological parameters and building energy consumption," *Buildings*, 13(10), 2600, 2023.
- [26] Ö. Koca, "Sıcak kuru ve sıcak nemli iklim bölgelerinde enerji etkin yerleşme ve bina tasarım ilkeleri," M.S. thesis, Istanbul Technical Univ., Istanbul, Turkey, 2006.
- [27] F. Umaroğulları and C. Cihangir, "Toplu konutların iklimsel konfor tasarım parametrelerine göre değerlendirilmesi," *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 4(1), 105–122, 2019.
- [28] S. Soysal, "Konut binalarında tasarım parametreleri ile enerji tüketimi ilişkisi," M.S. thesis, Gazi Univ., Ankara, Turkey, 2008.
- [29] O. Çelik, "Düzce Konuralp–Prusias Bölgesi geleneksel evlerinin kapı ve pencere doğramalarının incelenmesi," M.S. thesis, Düzce Univ., Düzce, Turkey, 2025.
- [30] Düzce Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, *Düzce İli 2024 Yılı Çevre Durum Raporu*, Düzce, Turkey, 2024.

- [31] M. F. Özalp and H. Arslan, "Kentsel planlamadaki değişim ve dönüşümün kent formunun gelişimine etkisinin incelenmesi: Düzce örneği," *Düzce University Journal of Science and Technology*, 8(3), 2229–2244, 2020.
- [32] B. Kümbetoęlu, I. User, Ş. Gülfidan, B. Yarar, M. Mozakoęlu, and M. Çoban, "Depremden 5 yıl sonra Düzce ilinde değişen toplumsal, ekonomik ve kişisel yaşam," TÜBİTAK Rapid Support Project Rep., Marmara Univ., Faculty of Arts and Sciences, Istanbul, Turkey, 2007.
- [33] E. Özcan, "Düzce Ovası ve çevresinin sıcaklık özellikleri," *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 24(1), pp. 67–80, 2004.
- [34] A. Ateş, "1999 Düzce depreminde zemin–yapı rezonans uyuşumuna bağlı oluşan yapı hasarlarının araştırılması," *Düzce University Journal of Science and Technology*, 4(3), 911–925, 2016.
- [35] B. Sabuncu, "Geleneksel konutların yeniden kullanılması ve onarımı aşamasında malzeme analizinin önemi: Düzce-Konuralp örneği," M.S. thesis, Dept. Architecture, Inst. Sci. Eng., Düzce Univ., Düzce, Turkey, 2022.

